

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2024.06.003>

УДК 551.51; 551.511.31

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

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України  
просп. Академіка Глушкова, 40, к. 4/1, Київ-187, 03187, Україна  
E-mails: fedorenkoak@gmail.com, kryuchkov.ye@gmail.com, voitsekhovska.anna@gmail.com, oleg.cheremnykh@gmail.com, zhukigor@gmail.com

### **Хвильові збурення атмосфери від сонячного термінатора у ранкові та вечірні години за вимірюваннями амплітуд ДНЧ-радіосигналів**

*За допомогою наземної мережі радіостанцій дуже низьких частот досліджено хвильові збурення від сонячного термінатора у ранкові та вечірні години. Використано дані вимірювань амплітуд ДНЧ-радіосигналів на радіотрасі GQD-A118 з передавачем у Великобританії (GQD,  $f = 22.1$  кГц) і пунктом приймання у Франції (A118). Амплітуди радіосигналів змінюються внаслідок поширення атмосферних хвиль на висотах локалізації верхньої стінки ДНЧ-хвилеводу Земля — іоносфера. Це дозволяє використовувати мережу ДНЧ-радіостанцій для моніторингу хвильової активності у мезосфері (нижній іоносфері). На основі аналізу експериментальних даних встановлено, що увечері та вранці впродовж кількох годин після проходження сонячного термінатора спостерігаються виражені періодичні флуктуації амплітуд радіосигналів. Побудовано гістограми розподілу періодів цих флуктуацій для кількох місяців. Виявлено переважання періодів флуктуацій радіосигналів 20...25 хв як у вечірні, так і в ранкові години. Для вечірнього термінатора цей результат узгоджується з нашими попередніми дослідженнями. Переважання приблизно таких же періодів хвиль уранці встановлено вперше. Висловлено припущення, що спостережувані флуктуації спричиняються поширенням акустико-гравітаційних хвиль від сонячного термінатора. Існування переважного періоду ймовірно вказує на те, що ці збурення є основною хвильовою модою, яка рухається синхронно з сонячними термінатором.*

© Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, 2024

© Видавець ВД «Академперіодика» Національної академії наук України, 2024

**Ключові слова:** акустико-гравітаційні хвилі, радіосигнали дуже низьких частот, сонячний термінатор

## ВСТУП

Світова наземна мережа радіостанцій дуже низьких частот (ДНЧ) дозволяє здійснювати глобальний моніторинг стану атмосфери та іоносфери. Це можливо завдяки тому, що поширення радіохвиль ДНЧ-діапазону відбувається у хвилеводі Земля — іоносфера, верхня стінка якого є чутливою до змін умов у атмосферному середовищі. У середньому відбиття цих радіохвиль відбувається на висотах 70...74 км вдень і 85...90 км вночі [14, 17]. Висота відбиття ДНЧ-радіохвиль змінюється, відображаючи як глобальні зміни стану мезосфери (сезонні та добові варіації, сонячні спалахи, раптові стратосферні потепління тощо), так і флуктуації більш локального характеру (хвильові збурення, турбулентність, іоносферні неоднорідності різних типів). Модифікація властивостей хвилеводу викликає відповідні зміни амплітуд і фаз прийнятих радіосигналів, за допомогою яких можна отримувати інформацію щодо властивостей атмосфери та іоносфери на висотах відбиття [12, 14]. Дані цих вимірювань можуть бути використані для розв'язання низки наукових задач, зокрема для вивчення впливу на стан мезосфери різних енергетичних джерел космічного та приземного походження. Зокрема, показано, що більшість атмосферних хвиль, які поширюються вгору від приземних і тропосферних джерел, зазнають дисипації нижче 100 км (область мезопаузи), що призводить до розігріву і турбулізації атмосферного середовища [10]. Тому висоти мезосфери є особливо інформативними для пошуку ефектів впливів «знизу».

Процес відбиття радіохвиль відбувається за рахунок складної взаємодії хвиль з атмосферним середовищем [17]. При моделюванні цієї взаємодії потрібно враховувати комплекс процесів за участі нейтральних частинок, електронів та іонів. На висотах D-області іоносфери це особливо складно через наявність іонів-кластерів та негативних іонів, концентрації яких є дуже мінливими. Тому визначення властивостей іоносфери та нейтральної атмосфери за вимірами характеристик ДНЧ-радіохвиль стикається зі значними труднощами. Нещодавно авторами було розроблено методику, що дозволяє наближено визначити характеристики хвильових атмосферних збурень за результатами вимірювань амплітуд ДНЧ-радіосигналів [7]. Цю методику, зокрема, було апробовано для дослідження збурень, що генеруються сонячним термінатором у вечірні години [5]. З використанням вказаної методики також було визначено деякі сезонні, добові та інші особливості акустико-гравітаційних хвиль на висотах мезосфери [7].

Сонячний термінатор (СТ) є фактично єдиним регулярним джерелом атмосферних збурень [2, 15]. Різкі зміни температури і тиску на

границі між освітленою Сонцем областю та тінню Землі, можуть спричинювати атмосферні збурення різних типів [16]. СТ є протяжним по висоті джерелом, і тому гіпотетично може генерувати хвилі на різних висотах атмосфери, де забезпечується значний приплив сонячної енергії. Поглинання атмосферою енергії від Сонця здійснюється переважно шляхом дисоціації та іонізації нейтральних складових. Дисоціація молекул відіграє основну роль у нижній та середній атмосфері. У термосфері, де переважає атомарний кисень, за приплив сонячної енергії у нейтральну атмосферу відповідальна в основному фотоіонізація. Тому умови та механізми генерації збурень СТ, а також можливі типи хвиль, що генеруються цим джерелом, ймовірно відрізняються на різних атмосферних висотах. Так, планетарні хвилі можуть генеруватися СТ тільки у досить щільних шарах атмосфери, зокрема в нижній атмосфері, де основним «поглиначем» сонячного ультрафіолету є озон [11]. Водночас акустичні або акустико-гравітаційні хвилі гіпотетично можуть генеруватися як у тропосфері, так і на більш високих рівнях атмосфери [4]. Регулярність проходження термінатора дає підстави припустити, що властивості атмосферних збурень, згенерованих цим джерелом, можуть бути подібними, якщо фонові умови в атмосфері (температура, тиск, висотні розподіли нейтральних та іонізованих складових) є близькими.

