

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.02.023>

УДК 551.51; 551.511.31

**Д. І. Власов, А. К. Федоренко, Є. І. Крючков,  
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, Україна, 03187  
E-mails: [dima.i.vlasov@gmail.com](mailto:dima.i.vlasov@gmail.com), [fedorenkoak@gmail.com](mailto:fedorenkoak@gmail.com), [kryuchkov.ye@gmail.com](mailto:kryuchkov.ye@gmail.com),  
[oleg.cheremnykh@gmail.com](mailto:oleg.cheremnykh@gmail.com), [zhukigor@gmail.com](mailto:zhukigor@gmail.com)

## **Сезонні особливості просторового розподілу атмосферних гравітаційних хвиль у полярній термосфері Землі**

*Досліджено особливості просторового розподілу атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) у полярній термосфері Землі. Дослідження базуються на даних прямих супутникових вимірювань параметрів нейтральної атмосфери. Згідно з супутниковими даними у полярних областях обох півкуль систематично спостерігаються АГХ, амплітуди яких зазвичай у кілька разів перевищують амплітуди цих хвиль у середніх і низьких широтах. При цьому полярні АГХ великих амплітуд реєструються на фоні високошвидкісних просторово неоднорідних вітрових течій, що вказує на їхнє можливе підсилення внаслідок взаємодії з вітром. На основі аналізу даних вимірювань на супутнику «Dynamics Explorer 2» виявлено зв'язок просторового розподілу атмосферних гравітаційних хвиль з авроральним овалом. На великому обсязі експериментальних даних встановлено сезонні закономірності розподілу хвильового поля над Антарктикою та Арктикою. Виділено особливості розподілу хвильової активності, характерні для різних пір року. Виконано порівняльний аналіз особливостей АГХ у полярній термосфері обох півкуль для умов полярного дня і полярної ночі. Виявлено певні відмінності розподілу АГХ в залежності від  $K_p$ -індексу. Висловлено припущення, що спостережувані сезонні особливості розподілу АГХ та його залежність від рівня геомагнітної активності пов'язані з перебудовою полярної вітрової циркуляції при зміні умов освітлення Сонцем та геомагнітної обстановки.*

**Ключові слова:** атмосферна гравітаційна хвиля, полярна термосфера, супутникові вимірювання

## ВСТУП

Атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ) в атмосфері Землі інтенсивно досліджуються науковою спільнотою впродовж більш ніж півстоліття. Результати цих досліджень показали, що АГХ дають значний внесок у динаміку та енергетику атмосфери [9, 13, 19, 29]. На відміну від магнітосферних хвиль, поширення яких істотно залежить від параметрів навколоземної плазми [14] та механізмів взаємодії сонячного вітру з магнітним полем Землі [8], АГХ реалізуються в слабоіонізованому середовищі, і при їхньому розгляді можна знехтувати зарядженими частинками і магнітним полем. Вони можуть генеруватися джерелами різної природи і поширюватися в атмосфері на значні відстані, забезпечуючи ефективну взаємодію між різними висотними ланками геокосмосу. АГХ пов'язують з «впливами згори», якщо їхні джерела локалізовані у верхній атмосфері. Яскравими прикладами реалізації таких впливів є геокосмічні бурі, сонячні рентгенівські спалахи, рух сонячного термінатора, сонячні припливи, затемнення, падіння великих космічних тіл та ін. [1, 7, 10, 20]. З іншого боку, навколоземний космос зазнає також впливів «знизу», обумовлених потоками енергії та імпульсу від нижніх шарів атмосфери та поверхні Землі (погодні фронти, землетруси, тайфуни, катастрофічні явища, антропогенний вплив) [15, 18, 27]. Цей напрямок досліджень привертає особливу увагу науковців, оскільки безпосередньо пов'язаний з впливом на атмосферу та іоносферу різних катастрофічних явищ, а також гіпотетичною можливістю їхнього передбачення [28]. Впливи «згори» та «знизу» здійснюються через складні ланцюги енергетичних та динамічних взаємодій. Ці взаємодії реалізуються різними каналами, серед яких дуже важливу роль відіграють хвильові процеси різних типів від високочастотних електромагнітних до низькочастотних інфразвукових та акустико-гравітаційних [9, 19, 21, 29]. Хвилі здійснюють швидкий та ефективний енергообмін між різними висотними рівнями і суттєво впливають на зміни параметрів навколоземного космосу.

