

А. К. Федоренко, Є. І. Крючков, О. К. Черемних, І. Т. Жук, А. Д. Войцеховська

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬОВИХ ЗБУРЕНЬ У СЕРЕДНЬОШИРОТНІЙ МЕЗОСФЕРІ ЗА ДАНИМИ МЕРЕЖІ ДНЧ-РАДІОСТАНЦІЙ

Широка світова мережа передавачів та приймачів радіохвиль дуже низьких частот (ДНЧ) дозволяє систематично досліджувати стан нижньої іоносфери в глобальному масштабі. Проте визначення характеристик іоносферної плазми та нейтральної атмосфери за даними вимірювань амплітуд і фаз ДНЧ-радіосигналів стикається зі значними труднощами. Їхньою причиною є складний характер взаємодії радіохвиль із середовищем під час відбиття хвиль від іоносфери, а також складність хімічних процесів, що протікають при наявності заряджених і нейтральних частинок у нижній іоносфері. У даній роботі в рамках уявлень геометричної оптики досліджено можливість встановлення властивостей акустико-гравітаційних хвиль за даними вимірювань амплітуд радіосигналів на відносно коротких трасах (протяжністю менше 1500 км). Проаналізовано можливі фізичні механізми впливу поширення акустико-гравітаційних хвиль на іоносферних висотах на амплітуди ДНЧ-радіосигналів. Отримано теоретичні співвідношення, що дозволяють розраховувати флуктуації електронної концентрації, вертикальне зміщення висоти відбиття радіосигналів та оцінити амплітуди флуктуацій нейтральної концентрації внаслідок поширення акустико-гравітаційних хвиль. Досліджено сезонні та добові флуктуації амплітуд ДНЧ-радіохвиль на кількох європейських трасах протягом 2013—2014 рр., для чого було використано дані передавачів на станціях в Німеччині (DHO38), Великобританії (GQD) та Італії (ICV) з пунктом прийому у Франції (A118). Проаналізовано особливості флуктуацій амплітуд радіосигналів у денних та нічних умовах. За вимірами амплітуд ДНЧ-радіосигналів розраховано фоновий рівень акустико-гравітаційних хвиль на висотах відбиття, який становить 200...400 м для флуктуацій вертикального зміщення об'ємута 1...2 % для флуктуацій відносної концентрації нейтральних частинок. Показано, що значення фонових рівнів акустико-гравітаційних хвиль у мезосфері середніх широт вдень на висотах 70 км і вночі на висотах 90 км є близькими.

Ключові слова: акустико-гравітаційна хвиля, іоносферне збурення, радіохвиля дуже низької частоти.

ВСТУП

Широка світова мережа передавачів та приймачів радіохвиль дуже низьких частот (ДНЧ) відкриває можливості для глобального моніторингу та діагностики стану нижньої іоносфери в режимі реального часу. Поширення ДНЧ-радіохвиль відбувається у хвилеводі Земля — іоносфера з висотою відбиття вдень на висотах 70...74 км (D-область іоносфери) і вночі на висотах 85...90 км (E-область іоносфери) [1, 21]. Вказаний інтервал

висот є важкодоступним для інших експериментальних методів, а фізика процесів у нижній іоносфері значно менш вивчена, ніж у вищих областях іоносфери. Дані вимірювань мережі ДНЧ-радіостанцій можна використовувати для розв'язання низки наукових задач, зокрема для дослідження впливу різних факторів космічного та приземного походження на стан нижньої іоносфери та уточнення моделі іоносфери. Діагностика іоносферних збурень за даними спостережень ДНЧ-радіохвиль представляє не тільки науковий, а і практичний інтерес. Збурення іоносфери створюють завади для поширення ДНЧ-радіохвиль, що обмежує точність їхнього

застосування для технічних потреб радіозв'язку, радіонавігації, служби точного часу тощо.

Для теоретичного дослідження поширення ДНЧ-радіохвиль у хвилеводі Земля — іоносфера традиційно застосовують два основних підходи: теорію мод [11] та наближення геометричної оптики (wave-hop theory) [6, 22]. В теорії мод досліджуються властивості хвилевода на всій його протяжності від передавача до приймача. В рамках цієї теорії розроблено спеціальне програмне забезпечення для розрахунку концентрації електронів та градієнта електронної концентрації в залежності від геометрії траси і з урахуванням зміни гео- та геліофізичних умов [10]. Цей метод ефективно використовується для дослідження іоносфери за реакцією ДНЧ-радіосигналів на сонячні спалахи. Сонячний рентгенівський спалах є своєрідними «тестовим» збуренням іоносфери, яке носить глобальний характер і охоплює всю освітлену півкулю. Під час спалахів рівень іонізації в D-області збільшується на 2—3 порядки. Реакція іоносфери на сонячний спалах є прогнозованою і досить добре вивченою [12, 14]. Проте спостерігаються флуктуації радіосигналів, викликані багатьма іншими чинниками [1, 15]. Зокрема флуктуації амплітуд ДНЧ-радіохвиль з періодами десятки хвилин, які пов'язують з поширенням акустико-гравітаційних хвиль (АГХ), добре помітні у нічних вимірюваннях, а також на термінаторі [17, 18].

Взаємодія ДНЧ-радіохвиль з іоносферою визначається такими основними чинниками: концентрацією електронів на рівні відбиття, висотним градієнтом електронної концентрації і частотою зіткнень електронів з нейтральними частинками [21]. При зміні параметрів іоносфери геометрія хвилеводу та коефіцієнти відбиття радіохвиль від іоносфери також зазнають відповідних змін, що в результаті призводить до флуктуацій амплітуд і фаз ДНЧ-радіосигналів у пункті прийому [1]. Таким чином, є можливість за вимірами амплітуд ДНЧ-радіохвиль опосередковано відтворювати властивості іоносфери і нейтральної атмосфери. Діагностика АГХ за допомогою мережі ДНЧ-радіостанцій є можливою внаслідок періодичних змін параметрів нейтральної атмосфери та іоносфери на висотах відбиття радіохвиль.

Значний науковий інтерес до вивчення АГХ за допомогою ДНЧ-радіохвиль пов'язаний з тим, що нічний рівень відбиття від іоносфери є близьким до висот мезопаузи (85 км). На цьому висотному рівні, що відповідає абсолютному мінімуму температури у земній атмосфері, можливе захоплення АГХ з певними спектральними характеристиками у мезосферний хвилевід. Так, спостереження АГХ у світінні атмосферних емісій гідроксилу показують, що на висотах мезопаузи часто реєструються хвильові збурення з характеристиками, які відповідають хвилевідним та еванесцентним АГХ (поширюються лише горизонтально) [19]. З простих геометричних міркувань зрозуміло, що еванесцентні АГХ, які поширюються горизонтально на висотах відбиття радіохвиль, більше впливають на флуктуації їхніх амплітуд, ніж АГХ, які вільно поширюються в атмосфері під певним кутом до горизонту.

Як показують дані супутникових і наземних вимірювань, поширення АГХ на різних висотних рівнях іоносфери і нейтральної атмосфери проявляється у вигляді флуктуацій з періодами від 5 хв. до кількох годин. Зокрема, ці хвильові збурення з відносною амплітудою у кілька відсотків систематично спостерігаються у F2-області іоносфери, як свідчать дані прямих вимірювань на супутнику «Dynamic Explorer 2» [4, 8, 9].

МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДІОСИГНАЛІВ ДУЖЕ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ

Поширення АГХ супроводжується періодичними змінами атмосферних та іоносферних параметрів, що суттєво впливає на поширення ДНЧ-радіохвиль у хвилеводі Земля — іоносфера. Внаслідок великої щільності нейтрального газу швидкості хімічних реакцій в нижній іоносфері з участю електронів протікають настільки швидко, що їхнім механічним переносом на часових масштабах АГХ (десятки хвилин) можна знехтувати. Тому на цих висотах вплив АГХ на поширення ДНЧ-радіохвиль проявляється переважно через флуктуації електронної концентрації, які виникають внаслідок змін швидкостей протікання хімічних реакцій, що визначають утворення та втрати електронів у областях стиснення

і розрідження нейтрального атмосферного газу [2]. Внаслідок цього змінюються ефективна висота та коефіцієнти відбиття ДНЧ-радіохвиль від іоносфери. Тому, їхня амплітуда і фаза у пункті прийому будуть зазнавати часових флуктуацій з періодами АГХ. В даній роботі ми виділимо основні чинники, що визначають вплив поширення АГХ на іоносферних висотах на зміну амплітуд ДНЧ-радіосигналів.