Поширення акустико-гравітаційних хвиль від СТ на висотах термосфери досліджено в роботі [4] за вимірюваннями *in situ* на борту екваторіального супутника «Atmosphere Explorer-E». Цей супутник рухався по коловій орбіті з горизонтальною швидкістю близько 8 км/с, що на порядок перевищує швидкість руху термінатора по поверхні Землі ( $V_{ST} = 460$  м/с поблизу екватора). Тому з борту супутника реєструвався фактично просторовий розподіл хвильового поля. Згідно з цими вимірами спостерігалися виражені хвильові цуги протяжністю 4-5 періодів у вечірні і ранкові години після проходження СТ. Переважні горизонтальні довжини хвиль становили 1200...1400 км. Велика протяжність цугів уздовж орбіти супутника ймовірно вказує на квазігоризонтальне поширення хвиль поблизу висоти їхньої генерації [4].

У роботі [8] на основі аналізу даних інтерферометра Майкельсона з орбітальної обсерваторії NASA Ionospheric Connection Explorer було вперше зареєстровано хвильові збурення від СТ у меридіональному вітрі. Спостережувані вертикальні довжини хвиль становили понад 200 км. На основі порівняння отриманих результатів з моделями у роботі [8] зроблено висновок, що спостережувані хвилі надійшли з висот нижче 97 км. У такому припущенні, або генерація атмосферних хвиль може відбуватися поблизу висот відбиття ДНЧ-радіохвиль (70...90 км), або хвилі проходять через цей інтервал висот, поширюючись вгору від джерел у нижній атмосфері. У зв'язку з цим висоти локалізації верхньої стінки іоносферного ДНЧ-хвильоводу вбачаються інформативними для спостереження збурень від СТ.

У роботі [5] виявлено збільшення флуктуацій амплітуд ДНЧ-радіосигналів у вечірні години. Для різних сезонів було встановлено переважання флуктуацій в діапазоні періодів 15...20 хв. Збурення з такими періодами інтерпретовано як акустико-гравітаційні хвилі, які рухаються в синхронізмі з термінатором [5].

Хвильові збурення від СТ зазвичай спостерігаються на фоні значних перепадів фонових параметрів атмосфери. Це ускладнює їхнє вивчення як за даними супутникових вимірювань, так і за наземними спостереженнями ДНЧ-радіосигналів [4, 5, 8]. Попередні дослідження хвильових збурень на термінаторі з використанням наземної мережі ДНЧ-радіохвиль переважно стосуються вечірніх умов [5, 8]. Це пов'язано з двома основними обмеженнями: 1) амплітуди флуктуацій ДНЧ-радіосигналів вдень є значно меншими, ніж уночі; 2) наявністю у світлий час доби сонячних рентгенівських спалахів, що заважають виділяти хвильові флуктуації. У представленій роботі ми вперше дослідили спектральний склад збурень на ранковому термінаторі за вимірами амплітуд ДНЧ-радіосигналів. Одночасно було проаналізовано флуктуації амплітуд радіосигналів на вечірньому термінаторі. Здійснено порівняння властивостей збурень увечері та вранці.

## ОБРОБКА ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ДАНИХ

Хвильові збурення від СТ досліджено за вимірами амплітуд ДНЧ-радіосигналів з використанням передавача у Великобританії (GQD,  $f = 22.1$  кГц) і пунктом приймання у Франції (A118). Дані цих вимірювань представлено на сайті <https://sidstation.loudet.org/data> з інтервалом 10 с. Така дискретизація даних дозволяє упевнено реєструвати акустико-гравітаційні хвилі, які поширюються в атмосфері з періодами порядку від 5 хв до 1 год [13].

Добовий хід амплітуди ДНЧ-радіосигналу демонструє зміни різного походження, що ускладнює дослідження хвильових збурень із використанням методів спектрального аналізу. Серед таких змін можна назвати: 1) стрибкоподібні зміни амплітуди вранці та увечері, пов'язані зі зміною умов освітлення Сонцем [7, 18]; 2) сонячні рентгенівські спалахи у світлий час доби; 3) інтерференція іоносферних радіохвиль; 4) збої у прийомі сигналу; 5) нерегулярні сплески невідомої природи тощо. Вказані зміни амплітуди можуть давати сплески спектральної потужності нехвильової природи. Тому автоматична обробка даних вимірювань ДНЧ-амплітуд є складною. Доцільно окремо розглядати різні інтервали доби, уникаючи при цьому різких стрибків амплітуди сигналу. Необхідно також задати певні фізичні критерії, за якими відокремлювати хвильові збурення амплітуди від змін іншого походження.

Потужні сонячні спалахи зазвичай добре помітні у вигляді різких одиничних сплесків амплітуди радіосигналу з наступною релаксацією

до вихідного рівня впродовж кількох десятків хвилин [9]. Однак слабкі спалахи, особливо коли вони відбуваються декілька один за одним, можуть при спектральному аналізі бути помилково інтерпретовані як хвильовий цуг. Тому при дослідженні хвиль на ранковому термінаторі слід ретельно аналізувати кожен хвильовий цуг, відслідковуючи спалахи у даних вимірювань потоку рентгенівського випромінювання Сонця.

У наближенні геометричної оптики, яке використовують для відносно коротких радіотрас, менших від 2000 км [3, 18], амплітуда прийнятого сигналу розглядається як результат інтерференції приземної хвилі та кількох хвиль, що відбилися від іоносфери. Основний вклад у вимірювану амплітуду радіосигналу дає перша іоносферна хвиля, яка до потрапляння на приймач відбилася від іоносферної стінки ДНЧ-хвилеводу у точці, що лежить якраз посередині між передавачем і приймачем. Друга іоносферна хвиля зазнає відбиття від іоносфери двічі, третя — тричі і т. д. [3, 18]. При проходженні СТ виникає ситуація, коли частина радіотраси вже освітлена Сонцем, а інша частина ще перебуває в тіні. Тоді вклад 2-ї та 3-ї іоносферних гармонік стає більш помітним, що проявляється у вигляді характерних флуктуацій амплітуди радіосигналу. Для нашого розгляду важливо, що такі флуктуації не є монохроматичними. Це дозволяє відокремлювати їх від реальних хвильових цугів.

У контактних супутникових вимірюваннях є можливість ідентифікувати тип збурення, порівнюючи синхронні флуктуації різних атмосферних параметрів, наприклад концентрації, температури та швидкості частинок [1]. При вимірюваннях амплітуд ДНЧ-радіосигналів можливості для встановлення типу атмосферного збурення є вкрай обмеженими. За цими даними можна визначити амплітуди хвильових флуктуацій та їхні періоди. При аналізі даних вимірювань амплітуд ДНЧ-радіосигналів ми припускаємо, що цуги АГХ мають бути квазімонохроматичними і складатися з кількох періодів (не менш ніж двох), як це спостерігається в супутникових вимірюваннях [1, 4].