Сучасні експериментальні дослідження АГХ в атмосфері переважно здійснюються за спостереженнями рухомих іоносферних збурень (РІЗ), які фактично є іоносферними проявами АГХ [3, 30]. Це пов'язано, у першу чергу, з великою кількістю наявних експериментальних даних. Проте спостереження РІЗ лише опосередковано відображають поширення АГХ, оскільки іоносферна плазма зазнає подвійного контролю з боку динамічних процесів у нейтральній атмосфері та з боку електричного та магнітного полів [11]. Тому для аналізу властивостей АГХ доцільним є використання прямих супутникових вимірювань, які дають інформацію про збурення в нейтральній верхній атмосфері. Проте дослідження АГХ за безпосередніми вимірами параметрів нейтральної атмосфери є обмеженими через недостатню кількість відповідних супутникових місій [4, 23, 24].

Полярні області мають ключове значення для формування енергетичного балансу верхньої атмосфери, оскільки саме тут відбувається найбільш інтенсивний вплив на атмосферу геомагнітних збурень, висипань заряджених частинок, магнітосферно-іоносферних струмових структур та інших чинників космічної погоди [2]. Дослідження взаємодії атмосферних хвиль з вітровими течіями над Антарктикою та Арктикою за даними прямих супутникових вимірювань дозволить глибше зрозуміти ключові механізми формування енергетичного балансу верхньої атмосфери в залежності від змін космічної погоди.

В роботі на великому обсязі даних супутникових вимірювань досліджено просторовий розподіл АГХ у полярній термосфері обох півкуль в залежності від сезону та геомагнітної активності. Отримані результати свідчать про тісну взаємодію хвильових процесів, що спостерігаються над Антарктикою та Арктикою, з вітровими течіями. Ці статистичні закономірності розподілу хвильового поля та його зв'язок з вітровою циркуляцією дадуть новий поштовх для розвитку теорії взаємодії вказаних процесів.

#### АНАЛІЗ ТА ОБРОБКА ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Хвильові процеси в термосфері над Антарктикою і Арктикою досліджувались у параметрах нейтральної атмосфери за даними вимірювань супутника «Dynamics Explorer 2» (DE-2). Супутник DE-2 функціонував на початку 1980-х рр., і відтоді не було запущено жодного іоносферного супутника з подібним обширним комплексом наукової апаратури для прямих вимірювань параметрів нейтрального середовища. Цей комплекс включав квадрупольний мас-спектрометр для вимірів концентрації різних сортів нейтральних частинок [12]. База даних проекту «Dynamics Explorer» з прямими вимірюваннями атмосферних параметрів на висотах термосфери є унікальною для вивчення АГХ.

Висота орбіти супутника DE-2 впродовж місії змінювалась в інтервалі 250...1010 км, нахил становив 89.9°, період обертання — близько 98 хв. Завдяки такій конфігурації супутник на кожному витку перетинав весь діапазон географічних широт, зокрема полярні області обох півкуль. АГХ досліджувались за варіаціями концентрацій нейтральних атмосферних компонентів: атомарного кисню (O) і молекулярного азоту (N<sub>2</sub>) на ділянках витків супутника DE-2 нижче 500 км. Дані взято з бази [ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft\\_data](ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data), де представлено усереднені за 1 с вимірювання концентрацій для періоду з 15 серпня 1981 р. по 16 лютого 1983 р.