В D-області іоносфери основним джерелом заряджених частинок у незбурених умовах є іонізація молекул NO в лінії L_α і переважає іон NO^+ [2]. У денних умовах іонізація відбувається прямим сонячним випромінюванням, а вночі — випромінюванням, розсіяним у геокороні. Втрати електронів переважно визначаються рекомбінацією з іонами NO^+ та молекулярними іонами зв'язками, серед яких у D-області зазвичай переважають кластери $\text{NO}^+(\text{N}_2)$. У D-області рівноважна концентрація електронів $N_e \propto 1/\alpha_{ef}$, де α_{ef} — ефективний коефіцієнт рекомбінації, який визначається відносним вмістом молекулярних іонів, іонів-кластерів та негативних іонів [2]. Для формування іоносферного відгуку на поширення АГХ важливо, що коефіцієнт рекомбінації іонів-кластерів є на порядок більшим, ніж для молекулярних іонів, а їхній відносний вміст різко залежить від температури. Збільшення (зменшення) температури відносно середніх незбурених значень призводить до сповільнення (прискорення) утворення іонів кластерів у цих областях.

В теорії АГХ зазвичай розглядають відносні флуктуації атмосферних параметрів, що виникають при поширенні цих хвиль: концентрації $\Delta N_n / N_n$, температури $\Delta T_n / T_n$ і тиску $\Delta p / p$, які пов'язані між собою так званими «поляризаційними» співвідношеннями [13]. В ізотермічній атмосфері варіації густини в АГХ можна представити у вигляді [16]:

$$\frac{\Delta p}{\bar{p}} = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \frac{\Delta z_n}{H} + \frac{V_x U_x}{c_s^2}, \quad (1)$$

де \bar{p} — незбурене значення густини атмосфери, Δz_n — вертикальне зміщення елемента об'єму, H — висота однорідної атмосфери, γ — показник адиабати, U_x — горизонтальна фазова швид-

кість АГХ, V_x — горизонтальна швидкість частинок, c_s — швидкість звуку.

Нижче турбопаузи всі гази інтенсивно перемішуються, тому $\Delta p / \bar{p} = \Delta N_n / \bar{N}_n$, де N_n — концентрація нейтральних частинок. Для спрощення будемо розглядати характерні для цих висот АГХ з періодами $T > T_B$, де T_B — період Брента — Ваясяля, і малими у порівнянні з c_s горизонтальними фазовими швидкостями. В такому наближенні, а також додатково враховуючи зміну температури з висотою, з виразу (1) отримаємо

$$\frac{\Delta N_n}{\bar{N}_n} \approx \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} + \frac{dH}{dz} \right) \frac{\Delta z_n}{H}, \quad (2)$$

де $\frac{dH}{dz} = \frac{H}{T_n} \frac{dT_n}{dz} \approx -0.08$ для характерних значень $H \approx 6$ км, $T_n \approx 200$ К, $\frac{dT_n}{dz} \approx -3$ К/км на висотах

D-області іоносфери (верхня мезосфера).

Фізичний зміст формули (2) легко зрозуміти з таких міркувань. При поширенні АГХ-область адиабатичного стиснення атмосферного газу опускається під дією сили тяжіння вниз до того висотного рівня, де тиск всередині об'єму приблизно зрівнюється з фоновим атмосферним тиском. Проте при цьому щільність газу всередині об'єму залишається меншою, ніж фонові, і тому області стиснення спостерігаються на фіксованому висотному рівні як мінімуми концентрації $(\Delta N_n / N_n)_{\min}$ [5, 7]. Области розрідження, навпаки, спливають нагору, проте щільність всередині об'єму залишається більшою, ніж фонові. Такі області спостерігаються у вигляді максимумів концентрації $(\Delta N_n / N_n)_{\max}$. В результаті для АГХ наближено виконується $\Delta N_n / N_n \approx -\Delta T_n / T_n$, тобто області мінімумів концентрації відповідають максимумам температури і навпаки. Відхилення від протифазі коливань концентрації і температури при поширенні АГХ визначається вкладом другого доданку у правій частині виразу (1).

Рівноважні концентрації електронів періодично змінюються в областях мінімумів і максимумів концентрації нейтральних частинок. В областях $(\Delta N_n / N_n)_{\max}$ рекомбінаційні втрати електронів є більшими. До того ж в областях

$(\Delta N_n / N_n)_{\max}$ АГХ температура є мінімальною, що призводить до збільшення відносного вмісту іонів-кластерів, які швидко рекомбінують, внаслідок чого втрати електронів додатково збільшуються. Тому збіг максимумів концентрації з мінімумами температури в АГХ призводить до більш різкого зменшення електронної концентрації в цих областях. В областях $(\Delta N_n / N_n)_{\min}$, навпаки, швидкість рекомбінації електронів зменшується, також зменшується і швидкість утворення іонів-кластерів. Тому в областях $(\Delta N_n / N_n)_{\min}$ спостерігатимуться $(\Delta N_e / N_e)_{\max}$.

Таким чином, при поширенні АГХ на висотах D-області іоносфери, концентрації нейтральних частинок та електронів змінюються у протифазі. При цьому, флуктуації нейтрального середовища спричиняють більший по амплітуді відгук в електронній концентрації через різку залежність швидкості рекомбінації електронів від температури.

ФЛУКТУАЦІЇ АМПЛІТУД РАДІОСИГНАЛІВ ПРИ ЗМІНІ ВИСОТИ ВІДБИТТЯ

Для досліджень ми використали дані передавачів ДНЧ-радіохвиль на трьох середньо-широтних станціях: у Німеччині (DHO38, $f = 23.4$ кГц), Великобританії (GQD, $f = 22.1$ кГц) та Італії (ICV, $f = 20.74$ кГц) з пунктом прийому у Франції (A118). Ці дані представлено на сайті <https://sidstation.loudet.org/data>. Довжини обраних трас становлять 764 км (ICV — A118), 1163 км (DHO — A118), 1279 км (GQD — A118). На таких відносно коротких трасах (<1500 км) можна застосовувати наближення геометричної оптики [22].

Для наближених розрахунків амплітуду у пункті прийому розглянемо як інтерференцію приземної хвилі з амплітудою A_g та двох іоносферних хвиль з амплітудами A_1 і A_2 , які відбилися від іоносфери один і два рази відповідно [22]. Поширення ДНЧ-радіохвиль у хвилеводі Земля — іоносфера схематично показано на рис. 1. В такому наближенні квадрат амплітуди сигналу:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + A_g^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi_{12} + 2A_1A_g \cos \Delta\varphi_{1g} + 2A_2A_g \cos \Delta\varphi_{2g}. \quad (3)$$

Сумарна амплітуда залежить від амплітуд A_1 , A_2 , A_g та зсувів фаз, що набігають між різни-

ми хвилями внаслідок різної довжини шляху: $\Delta\varphi_{1g}$ і $\Delta\varphi_{2g}$ — зсуви фаз між одно- і дворазово відбитими від іоносфери хвилями та приземною хвилею, $\Delta\varphi_{12}$ — зсув фаз між першою і другою іоносферними хвилями.

З геометричних міркувань з урахуванням сферичності Землі неважко отримати вираз для довжини шляху n -кратно відбитої від іоносфери хвилі в залежності від висоти відбиття:

$$s_n = 2n[h^2 + 4R(h+R)\sin^2(\theta/(4n))]^{1/2},$$

де R — радіус Землі, h — ефективна висота відбиття, $\theta = d/R$, d — відстань між передатчиком та приймачем.

Для першої та другої іоносферних хвиль довжини шляху становлять відповідно

$$\begin{aligned} s_1 &= 2[h^2 + 4R(h+R)\sin^2(\theta/4)]^{1/2}, \\ s_2 &= 4[h^2 + 4R(h+R)\sin^2(\theta/8)]^{1/2}, \end{aligned} \quad (4)$$

а зсуви між різними хвилями дорівнюють

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{1g} &= (2\pi/\lambda)(s_1 - d), \\ \Delta\varphi_{2g} &= (2\pi/\lambda)(s_2 - d), \\ \Delta\varphi_{12} &= (2\pi/\lambda)(s_2 - s_1), \end{aligned}$$

де λ — довжина хвилі.