Приклад добової залежності амплітуди ДНЧ-радіосигналу на трасі GQD-A118 показано на рис. 1 для 06.01.2024 р. З огляду на добовий хід амплітуди при аналізі даних ми виділяли три окремих часових інтервали: ніч (від  $0^h$  UT до стрибка амплітуди вранці), ранок і день (між ранковими і вечірніми різкими змінами), вечір (від різкого збільшення амплітуди до  $24^h$  UT) (див. рис. 1). Зрозуміло, що такий поділ є досить умовним, а в різні пори року вказані часові інтервали мають різну тривалість. Розглянуті інтервали не включали різкі стрибки амплітуди вранці та увечері, тобто сам момент проходження СТ. Для пошуку хвиль від термінатора ми розглядали вечірні та вранішні часові проміжки тривалістю кілька годин після СТ, припускаючи, що хвильова активність розвивається після його проходження.

При дослідженні флуктуацій амплітуди прийнятий сигнал зручно подати у вигляді  $A = \bar{A} + \tilde{A}$ , де  $\bar{A}$  — середнє незбурене значення

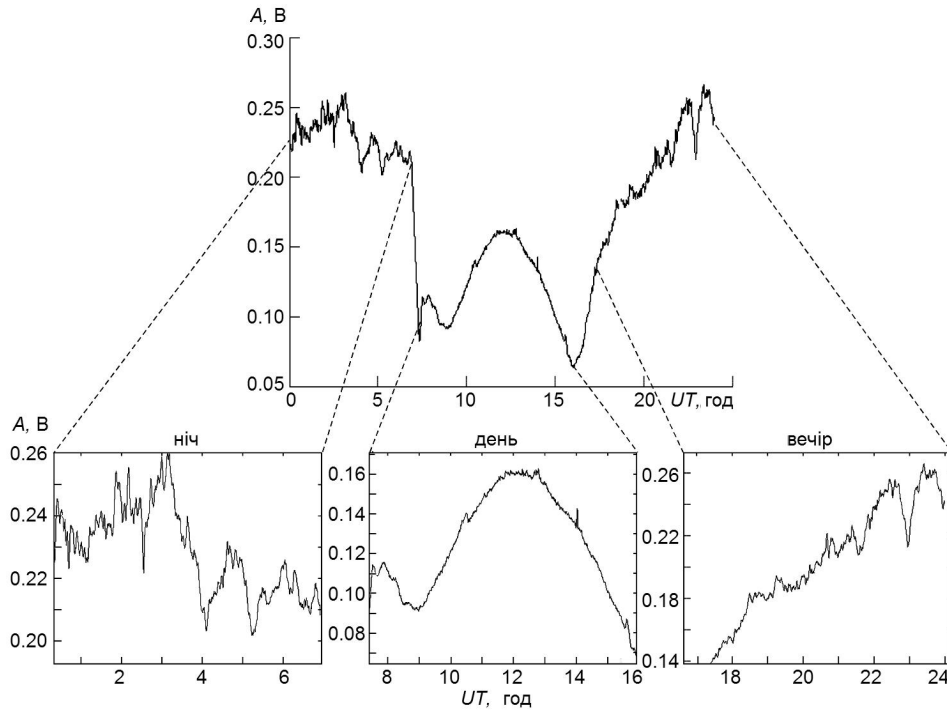


Рис. 1. Добова залежність амплітуди  $A$  (у вольтах) ДНЧ-радіосигналу на трасі GQD-A118 для 06.01.2024 р. Окремо показано часові інтервали досліджень: ніч, день та вечір

амплітуди (тренд),  $A$  — хвильове збурення. У роботі [7] показано, що для атмосферних АГХ доцільно розглядати не абсолютні, а відносні флуктуації амплітуд ДНЧ-радіосигналів  $A/\bar{A}$ . Це дозволяє виключати великомасштабні тренди амплітуди, а також деякі технічні фактори, наприклад відмінності у способах прийому сигналу на різних трасах [7]. Поширення АГХ в атмосфері супроводжується флуктуаціями амплітуд радіосигналів  $A/\bar{A}$ , що становлять зазвичай кілька відсотків [5, 7].

Для вивчення властивостей АГХ потрібно встановити зв'язок між амплітудами флуктуацій ДНЧ-радіосигналів та амплітудами атмосферних хвиль. У наближенні геометричної оптики в роботі [6] було отримано вираз, що пов'язує малі відносні зміни амплітуди радіосигналів з амплітудами АГХ у флуктуаціях концентрації нейтральної атмосфери  $n/n_0$ :

$$\frac{A}{\bar{A}} = \frac{n}{n_0}, \quad (1)$$

де «передавальний» коефіцієнт  $HK / (1 - dH / dz)$  визначається параметрами атмосфери і функцією  $K$ , що залежить від довжини траси, висоти відбиття, частоти сигналу і співвідношення між амплітудами приземної та іоносферних радіохвиль;  $n_0$  і  $n$  позначають рівноважну концентрацію нейтральної атмосфери і збурення концентрації вна-

слідок поширення АГХ;  $H$  і  $dH/dz$  — висота однорідної атмосфери та її висотний градієнт, викликаний зміною температури. Для характерних висот відбиття ДНЧ-радіохвиль вдень (нижче мезопаузи)  $dH/dz \approx -0.08$ . Вночі відбиття радіохвиль відбувається поблизу мезопаузи ( $dH/dz \approx 0$ ) або дещо вище ( $dH/dz \approx 0.1$ ).

З рис. 1 добре видно, що у нічні години флуктуації амплітуди сигналу є помітно більшими, ніж удень. Переважно це зумовлено набагато більшими нічними значеннями величини  $K$  (див, наприклад, рис. 3 в роботі [7]). Так, на розглядуваній трасі GQD-A118 значення функції  $K$  вдень лежать в інтервалі  $-0.01 \dots -0.03 \text{ км}^{-1}$ , а вночі — в інтервалі  $+0.05 \dots +0.15 \text{ км}^{-1}$ , залежно від висоти відбиття [7]. На висоті відбиття радіохвиль  $H \approx 7 \text{ км}$ . Тоді згідно з формулою (1) безрозмірна величина  $NK$  дорівнює  $-0.07 \dots -0.21$  вдень і  $+0.35 \dots +1$  вночі. Тобто, флуктуації амплітуд радіосигналів вночі є значно більшими, навіть за умови однакових амплітуд АГХ на висотах відбиття (рис. 1). Однак не можна виключати, що великі нічні значення  $A/\bar{A}$  частково можуть бути спричинені дійсно більшими амплітудами АГХ, які надходять від джерел знизу. Згідно з теоретичними уявленнями, амплітуди АГХ при їхньому поширенні знизу вгору, збільшуються через зменшення щільності атмосфери [13]. Оскільки нічний рівень відбиття радіохвиль лежить в середньому на  $10 \dots 15 \text{ км}$  вище, ніж денний, амплітуди АГХ від джерел «знизу» вночі повинні бути більшими.