Реєстрація хвильових збурень концентрації нейтральних частинок ускладнюється значними фоновими перепадами концентрацій при зміні висоти орбіти супутника (рис. 1а). Так, на певній ділянці витка (рис. 1) супутник у момент часу  $UT = 18.15^h$  пролітав поблизу півден-

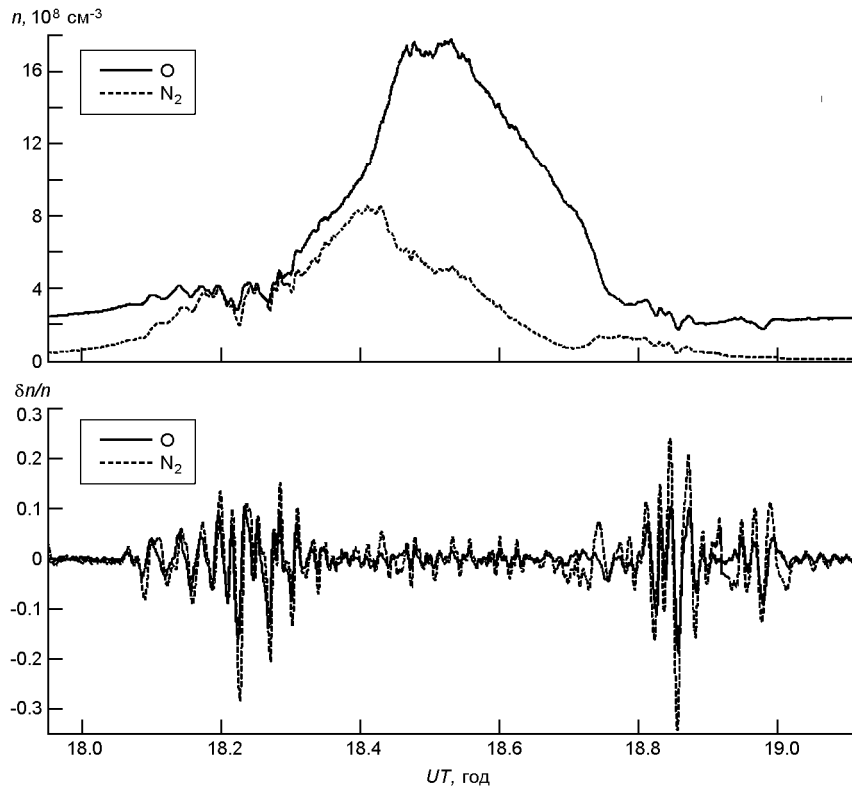


Рис. 1. Хвильові збурення на витку 8050 супутника DE-2: вихідні ряди вимірювань концентрацій  $n$  O і  $N_2$  та відносні флуктуації концентрацій  $\delta n/n$  після виключення тренду

ного полюса на висоті близько 330 км, поступово знижуючись до майже 240 км над екваторіальними областями. Потім висота орбіти знову збільшувалась, і у момент  $UT = 18.85^h$  супутник пролітав поблизу північного полюса на висоті 360 км. Такі зміни висоти орбіти приблизно на 100 км зумовили значне збільшення фонових концентрацій обох розглядуваних газів у центральній частині рис. 1а згідно з барометричним розподілом концентрацій. Відмітимо, що хвильові збурення над обома полярними шапками добре помітні на фоні низькочастотних трендів навіть без попередньої обробки.

Наступним кроком було відокремлення хвильових флуктуацій від великомасштабних змін, пов'язаних з добовим, географічним ходом параметрів, зміною висоти орбіти тощо. Для цього використано метод ковзного середнього. Згідно з цим методом вихідний ряд вимірюваних величин  $x_i$  спочатку згладжується, потім з вихідних даних віднімається згладжений ряд  $\bar{x}_i$ , і надалі аналізується різниця  $x_i - \bar{x}_i$ . Ця різниця включає хвильові флуктуації, а також шуми і випадкові зміни як фізичної природи, так і технічного походження. При відокремленні флуктуацій, викликаних поширенням АГХ, дуже важливим є вибір вікна усереднення. Якщо вибрати вікно занадто широким, то в отри-