Оцінимо, як зміниться амплітуда прийнятого сигналу при зміні ефективної висоти відбиття на деяку малу величину Δh . З формули (3) отримаємо

$$A\Delta A \approx A_1A_2\Delta f_{12} + A_1A_g\Delta f_{1g} + A_2A_g\Delta f_{2g},$$

де

$$\begin{aligned} f_{12} &= \cos \Delta\varphi_{12}, \quad \Delta f_{12} = f'_{12}(h)\Delta h, \\ f_{1g} &= \cos \Delta\varphi_{1g}, \quad \Delta f_{1g} = f'_{1g}(h)\Delta h, \\ f_{2g} &= \cos \Delta\varphi_{2g}, \quad \Delta f_{2g} = f'_{2g}(h)\Delta h. \end{aligned}$$

При отриманні цієї формули ми знехтували величинами ΔA_1 і ΔA_2 , тобто змінами коефіцієнтів відбиття внаслідок поширення АГХ. При цьому ми припустили, що зміни частот зіткнень електронів з нейтральними частинками внаслідок флуктуацій нейтральної густини при поширенні АГХ (кілька відсотків) значно менше впливають на амплітуду прийнятого радіосигналу, ніж зміщення ефективної висоти відбиття на величину порядку сотень метрів.

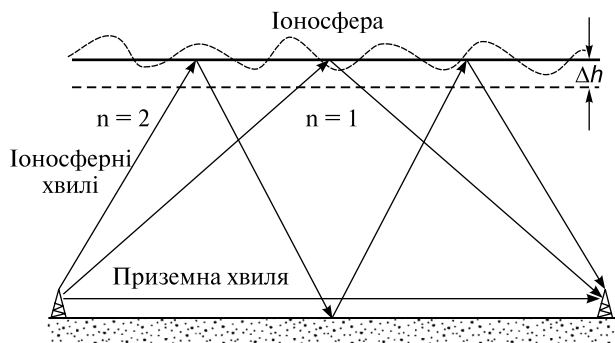


Рис. 1. Схема поширення ДНЧ-радіохвиль у хвилеводі Земля — іоносфера

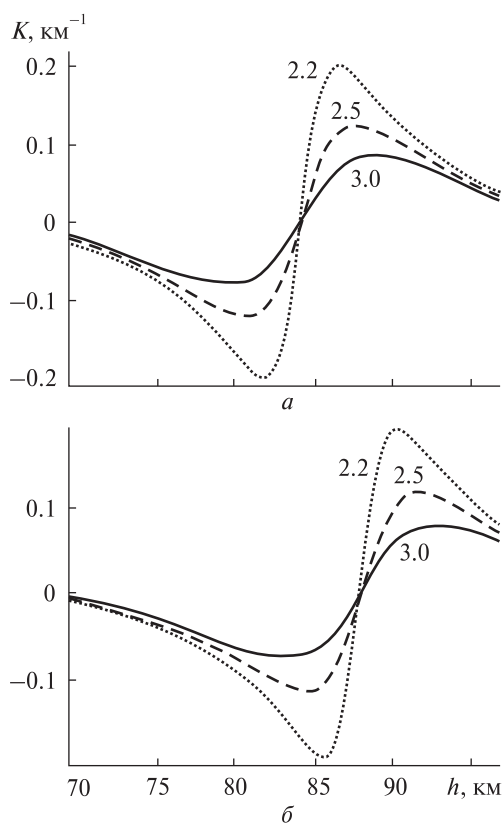


Рис. 2. Коефіцієнт K в залежності від ефективного висоти відбиття h при трьох значеннях параметра $\eta + 1/\eta = 2.2, 2.5, 3.0$ (числа біля кривих) для трас DHO — A118 (а) і GQD — A118 (б)

Доцільно розглядати відносні флуктуації амплітуд ДНЧ-радіохвиль $\Delta A / \bar{A}$, де \bar{A} — усереднене незбурене значення амплітуди, а ΔA — збурення. Такий розгляд дозволяє виключити ряд

факторів як технічного характеру, так і фізичної природи, без врахування яких аналіз абсолютних величин ΔA є неможливим. Наприклад, різні калібрування антени і приймача, зміну висотного рівня відбиття ДНЧ-хвиль від іоносфери протягом доби та інших можливих чинників, зокрема нерегулярного характеру, які не завжди можна врахувати з достатньою точністю. При отриманні \bar{A} використовувався метод ковзного середнього з інтервалом вікна усереднення 2 год. Такий вибір вікна дозволяє виділити характерні періоди середньомасштабних АГХ (5...60 хв).

Представимо амплітуду сигналу у вигляді $A = \bar{A} + \Delta A$. Тоді для малих відносних флуктуацій амплітуд ДНЧ-радіохвиль отримаємо

$$\frac{\Delta A}{\bar{A}} \approx \Delta h [A_1 A_2 f'_{12}(h) + A_1 A_g f'_{1g}(h) + A_2 A_g f'_{2g}(h)] / [A_1^2 + A_2^2 + A_g^2 + 2A_1 A_2 f_{12} + 2A_1 A_g f_{1g} + 2A_2 A_g f_{2g}] = K \Delta h. \quad (5)$$

Таким чином, у розглянутому наближенні $\Delta A / \bar{A} \propto \Delta h$, при цьому коефіцієнт пропорційності K залежить від довжини траси, частоти сигналу і співвідношення між амплітудами різних хвиль. Цей результат неважко узагальнити на випадок довільної кількості відбитих від іоносфери хвиль.

Вираз (5) справедливий, якщо висота відбиття зміщується на однакову величину Δh на всій протяжності траси, як це відбувається, наприклад, після рентгенівського спалаху [12]. Проте іоносферні збурення у переважній більшості випадків носять локальний характер, при цьому Δh змінюється вздовж траси випадковим чином. Наприклад, при поширенні АГХ флуктуації Δh залежатимуть від довжини хвилі, протяжності цугу, напрямку руху хвильового фронту відносно траси та ін.

Наведемо прості геометричні міркування, з яких зрозуміло, що за наявності значних флуктуацій Δh уздовж траси ймовірність потрапляння на приймач хвиль, відбитих від іоносфери більше одного разу, зменшується. Оскільки кут падіння дорівнює куту відбиття, то для того, щоб хвиля після другого відбиття від іоносфери потрапила на приймач, зміни Δh в обох точках від-

биття повинні бути узгодженими, що не виконується при випадкових флуктуаціях (див. рис. 1). Тому збільшення хвильової активності в іоносфері, що супроводжується значними локальними змінами Δh уздовж траси, призводить до зменшення вкладу другої іоносферної хвилі і хвиль вищих порядків у сумарну амплітуду сигналу. Під час кожного відбиття як від іоносфери, так і від земної поверхні радіохвиля втрачає значну частину енергії [1, 21], тому амплітуда другої хвилі зазвичай у декілька разів менша від амплітуди першої іоносферної хвилі.

З урахуванням вищесказаного для локалізації збурення вздовж траси припустимо, що основний внесок у сумарну амплітуду дають збурення Δh , які виникають у точці відбиття першої іоносферної хвилі, тобто посередині між приймачем і передавачем. У такому наближенні

$$\frac{\Delta A}{A} \approx \frac{A_1 A_g f'_{1g}(z)}{A_1^2 + A_g^2 + 2A_1 A_g f'_{1g}} \Delta h =$$

$$= \frac{f'_{1g}}{\eta + 1/\eta + 2f'_{1g}} \Delta h = K(f'_{1g}, \eta) \Delta h, \quad (6)$$

де

$$\eta = A_1 / A_g, \quad K = \frac{f'_{1g}}{\eta + 1/\eta + 2f'_{1g}}.$$

Для подальших чисельних оцінок використаємо результати роботи [22], згідно з якими для радіосигналу з частотою 20 кГц на трасах довжиною 700...1000 км $A_1 \approx A_g$, а на довших трасах $A_1 > A_g$. За допомогою графіка на рис. 3, б у роботі [22] оцінимо відношення $\eta = A_1 / A_g$ для розглянутих трас. Для DHO — A118 ($d = 1163$ км) і GQD — A118 ($d = 1279$ км) отримаємо $\eta \approx 2.5$, для ICV — A118 ($d = 764$ км) — $\eta \approx 2$. Тобто, величина $\eta + 1/\eta$, яка фігурує у знаменнику виразу для $K(f'_{1g}, \eta)$, змінюється на розглянутих трасах у відносно невеликих межах 2.5...2.9.