Результати аналізу збурень від СТ для 06.01.2024 р. на трасі GQD-A118 показано на рис. 2. Розглянуто часові інтервали вранці та увечері тривалістю близько 4 год після проходження СТ. На рис. 2 зліва наведено відносні флуктуації амплітуди  $A/\bar{A}$ , справа показано відповідні вейвлет-спектри. Для отримання кривої  $\bar{A}$ , що описує незбурений хід амплітуди, застосовано метод ковзного середнього з розмірами вікна 1 год. Для побудови спектру використано комплексний вейвлет Морле.

Зазвичай у вимірах амплітуд радіохвиль спостерігається суперпозиція коливань різних часових масштабів, що добре помітно вже у вихідному ряді даних на рис. 1. Результати вейвлет-аналізу підтверджують наявність у вимірах амплітуди флуктуацій різних масштабів. З порівняння відносних флуктуацій з вейвлет-спектрами видно, що не всі сплески спектральної потужності пов'язані з хвильовими цугами. Так, на вранішньому термінаторі спостерігається виражений хвильовий цуг з характерним періодом приблизно 24 хв. Проте, наприклад, флуктуації в інтервалі  $10^h \dots 10.5^h \text{ UT}$  зумовлені рентгенівським спалахом. У вечірні години виражені коливання з періодом, що змінюється в інтервалі  $15 \dots 13 \text{ хв}$ , однак наявні й інші часові масштаби. Відмітимо, що коливань з періодом, меншим від 5 хв, фактично немає. Згідно з теоретичними уявленнями це значення відповідає мінімально можливому періоду АГХ (періоду Брента — Ваясяля) на висотах відбиття радіохвиль.

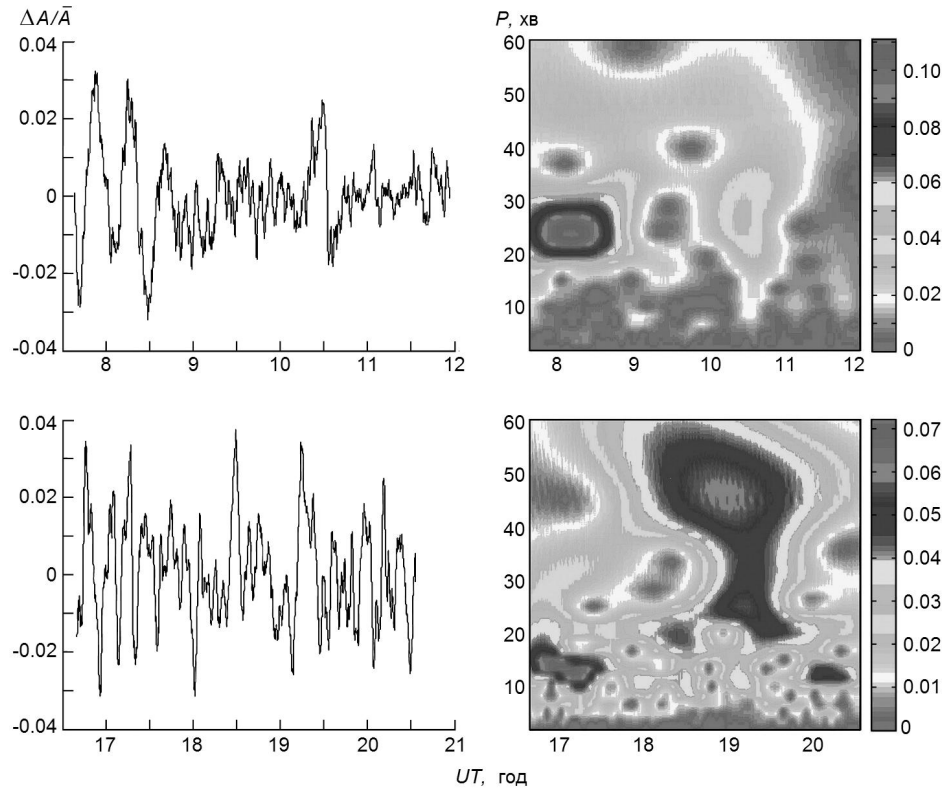


Рис. 2. Відносні флуктуації амплітуди ДНЧ-радіосигналу (зліва) та відповідні вейвлет-спектри (справа) вранці та увечері 06.01.2024 р. на трасі GQD-A118

### ЗАГАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ХВИЛЬОВИХ ФЛУКТУАЦІЙ РАДІОСИГНАЛІВ ВПРОДОВЖ ДОБИ

Проаналізовано флуктуації амплітуд радіосигналів на трасі GQD-A118 упродовж кількох місяців 2023—2024 рр., що належать до різних сезонів. На рис. 3 показано гістограми розподілу хвильових збурень залежно від UT у липні та жовтні 2023 р. Видно три досліджувані інтервали доби (1 — ніч, 2 — день, 3 — вечір) та кількість хвильових подій, що потрапляють у ці інтервали. Під однією хвильовою подією розуміємо окремих цуг флуктуацій амплітуди радіохвиль, що складається з кількох періодів коливачь. Гістограми на рис. 3 включають хвильові цуги з різними періодами приблизно від 10 хв до 1 год.