маному ряді  $x_i$  будуть проявлятися складові, не пов'язані з хвильовими збуреннями. Якщо вікно занадто вузьке, тоді втрачається інформація про АГХ. Наявність синхронних вимірювань в різних параметрах дозволяє застосувати для виділення хвильових форм певний фізичний критерій. Для цього розглянемо синхронні вимірювання концентрацій двох газів O і N<sub>2</sub>, що переважають у термосфері. Великомасштабні тренди концентрацій всіх атмосферних газів, хоч і пов'язані певним чином (наприклад, зменшуються з висотою і збільшуються в денних умовах), але в цілому корелюють слабо. Водночас флуктуації АГХ повинні показувати високу кореляцію для різних сортів газів, оскільки відображають одну й ту ж саму хвилю. Цей факт ми використали як фізичний критерій для відокремлення хвильових варіацій від інших типів змін параметрів. Розміри вікна вибирались з умови максимального коефіцієнта кореляції між рядами  $x_i(N_2)$  і  $x_i(O)$ . Відокремлені таким способом хвильові флуктуації показано на рис. 1б. Видно, що над південною і північною полярними областями хвильова активність дуже збільшується. Протяжність таких збурених областей на окремих витках становить 3...5 тис. км. Горизонтальні масштаби збурень 400...700 км, що відповідає середньомасштабним АГХ. Узгоджений характер хвильових флуктуацій у двох сортах газів свідчить про коректність процедури виключення тренду. Відмітимо, що відносні амплітуди флуктуацій більші в N<sub>2</sub>, ніж в O. Такі особливості є характерними для АГХ, що важливо для ідентифікації цих збурень у спостереженнях [6, 16].

Відмінності між профілями коливань у різних газах зумовлені різними висотними розподілами концентрацій частинок різних мас вище турбопаузи. При зміщенні елементарного об'єму газу на деяку висоту (для АГХ у верхній атмосфері — зазвичай від сотень метрів до кількох кілометрів) зміна фонові концентрації для важчих газів є більшою. Це зумовлює більші відносні амплітуди флуктуацій N<sub>2</sub> (28 а. о. м.) порівняно з O (16 а. о. м.) [6, 16].

### ПРОСТОРОВИЙ ЗВ'ЯЗОК АГХ З АВРОРАЛЬНИМ ОВАЛОМ

Для дослідження просторового розподілу полярних АГХ було проаналізовано дані вимірювань за весь період місії DE-2 з вересня 1981 р. по лютий 1983 р. Орбіта супутника була сонячно-синхронною, проте завдяки її повільній прецесії спостереженнями були охоплені практично всі годинні пояси. Систематичність вивчення глобального розподілу хвильової активності ускладнювалась зміною висоти орбіти (еліптична з апогеєм близько 1000 км і перигеєм 240 км на початку місії). Оскільки АГХ впевнено реєструвались не вище 500 км, зрозуміло, що в різні періоди умови для спостереження південної і північної полярних областей були нерівноцінними. В окремі місяці супутник перебу-

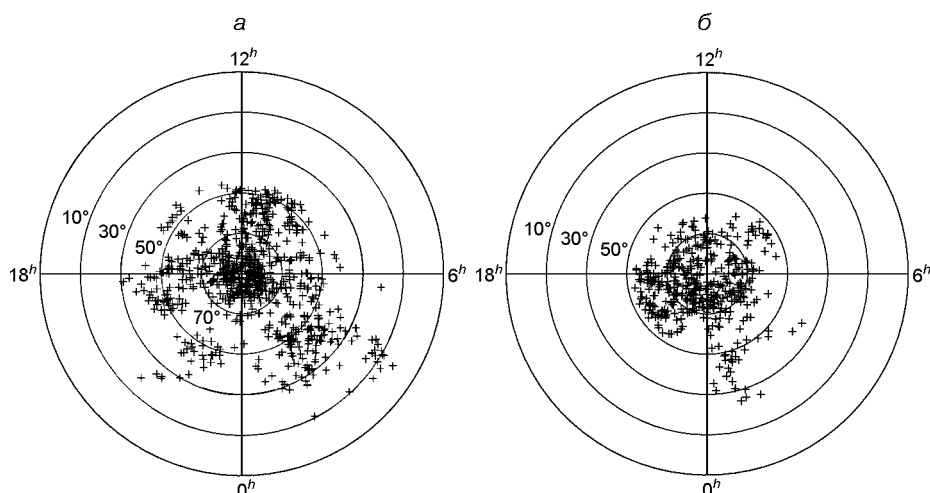


Рис. 2. Границі полярних АГХ в геомагнітних координатах: північна (а) і південна (б) півкулі