Залежності K від ефективної висоти відбиття для двох з розглянутих трас наведено на рис. 2 при різних значеннях величини $\eta + 1/\eta$. Фактично на цих графіках показано залежності флуктуацій амплітуд $\Delta A / A$ від h , якщо $\Delta h = 1$ км. Видно, що на обох трасах флуктуації амплітуд сигналу при зміні висоти відбиття на Δh в денних умовах ($h = 70...74$ км) є значно меншими, ніж вночі

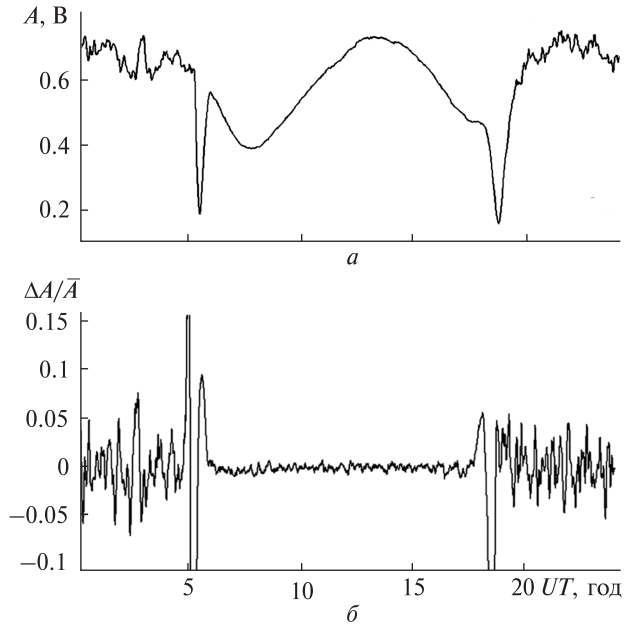


Рис. 3. Хід амплітуди ДНЧ-сигналу на трасі GQD — A118 протягом доби 22 вересня 2017 р.: а — амплітуда A , б — відносні флуктуації $\Delta A / A$ (дані сайту: <https://sidstation.loudet.org/data>)

($h > 85$ км). Також відмітимо, що денні флуктуації амплітуд є малочутливими до відношення A_1 / A_g , в той час як нічний відгук істотно залежить від цього відношення. При $f'_{1g}(h) = -1$ досягаються мінімуми вислідної амплітуди, що спостерігається вранці та ввечері [22].

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ФЛУКТУАЦІЙ АМПЛІТУД

З експериментальних даних випливає, що вдень флуктуації амплітуд радіосигналів майже на порядок менші, ніж вночі (рис. 3). Співвідношення між $(\Delta A / A)_{day}$ і $(\Delta A / A)_{night}$ визначається не тільки фізичними причинами, а більшою мірою — величиною K та її залежністю від ефективної висоти відбиття ДНЧ-сигналів. Як це видно з рис. 2, на розглянутих трасах нічний відгук в $\Delta A / A$ при $h = 85...90$ км виявляється значно більшим, ніж денний при $h = 70...75$ км саме внаслідок більших значень K . Відмітимо також, що вночі інтерференційна картина є нестабільною, і будь-яка незначна зміна Δh чи відношення A_s / A_g спричинює відчутні зміни амплітуди прийнятого сигналу.

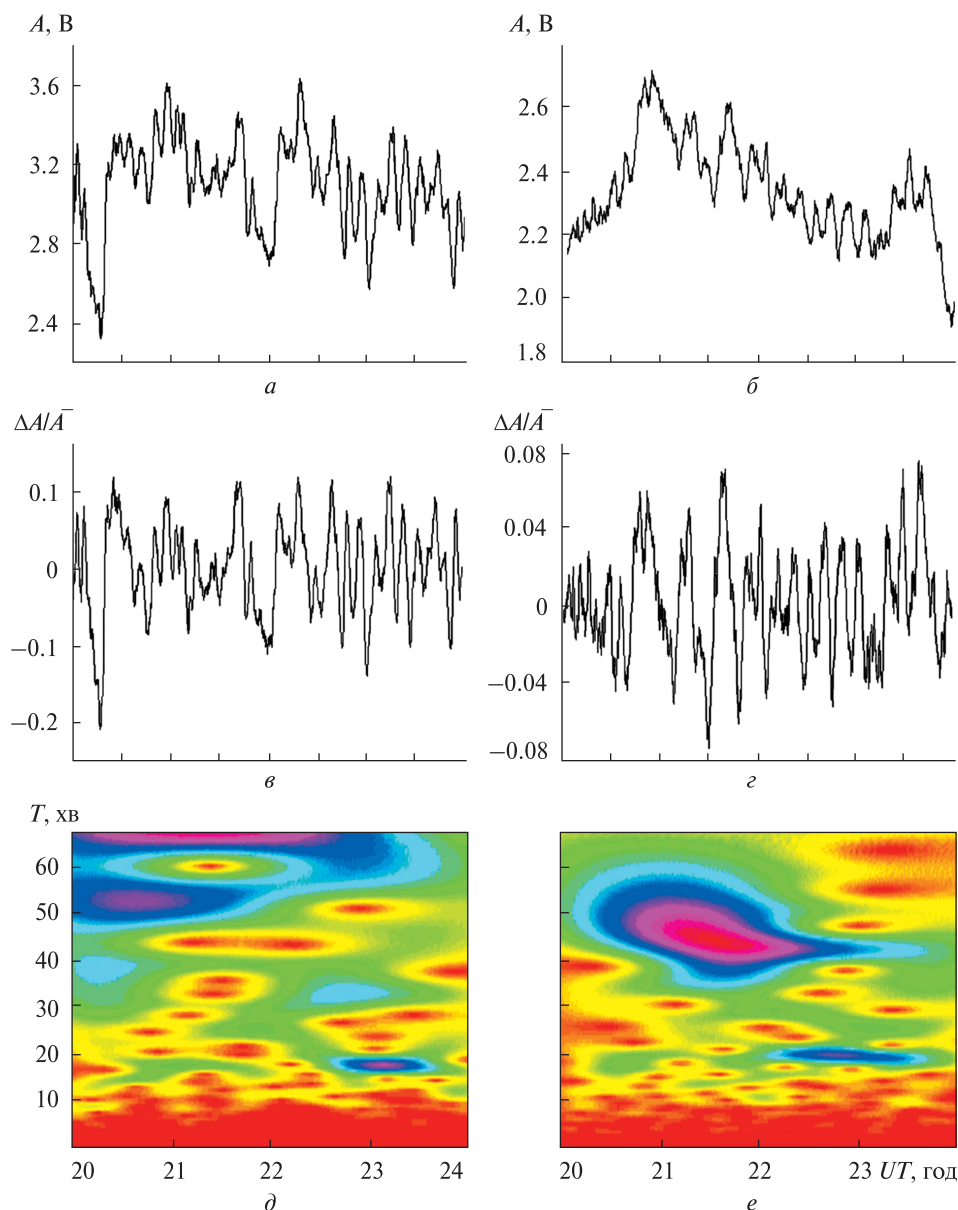


Рис. 4. Флуктуації амплітуд ДНЧ-радіохвиль у вечірні години на трасах ICV — A118 (а, в, д) і DHO — A118 (б, г, е): а, б — амплітуда A , в, г — відносні флуктуації $\Delta A / \bar{A}$, д, е — амплітудні вейвлет-спектри (дані сайту: <https://sidstation.loudet.org/data>)

Ми виконали аналіз флуктуацій $\Delta A / \bar{A}$ на різних трасах у вечірні та нічні години. На рис. 4 показано результати обробки даних, отриманих увечері 15 вересня 2017 р. для трас ICV — A118 (рис. 4, а, в, д) та DHO — A118 (рис. 4, б, г, е): а, б — значення амплітуди (у вольтгах), в, г — флуктуації $\Delta A / \bar{A}$, д, е — амплітудні вейвлет-спектри.