Залежність періодів  $P$  спостережуваних флуктуацій від часу доби показано на рис. 4, де для наочності попарно показано дані за липень 2023 р. і січень 2024 р. (рис. 4а), липень 2023 р. і жовтень 2023 р. (рис. 4б). Добре видно сезонні прояви хвильової активності, пов'язані з часом сходу і заходу Сонця. Також помітні деякі загальні тенденції щодо періодів флуктуацій: 1) увечері та вранці періоди флуктуацій ампліту-



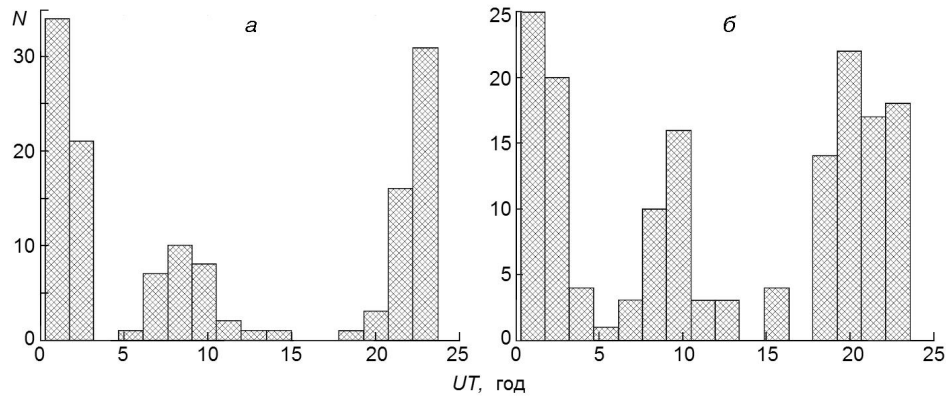


Рис. 3. Гістограми розподілу кількості  $N$  хвильових подій на трасі GQD-A118 по годинах доби: *a* — у липні 2023 р., *б* — у жовтні 2023 р.

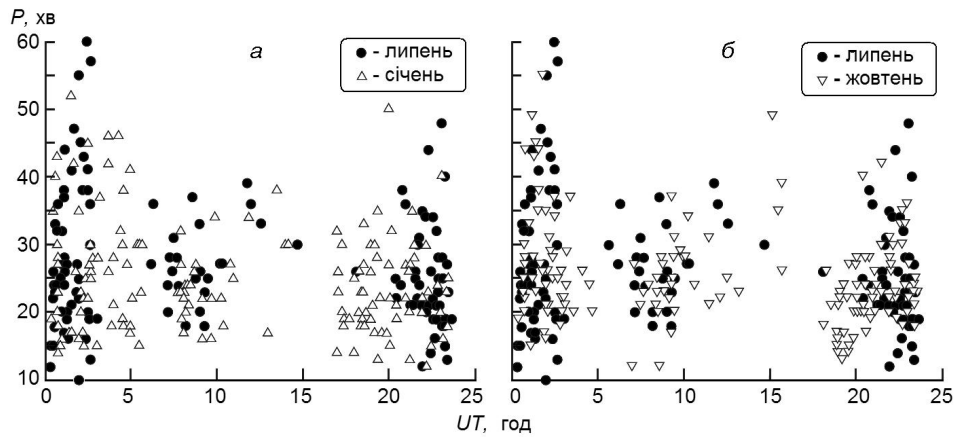


Рис. 4. Залежність періодів  $P$  спостережуваних флуктуацій від часу доби і сезону: *a* — липень 2023 р. і січень 2024 р., *б* — липень 2023 р. і жовтень 2023 р.

**Таблиця 1.** Середні значення періодів флуктуацій амплітуд радіосигналів у різні сезони та інтервали доби

Інтервал доби	Період, хв		
	Липень	Жовтень	Січень
вечір	24.2	24.1	22.4
ранок	25.7	24.8	23.5
ніч	28.5	28.3	26.2

ди переважно становлять менш ніж 30 хв; 2) увечері періоди в середньому дещо менші, ніж уранці; 3) у нічних умовах збільшується відносний вклад більших періодів. Середні значення періодів флуктуацій амплітуд радіосигналів у різні місяці показано у табл. 1. У кожному з розглянутих місяців найменшим є середній період увечері, а найбільшим — вночі. Для різних розглянутих інтервалів доби середній період флуктуацій зменшується від літа до зими.

**ПОРІВНЯННЯ ХВИЛЬОВИХ ЗБУРЕНЬ АМПЛІТУД РАДІОСИГНАЛІВ  
У РАНКОВІ ТА ВЕЧІРНІ ГОДИНИ**

Розглянемо докладніше збурення амплітуди радіосигналів у вечірні та ранкові години, які можуть бути пов’язані з хвильовою активністю сонячного термінатора. На рис. 5 показано розподіл амплітуд відносних флуктуацій упродовж трьох місяців (січень 2024 р., жовтень 2023 р. та липень 2023 р.). Видно, що на вечірньому термінаторі переважають флуктуації з амплітудами від 2 % до 4 %, на ранковому термінаторі амплітуди переважно менші від 1 %. Це є однією з причин, чому збурення вранці важче спостерігати, ніж увечері. Проте вранці у значній частині випадків також спостерігалися флуктуації з амплітудами, сумірними з вечірніми, як це видно, наприклад, на рис. 2. Як вже було сказано раніше, менші амплітуди флуктуацій радіосигналів не обов’язково означають, що амплітуди хвиль в атмосфері є меншими. Все залежить від величини передавального коефіцієнта у формулі (1). Вдень поведінка є досить стабільною, однак вранці та увечері цей коефіцієнт змінює знак, а також швидко змінюється за величиною. Тому певні інтервали УТ виявляються сприятливими для спостережень хвильових збурень в атмосфері. Наприклад, вночі та увечері, коли  $\gamma > 1$ , і виконується  $A/\bar{A} \approx n/n_0$ . Однак у певні часові інтервали маємо  $A/\bar{A} \approx (0.1...0.3) n/n_0$ , що не сприяє реєстрації хвильових збурень. Ця ситуація характерна для денних умов і також частіше зустрічається вранці.

Якщо у вечірні години аналізувалося практично кожне проходження термінатора, то вранці прийнятними для аналізу зазвичай є не більше ніж 17...20 днів на місяць, переважно через серії спалахів або збої у прийомі даних. Тому вранці кількість випадків, показаних на гістограмах, є помітно меншою, ніж увечері. Загальна кількість вечірніх подій у гістограмі перевищує сумарну кількість проходжень СТ за три місяці. Це пов’язано з тим, що у певні дні спостерігалися су-

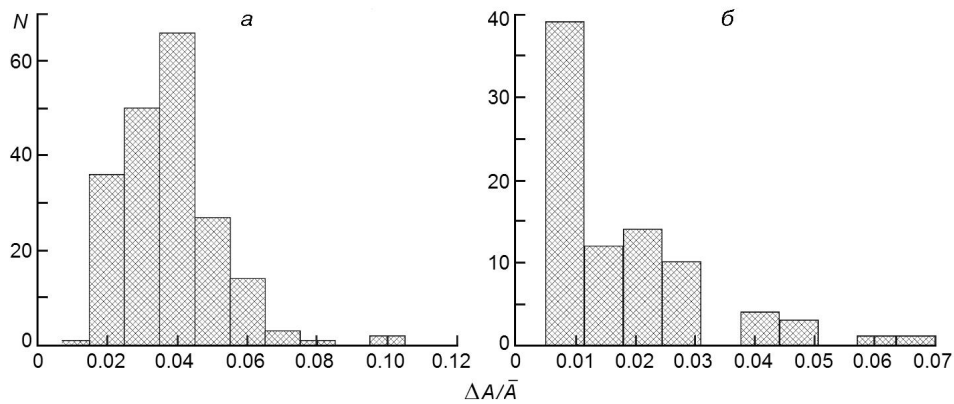


Рис. 5. Гістограми розподілу флуктуацій радіосигналів по значеннях амплітуди на трасі QGD-A118 увечері (а) та вранці (б)