вав надто високо, пролітаючи полярні шапки, а мінімум висоти орбіти припадав на низькі широти. Найсприятливіші умови для спостереження полярних АГХ склалися наприкінці місії DE-2 в січні — лютому 1983 р., коли супутник знизився настільки, що можна було досліджувати хвильову активність над обома полярними шапками на одному й тому ж витку. Всього було відібрано і проаналізовано більше тисячі витків супутника DE-2. Результати аналізу показують систематичне збільшення активності АГХ у полярних областях обох півкуль. Амплітуди АГХ у полярній термосфері становлять 3...10 % у відносних флуктуаціях концентрації  $O$ . У середніх широтах фоновий рівень коливань АГХ не перевищує 1 %, за винятком локальних цугів, викликаних окремими потужними джерелами [4]. Тому прийmemo умову  $n(O)/n(O) > 1\%$  як границю області підвищеної полярної хвильової активності.

Особливості просторового розподілу АГХ для південної та північної півкуль представлено на рис. 2. В геомагнітних координатах (інваріантна широта і магнітний місцевий час) показано приблизні границі, коли амплітуда полярних АГХ зрівнюється з фоновим рівнем (1 %). Ці границі демонструють виражений просторовий зв'язок з авроральним овалом в денному секторі, фактично заповнюючи овал зсередини. Проте в нічному секторі область підвищеної хвильової активності може простягатися до 10...20° геомагнітної широти. Представлені на рис. 2 інтегральні розподіли для обох півкуль в загальних рисах узгоджуються з результатами, які були отримані раніше в роботі [5] для значно меншої кількості витків. Розподіли АГХ на рис. 2 показано для обох півкуль незалежно від сезону та геомагнітної активності. Нижче ми детальніше проаналізуємо поведінку АГХ в різних умовах.

## СЕЗОННІ ОСОБЛИВОСТІ ХВИЛЬОВОГО РОЗПОДІЛУ

Для детального аналізу розподілу АГХ розглянемо північну і південну полярні області в різні сезони. На рис. 3 показано результати для умов полярного дня і полярної ночі у прямокутній системі координат, в якій більш детально видно високоширотні області. Кількість вдалих прольотів супутника над північною полярною областю була більшою, чим пояснюється більша кількість точок в отриманих розподілах. З рис. 3 видно, що у періоди, коли шапки були освітлені Сонцем, полярна хвильова активність може простягатися далеко за межі аврорального овалу аж до низьких геомагнітних широт. У південній півкулі в розподілі хвильової активності низькоширотні «хвости» проявляються у вересні — березні (рис. 3г). У північній півкулі подібні «хвости» у розподілі спостерігаються у березні — вересні (рис. 3а).

На рис. 4 наведено розподіли хвильової активності у полярних областях окремо для зимових та літніх місяців. На відміну від рис. 3, на рис. 4 виключено весняний та осінній періоди. Видно, що у червні — серпні та грудні — лютому границі полярних АГХ локалізуються у досить вузькій смузі по широті. Додаткове врахування весняних та осінніх місяців призводить до «розмивання» границь по геомагнітній широті. Відмітимо, що особливість розподілу у вигляді низькоширотних «хвостів» є характерною саме для літніх місяців. При цьому нічний «хвіст» у північній півкулі зміщений ближче до вранішніх годин, ніж у південній півкулі (рис. 4а, 4г). У грудні — лютому над північною шапкою (рис. 4б), а в червні — серпні — над південною шапкою (рис. 4в) ці хвости майже зникають або стають помітно коротшими. В інші сезони полярні АГХ, як правило, обмежуються знизу (з боку екватора) геомагнітними широтами  $50...70^\circ$  вночі і  $60...80^\circ$  вдень (рис. 4б, 4в).