Вейвлет-аналіз нічних значень амплітуд ДНЧ-сигналів на різних трасах показує наявність систематичних періодичних флуктуацій у діапазоні від 4...5 хв до 1 год, що відповідає характерним періодам АГХ в атмосфері (рис. 4). При цьому для періодів, менших за 5 хв (граничний для АГХ період Брента — Вайсяля), хвильова активність різ-

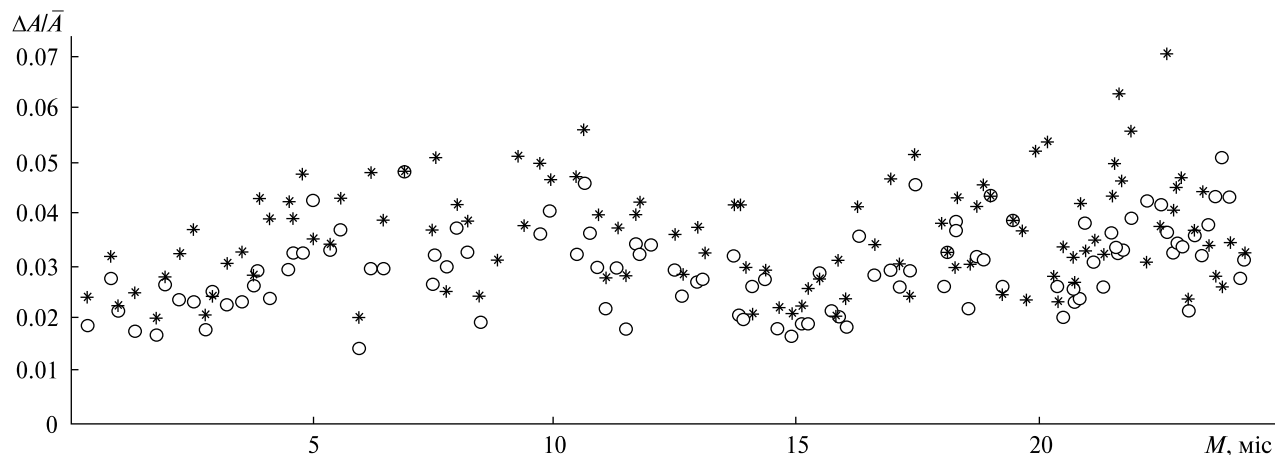


Рис. 5. Середні відносні флуктуації амплітуд $\Delta A / \bar{A}$ у вечірні години ($UT = 20 \dots 24^h$) на трасах DHO — A118 (зірочки) і GQD — A118 (світлі кружечки) у 2013—2014 рр. По горизонтальній осі вказано порядковий номер M місяця, починаючи з січня 2013 р.

ко знижується (див. спектри на рис. 4, *д*, *е*). Це опосередковано підтверджує АГХ-природу спостережуваних флуктуацій амплітуд радіосигналів. Особливий інтерес представляють коливання в діапазоні 4...5 хв, що ймовірно відповідають модам, захопленим у мезосферний хвилевід. У вечірні години часто спостерігаються флуктуації з великими періодами 40...50 хв, які можуть бути пов'язані з проходженням вечірнього термінатора. Результати аналізу даних в цілому показують, що на висотах D-області іоносфери часто спостерігаються флуктуації амплітуд ДНЧ-радіохвиль у вигляді суперпозиції різних часових масштабів, які характерні для АГХ.

Оцінки флуктуацій амплітуд ДНЧ-радіосигналів на трасах DHO — A118 та GQD — A118 було узагальнено за різні сезони впродовж 2013—2014 рр. Всього розглянуто близько 100 діб спостережень. Усереднені за вечірні години ($UT = 20 \dots 24^h$) флуктуації амплітуд показано на рис. 5. Відносні флуктуації на трасі DHO — A118 змінюються у межах 2...6 % з середнім значенням 3.5 %. Досить чітко виявляється мінімальний рівень коливань 2 %, що, ймовірно, відображає мінімальний рівень амплітуд АГХ у мезосфері. На трасі GQD — A118 середній рівень коливань амплітуд ДНЧ-радіохвиль дещо нижчий (≈ 3 %), а мінімальний — менше, ніж 2 %.

Як випливає з рис. 5, флуктуації амплітуд з періодами АГХ спостерігаються у різні сезони з тенденцією до збільшення амплітуд у літні місяці на обох трасах. На перший погляд, це протирічить даним інших спостережень, згідно з якими, навпаки, АГХ зимою спостерігаються значно частіше, ніж влітку, і мають більші амплітуди [3]. Понад 40 років тому було розроблено так звану «концепцію метеорологічного контролю» D-області іоносфери [3]. Згідно з цією концепцією АГХ від тропосферних та приземних джерел мають вирішальний вплив на стан нижньої іоносфери. Щоб досягти іоносферних висот, ці АГХ повинні подолати систему сильних стратосферних вітрів, які сприяють поширенню АГХ взимку, а влітку — навпаки, блокують. В результаті взимку більша частина АГХ, що поширюються від тропосферних та наземних джерел, досягають D-області іоносфери, а влітку більшість таких АГХ зазнає дисипації у стратосфері.

Дані рис. 5 не протирічать згаданим вище концепції. Насправді спостережуване переважання літніх значень $\Delta A / \bar{A}$ не означає дійсно більші амплітуди АГХ, а обумовлене іншими причинами. По-перше, влітку ефективний рівень h є систематично вищим, ніж взимку. За рахунок цього значення K і, відповідно, спостережувані значення $\Delta A / \bar{A}$ будуть теж більшими (див. рис. 2).

Друга причина може бути пов'язана з різним вкладом іонів-кластерів на висотах відбиття радіохвиль взимку та влітку. Оскільки швидкість рекомбінації кластерів є на порядок більшою, ніж для звичайних молекулярних іонів, то збільшення їхнього відносного вкладу супроводжується більшими втратами електронів в областях максимумів нейтральної густини влітку, ніж взимку.

На основі отриманих результатів оцінимо зміни ефективної висоти відбиття радіохвиль внаслідок поширення АГХ. Як впливає з рис. 5, спостережувані значення $\Delta A / \bar{A}$ на трасі DHO — A118 дещо перевищують флуктуації на трасі GQD — A118. Для траси GQD — A118 $\eta + 1/\eta \approx 2.9$, тоді згідно з рис. 2 спостережувані флуктуації $\Delta A / \bar{A} = 0.02...0.04$ відповідають зміщенню висоти відбиття ДНЧ-радіохвиль на $\Delta h = 0.3...0.4$ км. Для траси DHO — A118 $\eta + 1/\eta \approx 2.5$ і $\Delta A / \bar{A} = 0.025...0.05$, що відповідає $\Delta h = 0.25...0.5$ км. Отримані результати вказують, що значення середнього рівня коливань Δh є близькими на різних європейських трасах.

ПАРАМЕТРИ ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ ЗА ВИМІРАМИ ФЛУКТУАЦІЙ АМПЛІТУД РАДІОХВИЛЬ

Проведемо модельні розрахунки флуктуацій амплітуд електронної концентрації за даними вимірювань амплітуд ДНЧ-радіохвиль. На висотах нижньої іоносфери (50...90 км) висотний профіль електронної концентрації можна подати у вигляді такої теоретичної залежності [20]:

$$N_e(z) = 1.43 \cdot 10^{13} \exp(-0.15h) \exp[(\beta - 0.15)(z - h)]. \quad (7)$$

Тут h , км — ефективний висотний рівень відбиття ДНЧ-радіохвиль і параметр β , км^{-1} визначаються з емпіричних формул [20]:

$$\begin{aligned} h &= 74.37 - 8.087 \cos \chi + 5.779 \cos \Theta - \\ &- 1.213 \cos \alpha - 0.0044 X_4 - 6.035 X_5, \\ \beta &= 0.5349 - 0.1658 \cos \chi - \\ &- 0.08584 \cos \Theta + 0.1296 X_5, \end{aligned} \quad (8)$$

де χ — зенітний кут Сонця, Θ — географічна широта, $\alpha = 2\pi(m - 0.5)/12$, m — порядковий

номер місяця року, X_4 — кількість сонячних плям, $X_5 = 0$ чи 1 для спокійного чи збуреного рівня геомагнітної активності відповідно.

Відбиття ДНЧ-радіосигналів від іоносфери безпосередньо залежить від градієнта висотного розподілу електронів. Як впливає з формули (7), флуктуації електронної концентрації на фіксованому висотному рівні пов'язані з Δh простим співвідношенням:

$$\frac{\Delta N_e}{N_e} = -\beta \Delta h. \quad (9)$$

Згідно з (8) вночі параметр $\beta \approx 0.5$, а вдень $\beta \approx 0.3$. Тому зміна ефективної висоти відбиття на величину Δh вночі відповідає майже удвічі більшим відносним флуктуаціям електронної концентрації, ніж та ж зміна Δh удень.

З урахуванням (6) та (9) отримаємо

$$\frac{\Delta A}{\bar{A}} = -\frac{K}{\beta} \frac{\Delta N_e}{N_e}. \quad (10)$$

Звідси впливає досить очікуваний результат, що спостережувані флуктуації амплітуд радіохвиль пропорційні варіаціям електронної концентрації на висоті відбиття. При цьому коефіцієнт пропорційності залежить від висотного градієнта електронної концентрації, який задається параметром β , та від величини K , яка визначає інтерференцію першої іоносферної та приземної хвиль. З виразу (10) видно, що при однакових амплітудах флуктуацій $\Delta N_e / N_e$ в іоносфері вдень і вночі буде спостерігатися різний відгук у $\Delta A / \bar{A}$.