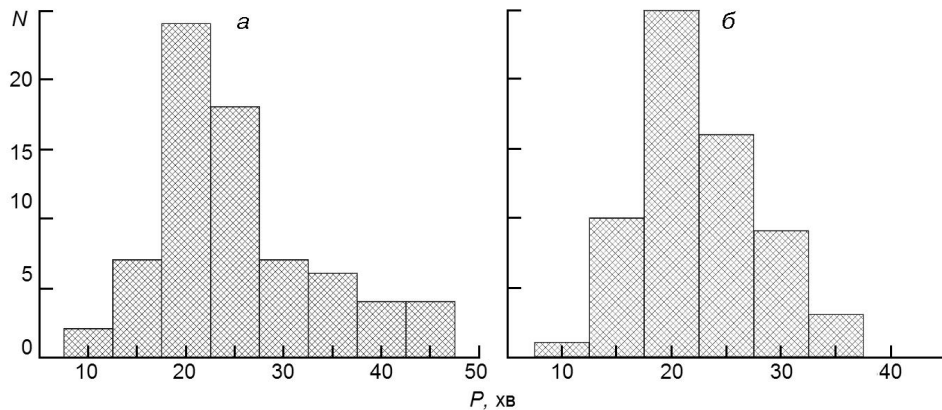


Рис. 6. Гістограми розподілу кількості  $N$  флуктуацій амплітуд радіосигналів по значеннях періодів  $P$  у вечірні години на трасі GQD-A118 у липні 2023 р. (а) та січні 2024 р. (б)

перпозиція флуктуацій різних масштабів. Якщо ці коливання розділялися на окремі цуги за допомогою вейвлет-аналізу, тоді вони враховувалися у гістограмах як різні хвильові події.

Розглянемо особливості поведінки флуктуацій амплітуди увечері та вранці для окремих місяців. Вечірні гістограми розподілу періодів флуктуацій амплітуд на трасі GQD-A118 показано на рис. 6 для липня 2023 р. та січня 2024 р. Видно тенденцію до переважання періодів у інтервалі 20...25 хв. Розподіли періодів є несиметричними, тому центри розподілів краще описують медіанні значення, ніж наведені у табл. 1 середні значення. Медіанні значення для показаних на рис. 6 розподілів становлять приблизно 23 хв для липня і 21.5 хв для січня. Найявність переважних періодів може свідчити на користь регулярного джерела спостережуваних збурень, яким є сонячний термінатор.

На рис. 7 показано гістограми розподілу по значеннях періодів кількості флуктуацій радіосигналів у ранкові години. Тут також видно тенденцію до переважання періодів, близьких до вечірніх значень, однак через малу кількість подій уранці ці тенденції є не досить вираженими. Розподіли є несиметричними, медіанні значення цих розподілів становлять 24.5 хв у жовтні та 25.5 хв у липні.

Узагальнені за чотири місяці (квітень, липень, жовтень 2023 р. і січень 2024 р.) гістограми розподілу періодів показано на рис. 8 для вечірніх і ранкових годин. На узагальнених гістограмах тенденції до переважання певних періодів краще видно через більшу кількість хвильових подій. Переважні періоди вранці та увечері є досить близькими, їхні медіанні значення складають 22 хв увечері та 23 хв вранці.

У нашому нещодавньому дослідженні [5] було отримано висновок про переважання на вечірньому термінаторі флуктуацій амплітуд ДНЧ-радіохвиль з періодами 15...20 хв. У даній роботі на основі аналізу даних за 2023—2024 рр. виявилось переважання періодів в

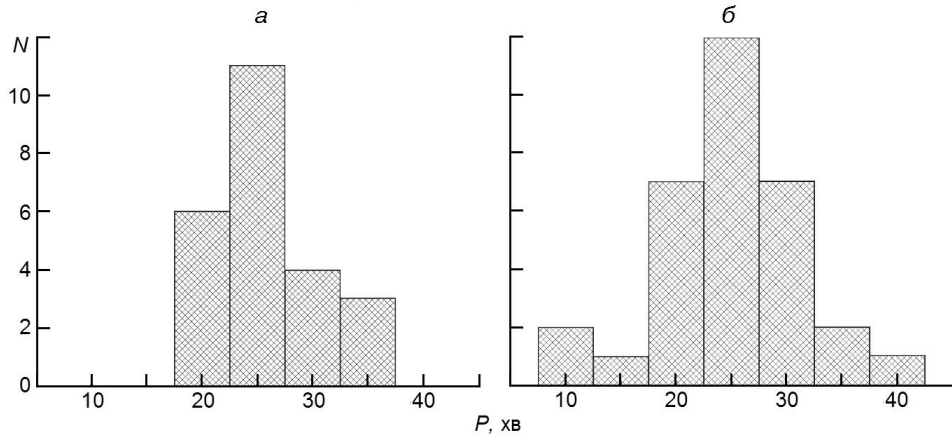


Рис. 7. Гістограми розподілу флуктуацій радіосигналів по значеннях періодів  $P$  вранці на трасі GQD-A118 у липні 2023 р. (а) та жовтні 2023 р. (б)

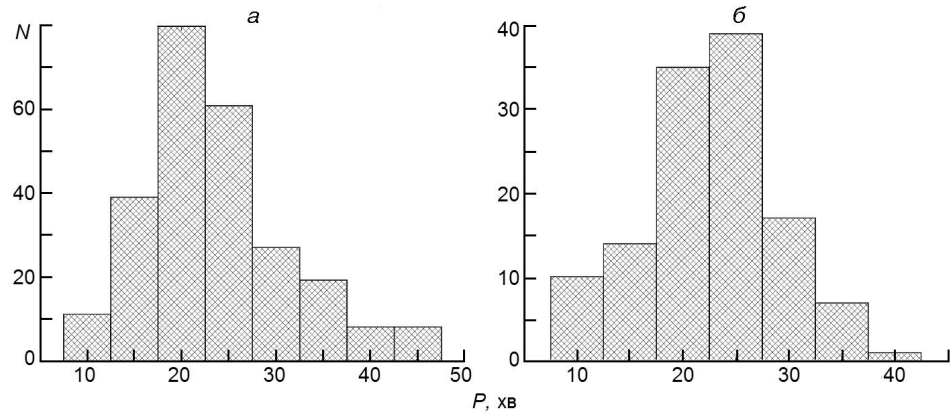


Рис. 8. Узагальнені за чотири місяці гістограми розподілу флуктуацій амплітуд радіосигналів по значеннях періодів  $P$  на трасі GQD-A118 у вечірній (а) та ранковій години (б)

інтервалі 20...25 хв, що є близьким до попереднього результату. Також досліджено флуктуації амплітуд радіосигналів у ранковій годині. Отримано, що вранці переважають збурення з періодами, близькими до вечірніх значень (див. рис 8б). Наявність переважних періодів ймовірно вказує на регулярний характер джерела атмосферних збурень, яким є сонячний термінатор.