Звернемо увагу на деякі відмінності розподілу, показаного на рис. 4г над S-шапкою з результатами, отриманими раніше. Згідно з роботою [5] хвости над південною шапкою були більш протяжними в напрямку до екватора. Мабуть, це пов'язано з тим, що в нашій роботі не враховано вторинні цуги АГХ, які спостерігаються інколи у грудні — лютому над південною шапкою. Після того як хвильова активність зменшується по амплітуді до 1 %, і фіксується при автоматичній обробці як границя, інколи знову спостерігається збільшення амплітуд АГХ з екваторіального боку овалу у вигляді вторинних хвильових цугів. У роботі [5] випадки вторинних цугів у січні над Антарктикою було враховано. Надалі ми плануємо аналізувати не тільки границі, а й розподіл амплітуд АГХ над полярними областями та в глобальному масштабі в цілому. При такому розгляді вторинні цуги будуть враховані, як і можливі локальні хвильові збурення у середніх та низьких широтах.

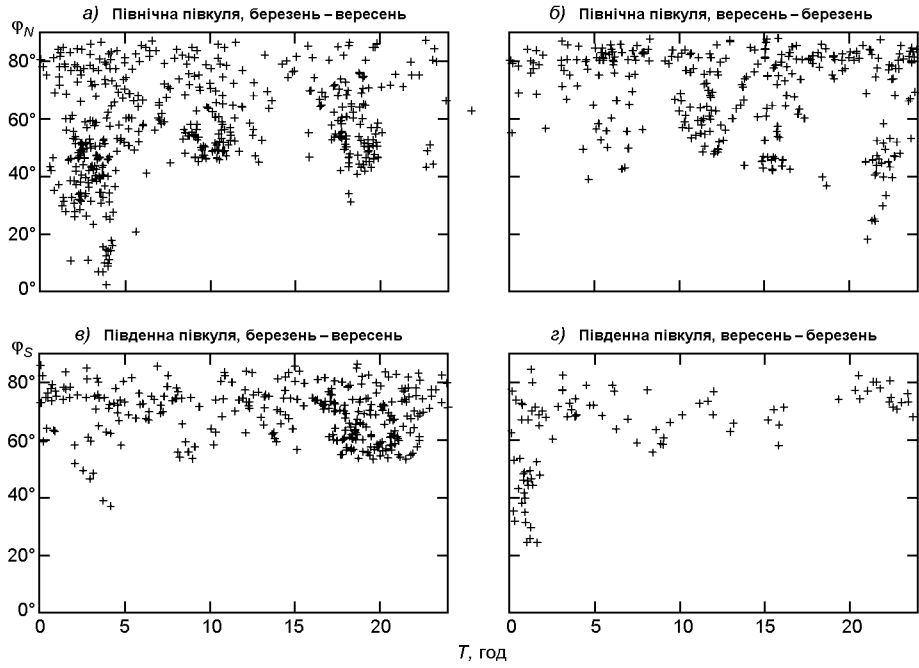


Рис. 3. Розподіл АГХ у обох полярних областях в залежності від умов освітленості Сонцем