Використовуючи вирази (6), (9), (10), можна розрахувати флуктуації електронної концентрації та вертикального зміщення висоти відбиття за вимірами амплітуд радіохвиль. Періодичні зміни цих параметрів на трасі GQD — A118 впродовж 4 серпня 2017 р. показано на рис. 6. Для цієї дати вночі $\chi \approx 114^\circ$, вдень $\chi \approx 34^\circ$. Тоді згідно з (8) вночі $h = 82.6$ км, $\beta = 0.54 \text{ км}^{-1}$, а вдень $h = 72.6$ км, $\beta = 0.34 \text{ км}^{-1}$. Для цих значень параметрів на рис. 6 показано значення $\Delta A / \bar{A}$, Δh і $\Delta N_e / N_e$ в залежності від UT . В середньому вдень: $\Delta A / \bar{A} = 0.4...0.5 \%$, $\Delta h = 0.2...0.3$ км, $\Delta N_e / N_e = 10 \%$, вночі: $\Delta A / \bar{A} = 2...3 \%$, $\Delta h = 0.3...0.4$ км, $\Delta N_e / N_e = 20 \%$.

У таблиці узагальнено середні значення флуктуацій різних параметрів на трьох трасах упро-

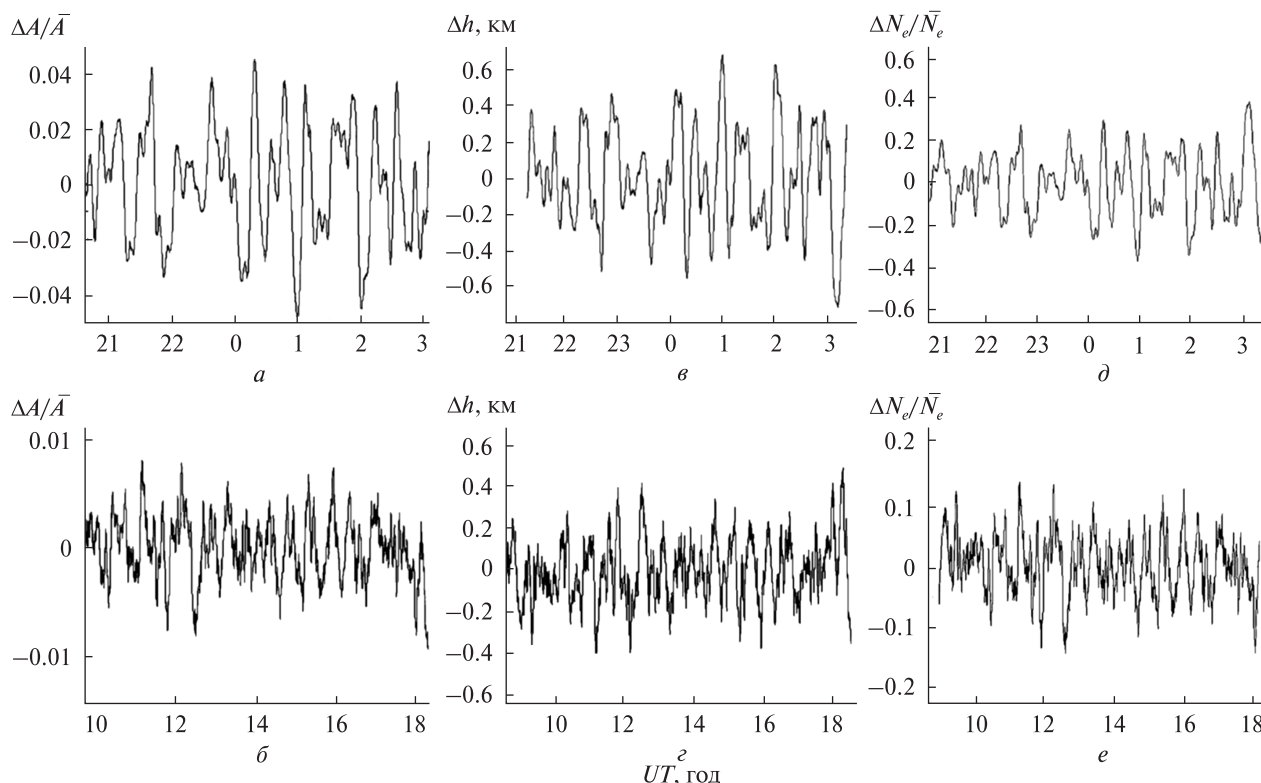


Рис. 6. Флуктуації амплітуд сигналів $\Delta A / \bar{A}$ (а, б), зміщення ефективного рівня відбиття Δh (в, з) та концентрація електронів $\Delta N_e / N_e$ (д, е) на трасі GQD — A118 впродовж ночі 4/5 серпня 2017 р. (а, в, д) та дня 4 серпня 2017 р. (б, з, е)

Середні флуктуації амплітуд сигналів та іоносферних параметрів на різних трасах 04—06.08.2017 р.

Траса	Ніч			День		
	$\Delta A / \bar{A}$, %	Δh , км	$\Delta N_e / N_e$, %	$\Delta A / \bar{A}$, %	Δh , км	$\Delta N_e / N_e$, %
GQD — A118	3...4	0.3...0.4	20...25	0.4...0.5	0.2...0.3	7...10
ICV — A118	5...7	0.2...0.3	12...15	1...2	0.2...0.4	5...9
DHO — A118	2...4	0.4...0.5	15...25	0.5...1	0.15...0.3	5...7

довж 04—06.08.2017 р. Як видно, на різних трасах нічні флуктуації $(\Delta A / \bar{A})_{night}$ у кілька разів перевищують денні $(\Delta A / \bar{A})_{day}$. Середні флуктуації $\Delta N_e / N_e$ за однакових умов вдень або вночі мають близькі значення, що є цілком очікуваним результатом на відносно коротких трасах. Значення $\Delta N_e / N_e$ в нічних умовах в 2—3 рази перевищують денні значення. Проте значення Δh вивляються близькими не тільки на різних трасах, а й у різних умовах день/ніч. Періодичні флуктуації висоти відбиття на різних

трасах і за різних умов лежать в інтервалі $\Delta h \approx 0.2...0.4$ км. Відмітимо, що при поширенні АГХ в атмосфері характерне значення вертикального зміщення елементарного об'єму нейтрального газу Δz_n також дорівнює кільком сотням метрів. Тобто, вертикальне зміщення Δz_n і зумовлена ним зміна ефективної висоти відбиття Δh є близькими по порядку величини.

Наголосимо, що ми розглянули середній рівень коливань амплітуд ДНЧ-радіохвиль, який відображає реальний фоновий рівень АГХ у

верхній мезосфері. Під фоновим рівнем АГХ будемо розуміти середній рівень амплітуд відносних флуктуацій щільності нейтрального газу (або вертикального зміщення об'єму). Окремі хвильові цуги від конкретних потужних джерел можуть проявлятися як перевищення фонового рівня в декілька разів чи навіть на порядок.

ФОНОВИЙ РІВЕНЬ ФЛУКТУАЦІЙ НЕЙТРАЛЬНОЇ АТМОСФЕРИ

За відсутності збурень ДНЧ-хвиля зазнає відбиття на ефективному висотному рівні h , який визначається певною рівноважною концентрацією електронів і нейтральних частинок. При поширенні АГХ ефективний рівень відбиття радіосигналів періодично змінюється, при цьому встигає встановитися рівноважна концентрація електронів, яка відповідає збуреним умовам. В областях максимуму нейтральної концентрації (і мінімуму температури) приблизно встановлюється така рівноважна концентрація електронів, що відповідає висотному рівню $h - \Delta h$, з якого піднявся об'єм газу, при цьому адіабатично розширившись. Тобто в областях, де значення $\Delta N_n / N_n$ максимальні і значення $\Delta T_n / T_n$ мінімальні, умови відбиття радіохвиль фактично відповідають рівню $h - \Delta h$. Аналогічно в областях мінімальних $\Delta N_n / N_n$ і максимальних $\Delta T_n / T_n$ умови відбиття ДНЧ-хвиль відповідають висотному рівню $h + \Delta h$, з якого об'єм газу опустився під дією сили тяжіння, адіабатично стиснувшись. При такому спрощеному розгляді $\Delta h \approx \Delta z_n$. Тобто, періодичні зміни ефективної висоти відбиття ДНЧ-радіосигналів приблизно відповідають реальним зміщенням елементарного об'єму нейтрального газу при поширенні АГХ в атмосфері.