Відмінність переважних періодів вранці та увечері виявилася незначною (за медіанними значеннями порядку 1 хв). Однак цей ефект вбачається досить цікавим. Тому дозволимо собі висловити деякі дискусійні припущення щодо спостережуваної асиметрії періодів. Гіпотетично тенденція до більших ранкових періодів може бути пов'язана з ефектом Доплера. Через градієнти температури і тиску на термінаторі формується зональний вітер, напрямлений з освітленої півкулі в

область земної тіні. Припустимо, що СТ генерує вранці та увечері хвилі з однаковою частотою. Вранці хвилі поширюються від СТ в освітлену область, тобто назустріч вітру. Увечері, навпаки, напрямком поширення хвильових збурень від термінатора збігається з напрямком вітру. Тому вранці наземний нерухомий спостерігач реєструватиме ці збурення зі зменшеною частотою  $\omega - k_x W_x$  ( $k_x$  — горизонтальна складова хвильового вектора,  $W_x$  — швидкість вітру), тобто з більшим періодом. Увечері хвильові збурення на фоні вітру спостерігатимуться з більшою частотою  $\omega + k_x W_x$ , тобто з меншим періодом. Проте підтвердження цього ефекту потребує більш детального розгляду.

## ВИСНОВКИ

За даними вимірювань амплітуд ДНЧ-радіосигналів досліджено хвильові збурення, що супроводжують проходження сонячного термінатора. Розглянуто загальні особливості хвильових флуктуацій радіосигналів у різні проміжки часу впродовж доби. Досліджено спектральний склад збурень у ранкові та вечірні години. Побудовано гістограми розподілів періодів хвильових збурень на термінаторі для різних місяців. Порівняно розподіли флуктуацій на вечірньому і ранковому термінаторі. Отримано результат щодо переважання на вечірньому термінаторі хвильових флуктуацій з періодами 20...25 хв, що приблизно узгоджується з нашими попередніми дослідженнями в роботі [5]. В даній роботі вперше показано, що періоди в інтервалі 20...25 хв. також переважають і на ранковому термінаторі. Однак помічено тенденцію, що періоди вранці є дещо більшими, ніж увечері. Ця відмінність становить близько 1 хв за медіанними значеннями. Дано можливе пояснення переважання ранкових періодів над вечірніми як наслідок руху атмосферних збурень від СТ на фоні зонального вітру. Спостережувані флуктуації амплітуд радіосигналів інтерпретовано як відображення поширення акустико-гравітаційних хвиль, що генеруються СТ. Наявність переважного періоду може свідчити на користь основної хвильової моди, що рухається у синхронізмі з термінатором.

Роботу виконано за підтримки гранту The Royal Society, International Exchanges Scheme, collaboration with Ukraine (IES\R1\211177).

1. Клименко Ю. О., Федоренко А. К., Крючков Є. І., Черемних О. К., Войцеховська А. Д., Селіванов Ю. О., Жук І. Т. Ідентифікація акустико-гравітаційних хвиль за даними супутникових вимірювань. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2021. **37**, № 6. С. 3—18. doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.06.003>.
2. Beer T. Supersonic generation of atmospheric waves. *Nature.* 1973. **242**(5392). P. 34—34. doi:10.1038/242034a0.
3. Berry L. A. Wave hop theory of long distance propagation of low-frequency radio waves. *Radio Sci. J. Res.* 1964. **68D** (12). P. 1275—1284.

4. Bepalova A. V., Fedorenko A. K., Cheremnykh O. K., Zhuk I. T. Satellite observations of wave disturbances caused by moving solar terminator. *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.* 2016. **140**. P. 79—85. doi:10.1016/j.jastp.2016.02.012.
5. Cheremnykh O., Fedorenko A., Voitsekhovska A., Selivanov Yu., Ballai I., Verth G., Fedun V. Atmospheric waves disturbances from the solar terminator according to the VLF radio stations data. *Adv. Space Res.* 2023. **72**(11). P. 4825—4835. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.08.036>.
6. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Voitsekhovska A. D., Klymenko Yu. O. *Recover of acoustic-gravity wave properties revealed from measurements of VLF radio wave amplitudes*. arXiv: 2011.05084v1 [physics.ao-ph] 10 Nov 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05084>.
7. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Voitsekhovska A. D., Rapoport Yu. G., Klymenko Yu. O. Analysis of acoustic-gravity waves in the mesosphere using VLF radio signal measurements. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2021. **219**. 105649. doi:10.1016/j.jastp.2021.105649.
8. Gasque L. C., Harding B. J., Immel T. J., Wu Y.-J., Triplett C. C., Vadas S. L., et al. Evening solar terminator waves in Earth's thermosphere: Neutral wind signatures observed by ICON-MIGHTI. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2024. **129**, e2023JA032274. <https://doi.org/10.1029/2023JA032274>.
9. Kolarski A., Grubor D. Comparative analysis of VLF signal variation along trajectory induced by X-ray solar flares. *J. Astrophys. Astron.* 2015. **36**(4). P. 565—579.
10. Kozak L. V., Dzubenko M. I., Ivchenko V. M. Temperature and thermosphere dynamics behavior analysis over earthquake epicentres from satellite measurements. *Phys. and Chem. Earth.* 2004. **29**(4–9). P. 507—515. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.09.020>.
11. Miyoshi Y., Fujiwara H., Forbes J. M., Bruinsma S. L. Solar terminator wave and its relation to the atmospheric tide. *J. Geophys. Res.* 2009. **114**(A7), A07303. <https://doi.org/10.1029/2009ja014110>.
12. Nina A., Cadež V. M. Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by VLF radio waves. *Geophys. Res. Lett.* 2013. **40**(18). P. 4803—4807. doi:10.1002/grl.50931.
13. Roy A., Roy S., Misra A. P. Dynamical properties of acoustic-gravity waves in the atmosphere. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2019. **186**. P. 78—81. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.009>.
14. Silber I., Price C. On the use of VLF narrowband measurements to study the lower ionosphere and the mesosphere — lower thermosphere. *Surveys Geophys.* 2016. **38**(2). P. 407—441. doi:10.1007/s10712-016-9396-9.
15. Somsikov V. M. *Solar terminator and dynamics of the atmosphere*. Alma-Ata: Nauka, 1983.
16. Somsikov V. M., Ganguly B. On the mechanism of formation of atmospheric inhomogenities in the solar terminator region. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1995. **57**. P.75—83.
17. 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.
18. Yoshida M., Yamauchi T., Horie T., et al. 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.