У припущенні $\Delta h \approx \Delta z_n$ можна легко оцінити амплітуду фонового рівня АГХ у флуктуаціях густини і температури. Згідно із спостереженнями флуктуації вертикального зміщення висоти відбиття дорівнюють $\Delta h = 0.2...0.4$ км. Сухадіабатичний градієнт температури у земній атмосфері дорівнює $dT/dz \approx 9.8$ К/км. Тому при адіабатичному розширенні (стисненні) вертикальне зміщення об'єму газу $\Delta z_n = 0.2...0.4$ км відповідає зміні температури на $2...4$ К.

Тоді $\Delta T_n / T_n \approx (2-4)/200 = 1...2$ %. Для флуктуацій концентрації без врахування висотного градієнта температури з виразу (2) отримаємо $\Delta N_n / N_n \approx (\gamma - 1)\Delta z_n / (\gamma H) \approx 0.3(0.2 - 0.4) / 6 = 1...2$ %, що збігається з оцінками для $\Delta T_n / T_n$.

Для уточнення оцінок можна врахувати різні значення H на висотах денного і нічного рівнів відбиття ДНЧ-радіохвиль, а також зменшення з висотою фогової температури у мезосфері. На висоті порядку 70 км $H \approx 7$ км, на висоті 85 км $H \approx 6$ км, при цьому $dH/dz \approx -0.8$ для висот верхньої мезосфери. Тоді згідно з (2) фоновий рівень коливань нейтральної концентрації вдень складатиме $\Delta N_n / N_n \approx 0.21\Delta z_n / 7 = 0.6...1.2$ %, а вночі $\Delta N_n / N_n \approx 0.21\Delta z_n / 6 = 0.7...1.4$ %.

Якщо трактувати флуктуації Δh як відображення вертикальних зміщень об'єму нейтрального газу при поширенні АГХ, тоді близькі значення Δh на різних трасах є зрозумілими. Важче пояснити, чому значення Δh є близькими вдень і вночі, зважаючи на різні висотні рівні відбиття радіосигналів. За сучасними уявленнями, більшість атмосферних АГХ, що потрапляють на іоносферні висоти від тропосферних та приземних джерел, зазнають дисипації в атмосфері нижче 100 км. Амплітуди таких АГХ при поширенні знизу вгору збільшуються пропорційно $\exp(z/(2H))$ внаслідок закону збереження енергії [13]. На висотах мезосфери $H \approx 6...7$ км і ефективні висотні рівні відбиття ДНЧ-хвиль від іоносфери вдень ($h = 70...75$ км) і вночі ($h = 85...90$ км) відрізняються приблизно на $2H$. Тому амплітуди АГХ, які поширюються від джерел знизу і спостерігаються вночі на висоті 85 км, повинні бути в середньому в e разів більшими, ніж на денному рівні відбиття (≈ 70 км). В той же час, отриманий нами результат щодо близьких значень Δh вдень і вночі вказує на приблизно однакові амплітуди АГХ. Згідно з даними спостережень на супутнику DE2 фоновий рівень коливань АГХ на висотах 250...400 км у середніх широтах вдень становив 0.5 %, а вночі — не перевищував 1 % [4], що також є досить близьким до наших оцінок для мезосфери. Схоже, що фоновий рівень флуктуацій концентрації нейтральних частинок на різних висотах в атмосфері є приблизно однаковим.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано можливі фізичні механізми впливу акустико-гравітаційних хвиль на характеристики ДНЧ-радіосигналів. Отримано теоретичні співвідношення, які дозволяють за флуктуаціями амплітуд ДНЧ-радіосигналів наближено розрахувати флуктуації електронної концентрації, вертикальне зміщення висоти відбиття, а також оцінити амплітуди флуктуацій концентрації нейтралів при поширенні АГХ.

Досліджено флуктуації амплітуд ДНЧ-радіохвиль на кількох європейських трасах в різні сезони впродовж 2013—2014 рр. Проаналізовано особливості флуктуацій амплітуд в денних та нічних умовах. Вночі значення $\Delta A / A$ у 5—10 разів (в залежності від траси) перевищують відповідні денні значення. За даними вимірювань $\Delta A / A$ обчислено відносні флуктуації електронної концентрації $\Delta N_e / N_e$ на висотному рівні відбиття радіохвиль. В середньому $\Delta N_e / N_e \approx 20\%$ вночі на висоті 85 км і $\Delta N_e / N_e \approx 5\ldots 10\%$ вдень на висоті 70 км.

Встановлено, що значення періодичних змін ефективного рівня відбиття радіохвиль внаслідок поширення АГХ в іоносфері в денних і нічних умовах, а також на різних трасах близькі. На основі цього висловлено припущення, що фоновий рівень АГХ в мезосфері вдень на висоті 70 км і вночі на висоті 85 км є приблизно однаковим. Цей результат є дещо несподіваним з точки зору теоретичних уявлень щодо експоненційного збільшення амплітуд АГХ при їхньому поширенні знизу вгору і потребує пояснення.

Роботу виконано за часткової підтримки Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безродный В. Г., Блюх П. Б., Шубова Р. С., Ямпольский Ю. М. Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля — ионосфера. — М.: Наука, 1984. — 144 с.
2. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 528 с.
3. Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. — Л: Гидрометеиздат, 1987. — 272 с.
4. Федоренко А. К., Крючков Е. И. Распределение средне-масштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. — 2011. — **51**, № 1. — С. 527—539.
5. Федоренко А. К., Крючков Е. И. Наблюдаемые особенности акустико-гравитационных волн в гетеросфере // Геомагнетизм и аэрономия. — 2014. — **54**, № 1. — С. 116—123.
6. Berry L. A. Wave Hop Theory of Long Distance Propagation of Low-Frequency Radio Waves // Radio Sci. J. Res. — 1964. — **68D**, N 12. — P. 1275—1284.
7. Dudis J. J., Reber C. A. Composition effects in thermospheric gravity waves // Geophys. Res. Lett. — 1976. — **3**, N 12. — P. 727—730.
8. 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.
9. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Klymenko Yu. O., Yampolski Yu. M. Peculiarities of acoustic-gravity waves in inhomogeneous flows of the polar thermosphere // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2018. — **178**. — P. 17—23. — doi.org/10.1016/j.jastp.2018.05.009.
10. Ferguson J. A. Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications. — San Diego, CA, Space and Naval Warfare Systems Center (Version 2.0), 1998.
11. Ferguson J. A., Snyder F. P. Approximate VLF/LF mode conversion model, Technical Document, 400. — Naval Ocean Systems Center, San Diego, California, USA, 1980.
12. Grubor D., Sulic D., Zigman V. Influence of solar X-ray flares on the earth ionosphere wave guide // Serb. Astron. — 2005. — **171**. — P. 29—35.
13. Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. — 1960. — **38**. — P. 1441—1481.
14. Kolarski A., Grubor D. Comparative Analysis of VLF Signal Variation along Trajectory Induced by X-ray Solar Flares // J. Astrophys. Astr. — 2015. — **36**, N 4. — P. 565—579.
15. Kuang L. K., Liu Zh., Füllekrug M. Lower Ionosphere Effects on Narrowband Very Low Frequency Transmission Propagation: Fast Variabilities and Frequency Dependence // Radio Sci. — 2018. — **53**, N 5. — P. 611—623. — https://doi.org/10.1002/2017RS006456.
16. Makhlof U. R., Dewan E. A., Isler J., Tuan T. F. On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations // J. Geophys. Res. — 1990. — **95**. — P. 4103—4111.
17. Nina A., Cadež V. M. Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by VLF radio waves // Geophys. Res. Lett. — 2013. — **40**, N 18. — P. 4803—4807. — doi:10.1002/grl.50931.

18. Rozhnoi A., Hayakawa M., Solovieva M., Hobara Y., Fedun V. Ionospheric effects of the Mt. Kirishima volcanic eruption as seen from subionospheric VLF observations // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* — 2014. — **107**. — P. 54—59. — doi.org/10.1016/j.jastp.2013.10.014.
19. Simkhada D. B., Snively J. B., Taylor, M. J., Franke S. J. Analysis and modeling of ducted and evanescent gravity waves observed in the Hawaiian airglow // *Ann. Geophys.* — 2009. — **27**. — P. 3213—3224.
20. Thomson N. R. Experimental daytime VLF ionospheric parameters // *Atmos. Sol.-Terr. Phys.* — 1993. — **55**, N 2. — P. 173—184.
21. Wait J. R., Spies K. P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves // *Nat. Bureau of Standards, Technical Note.* — 1964. — N 300.
22. Yoshida Y., Yamauchi T., Horie T., Hayakawa M. On the generation mechanism of terminator times in subionospheric VLF/ELF propagation and its possible application to seismogenic effects // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* — 2008. — **8**. — P. 129—134.

Стаття надійшла до редакції 26.12.2018

REFERENCES

1. Bezrodny V. G., Bliokh P. B., Shubova R. S., Yampolskiy Yu. M. Fluctuations of superlong radio waves in the Earth-Ionosphere waveguide. 144 p. (Nauka, M., 1984) [in Russian].
2. Brunelli B. E., Namgaladze A. A. Physics of ionosphere. 528 p. (Nauka, M., 1988) [in Russian].
3. Danilov A. D., Kazimirovskiy E. S., Vergasova G. V., Khachikyan G. Y. Meteorological effects in ionosphere. 272 p. (St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1987) [in Russian].
4. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I. Distribution of medium-scale acoustic gravity waves in polar regions according to satellite measurement data. *Geomagn. Aeron.*, **51** (4), 520—533 (2011) [Engl. Transl.].
5. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I. Observed features of acoustic gravity waves in the heterosphere. *Geomagn. Aeron.*, **54** (N 1), 109—116 (2014) [Engl. Transl.].
6. Berry L. A. Wave Hop Theory of Long Distance Propagation of Low-Frequency Radio Waves. *Radio Science Journal of Research.*, **68D** (N12), 1275—1284 (1964).
7. Dudis J. J., Reber C. A. Composition effects in thermospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.*, **3** (N 12), 727—730 (1976).
8. Fedorenko A. K., Bespalova A. V., Cheremnykh O. K., Kryuchkov E. I. A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere. *Ann. Geophys.*, **33**, 101—108 (2015). doi:10.5194/angeo-33-101-2015.
9. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Klymenko Yu. O., Yampolski Yu. M. Peculiarities of acoustic-gravity waves in inhomogeneous flows of the polar thermosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **178**, 17—23 (2018). doi.org/10.1016/j.jastp.2018.05.009.
10. Ferguson J. A. Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications. Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA (Version 2.0) (1998).
11. Ferguson J. A., Snyder F. P. Approximate VLF/LF mode conversion model. *Technical Document*, 400. Naval Ocean Systems Center, San Diego, California, USA (1980).
12. Grubor D., Sulic D., Zigman V. Influence of solar X-ray flares on the earth ionosphere wave guide. *Serb. Astron.*, **171**, 29—35 (2005).
13. Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, **38**, 1441—1481 (1960).
14. Kolarski A., Grubor D. Comparative Analysis of VLF Signal Variation along Trajectory Induced by X-ray Solar Flares. *J. Astrophys. Astr.*, **36** (4), 565—579 (2015).
15. Kuang L. K., Liu Zh., Füllekrug M. Lower Ionosphere Effects on Narrowband Very Low Frequency Transmission Propagation: Fast Variabilities and Frequency Dependence. *Radio Sci.*, **53** (5), 611—623 (2018). https://doi.org/10.1002/2017RS006456.
16. Makhlof U. R., Dewan E. A., Isler J., Tuan T. F. On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations. *J. Geophys. Res.*, **95**, 4103—4111 (1990).
17. Nina A., Cadež V. M. Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by VLF radio waves. *Geophys. Res. Lett.*, Issue 18(40), 4803—4807 (2013). doi:10.1002/grl.50931.
18. Rozhnoi A., Hayakawa M., Solovieva M., Hobara Y., Fedun V. Ionospheric effects of the Mt. Kirishima volcanic eruption as seen from subionospheric VLF observations. *J. of Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, **107**, 54—59 (2014). doi.org/10.1016/j.jastp.2013.10.014.
19. Simkhada D. B., Snively J. B., Taylor, M. J., Franke S. J. Analysis and modeling of ducted and evanescent gravity waves observed in the Hawaiian airglow. *Ann. Geophys.*, **27**, 3213—3224 (2009).
20. Thomson N. R. Experimental daytime VLF ionospheric parameters. *Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **55** (2), 173—184 (1993).
21. Wait J. R., Spies K. P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. *National Bureau of Standards, Technical Note*. N 300 (1964).
22. Yoshida Y., Yamauchi T., Horie T., Hayakawa M. On the generation mechanism of terminator times in subionospheric VLF/ELF propagation and its possible application to seismogenic effects. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **8**, 129—134 (2008).

Received 26.12.2018

А. К. Федоренко, Е. И. Крючков,
О. К. Черемных, И. Т. Жук, А. Д. Войцеховская

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

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СРЕДНЕШИРОТНОЙ МЕЗОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СЕТИ ОНЧ-РАДИОСТАНЦИЙ

Широкая мировая сеть передатчиков и приемников радиоволн очень низких частот (ОНЧ) позволяет систематически исследовать состояние нижней ионосферы в глобальном масштабе. Однако определение характеристик ионосферной плазмы и нейтральной атмосферы по данным измерений амплитуд и фаз ОНЧ радиосигналов сталкивается со значительными трудностями. Их причиной есть сложный характер взаимодействия радиоволн со средой при их отражении от ионосферы, а также сложность химических процессов, протекающих при участии заряженных и нейтральных частиц в нижней ионосфере. В данной работе в рамках представлений геометрической оптики исследована возможность определения свойств акустико-гравитационных волн по данным измерений амплитуд радиосигналов на относительно коротких трассах (протяженностью менее 1500 км). Проанализированы возможные физические механизмы влияния распространения акустико-гравитационных волн на ионосферных высотах на амплитуды ОНЧ-радиосигналов. Получены теоретические соотношения, позволяющие рассчитать флуктуации электронной концентрации, вертикальное смещение высоты отражения радиосигналов и оценить амплитуды флуктуаций нейтральной концентрации вследствие распространения акустико-гравитационных волн. Исследованы сезонные и суточные флуктуации амплитуд ОНЧ-радиоволн на нескольких европейских трассах в течение 2013—2014 гг., для чего были использованы данные передатчиков на станциях в Германии (DHO38), Великобритании (GQD) и Италии (ICV) с пунктом приема во Франции (A118). Проанализированы особенности флуктуаций амплитуд радиосигналов в дневных и ночных условиях. По измерениям амплитуд ОНЧ-радиосигналов рассчитан приближенный фоновый уровень акустико-гравитационных волн на высотах отражения, который составляет 200...400 м для флуктуаций вертикального смещения объема и 1...2 % для флуктуаций относительной концентрации нейтральных частиц. Показано, что фоновые уровни акустико-гравитационных волн в мезосфере средних широт днем на высотах 70 км и ночью на высотах 90 км близки по величине.

Ключевые слова: акустико-гравитационная волна, ионосферное возмущение, очень низкочастотная радиоволна.

А. К. Fedorenko, E. I. Kryuchkov,
O. K. Cheremnykh, I. T. Zhuk, A. D. Voitsekhovska

Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraina

STUDIES OF WAVE DISTURBANCES IN THE MID-LATITUDE MESOSPHERE ON VLF RADIO NETWORK DATA

A wide global network of very low-frequency radio waves (VLF) transmitters and receivers provides the data for study the state of the lower ionosphere on a global scale systematically. However, the determination of the characteristics of the ionospheric plasma and the neutral atmosphere from measurements of amplitudes and phases of the VLF radio signals encounters considerable difficulties. This is due to both the complex nature of the interaction of radio waves with the medium when they are reflected from the ionosphere and the complexity of the chemical processes occurring with charged and neutral particles in the lower ionosphere. In this work, the possibility of determining the properties of acoustic-gravity waves from measurements of amplitudes of radio signals on relatively short paths (less than ~ 1500 km) was studied in terms of geometric optics. We have analyzed the possible physical mechanisms of the effect of the acoustic-gravity wave propagation at ionospheric altitudes on the amplitudes of the VLF radio signals. The obtained theoretical relations allow to calculate electron concentration fluctuations, the vertical displacement of the reflection height of radio signals, and to estimate the amplitudes of neutral concentration fluctuations due to the propagation of acoustic-gravity waves. Seasonal and daily fluctuations of the amplitudes of VLF radio waves on several European paths during 2013—2014 were studied. Data from transmitters at stations in Germany (DHO38), Great Britain (GQD) and Italy (ICV) with a reception point in France (A118) were used for this study. The features of amplitude fluctuations of radio signals in day and night conditions are analyzed. The approximate background level of acoustic-gravity waves at reflection heights is calculated by measuring the amplitudes of VLF radio signals. Its value turned out to be 200—400 m for fluctuations of the vertical displacement of volume and 1—2 % for fluctuations of the relative concentration of neutral particles. It is shown that the background levels of AGW in the mesosphere of middle latitudes in the daytime at altitudes of ~ 70 km and at night at altitudes of ~ 90 km are close in magnitude.

Keywords: acoustic-gravity wave, ionospheric disturbance, very low-frequency radio wave.