## REFERENCES

1. Klymenko Y. O., Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., et al. (2021). Identification of acoustic-gravity waves from satellite measurements. *Kinematika i fizika nebesnyh til.* **37**(6). 3—18. doi:10.15407/kfnt2021.06.003.
2. Beer T. (1973). Supersonic generation of atmospheric waves. *Nature.* **242**(5392). 34—34. doi:10.1038/242034a0.
3. Berry L. A. (1964). Wave Hop Theory of Long Distance Propagation of Low-Frequency Radio Waves. *Radio Sci. J. Res.* **68D** (12). 1275—1284.
4. Bespalova A. V., Fedorenko A. K., Cheremnykh O. K., Zhuk I. T. (2016). Satellite observations of wave disturbances caused by moving solar terminator. *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.* **140**. 79—85. doi:10.1016/j.jastp.2016.02.012.
5. Cheremnykh O., Fedorenko A., Voitsekhovska A., Selivanov Yu., Ballai I., Verth G., Fedun V. (2023). Atmospheric waves disturbances from the solar terminator according to the VLF radio stations data. *Adv. Space Res.* **72**(11). 4825—4835. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.08.036>.
6. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Voitsekhovska A. D., Klymenko Yu. O. *Recover of acoustic-gravity wave properties revealed from measurements of VLF radio wave amplitudes.* arXiv: 2011.05084v1 [physics.ao-ph] 10 Nov 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05084>.
7. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Voitsekhovska A. D., Rapoport Yu. G., Klymenko Yu. O. (2021). Analysis of acoustic-gravity waves in the mesosphere using VLF radio signal measurements. *J. Atmos. Terr. Phys.* **219**. 105649. DOI:10.1016/j.jastp.2021.105649.
8. Gasque L. C., Harding B. J., Immel T. J., Wu Y.-J., Triplett C. C., Vadas S. L., et al. (2024). Evening solar terminator waves in Earth's thermosphere: Neutral wind signatures observed by ICON-MIGHTI. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **129**. e2023JA032274. <https://doi.org/10.1029/2023JA032274>.
9. Kolarski A., Grubor D. (2015). Comparative analysis of VLF signal variation along trajectory induced by X-ray solar flares. *J. Astrophys. Astron.* **36** (4). 565—579.
10. Kozak L. V., Dzubenko M. I., Ivchenko V. M. (2004). Temperature and thermosphere dynamics behavior analysis over earthquake epicentres from satellite measurements. *Phys. and Chem. Earth.* **29**. 507—515, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.09.020>.
11. Miyoshi Y., Fujiwara H., Forbes J. M., Bruinsma S. L. (2009). Solar terminator wave and its relation to the atmospheric tide. *J. Geophys. Res.* **114**(A7). A07303. <https://doi.org/10.1029/2009ja014110>.
12. Nina A., Cadež V. M. (2013). Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by VLF radio waves. *Geophys. Res. Lett.* **40**(18). 4803—4807. doi:10.1002/grl.50931.
13. Roy A., Roy S., Misra A. P. (2019). Dynamical properties of acoustic-gravity waves in the atmosphere. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* **186**. 78—81. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.009>.
14. Silber I., Price C. (2016). On the use of VLF narrowband measurements to study the lower ionosphere and the mesosphere — lower thermosphere. *Surveys Geophys.* **38**(2). 407—441. doi:10.1007/s10712-016-9396-9.

15. Somsikov V. M. (1983). *Solar terminator and dynamics of the atmosphere*. Alma-Ata. Nauka.
16. Somsikov V. M., Ganguly B. (1995). On the mechanism of formation of atmospheric inhomogeneties in the solar terminator region. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **57**. 75—83.
17. Wait J. R., Spies K. P. (1964). *Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves*. National Bureau of Standards, Technical Note, N 300.
18. Yoshida M., Yamauchi T., Horie T., et al. (2008). 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.

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

Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine  
and the State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
40, Glushkov Ave., build. 4/1, Kyiv 187, 03680 Ukraine

#### WAVE ATMOSPHERIC DISTURBANCES FROM THE SOLAR TERMINATOR IN THE MORNING AND EVENING HOURS BASED ON MEASUREMENTS OF AMPLITUDES OF VLF RADIO SIGNALS

Wave disturbances from the solar terminator in the morning and evening hours were investigated using a ground-based network of very low frequency (VLF) radio stations. The data of measurements of the amplitudes of VLF radio signals on the GQD–A118 radio path with a transmitter in Great Britain (GQD,  $f = 22.1$  kHz) and a receiving point in France (A118) were used. Amplitudes of radio signals change as a result of the propagation of atmospheric waves at the altitudes of localization of the upper wall of the Earth-ionosphere VLF waveguide. This makes it possible to use a network of VLF radio stations to monitor wave activity in the mesosphere (lower ionosphere). Based on the analysis of experimental data, it was established that pronounced periodic fluctuations in the amplitudes of radio signals are observed in the evening and in the morning for several hours after the passage of the solar terminator. Histograms of the distribution of these fluctuation periods for several months were constructed. The predominance of periods of radio signal fluctuations of 20—25 minutes was revealed both in the evening and in the morning hours. For the evening terminator, this result is consistent with our previous studies. The predominance of approximately the same wave periods in the morning was established for the first time. It is assumed that the observed fluctuations are caused by the propagation of acoustic-gravitational waves from the solar terminator. The existence of a dominant period probably indicates that these perturbations represent a fundamental wave mode moving synchronously with the solar terminator.

**Key words:** acoustic-gravitational waves, radio signals of very low frequencies, solar terminator

Стаття надійшла до редакції 16.06.2024  
Після доопрацювання 16.06.2024  
Прийнята до друку 15.08.2024