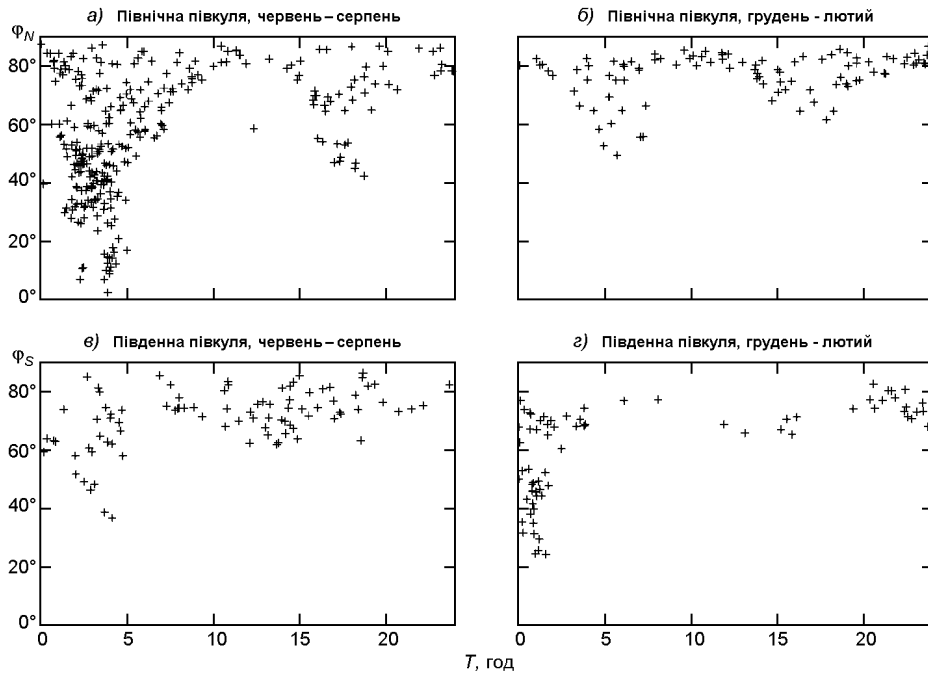


Рис. 4. Розподіл полярних АГХ у зимові та літні місяці



## ЗАЛЕЖНІСТЬ ВІД ГЕОМАГНІТНОЇ АКТИВНОСТІ

Традиційно з геомагнітною активністю пов'язують великомасштабні АГХ (з довжинами до кількох тисяч кілометрів), які виникають під час потужних геомагнітних бур. Частота появи великомасштабних АГХ корелює з геомагнітною активністю [21, 22]. Розглядувані в нашій роботі середньомасштабні АГХ (з довжинами в кілька сотень кілометрів) спостерігалися систематично при різних рівнях геомагнітної активності. При цьому прямої залежності амплітуд АГХ від  $K_p$ -індексу не прослідковується. Ми спробували дослідити можливі зміни розподілу середньомасштабних полярних АГХ, пов'язані з геомагнітною активністю. На рис. 5 для обох півкуль одночасно показано розподіли АГХ при  $K_p \geq 4$  і  $K_p < 4$ . У південній півкулі прослідковується тенденція до укорочення «хвостів» у нічні години при збільшенні  $K_p$ -індексу. У північній півкулі подібна тенденція також є, проте вона менше виражена. До того ж, у північній півкулі, навпаки, «хвости» подовжуються у вечірні години при збільшенні  $K_p$ -індексу. В усякому випадку зрозуміло, що при зміні геомагнітної активності відбувається певна перебудова розподілів полярних АГХ, проте ця перебудова є досить складною. Для уточнення змін у розподілі АГХ потрібні додаткові дослідження, зокрема коректне відокремлення сезонних залежностей та врахування орієнтації  $B_y$ -складової міжпланетного магнітного поля.

## ЗВ'ЯЗОК ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ АГХ З ВІТРОВИМИ ТЕЧІЯМИ

Полярна термосфера характеризується надзвичайно складною динамікою, зокрема АГХ над Антарктикою і Арктикою систематично спостерігаються на фоні потужних атмосферних вітрових течій. У цих областях створюються унікальні умови, де прояви взаємодії атмосферних динамічних процесів різних масштабів є дуже наочними. Тому ми припускаємо, що досліджувані в роботі розподіли полярних АГХ мають бути пов'язані з вітровими течіями.

Горизонтальна неоднорідність вітрових течій над Антарктикою і Арктикою головним чином зумовлена двома великими полярними вихорами з середніми горизонтальними масштабами в декілька тисяч кілометрів [25]. Ці вихори формуються в ранковому і вечірньому секторах полярної термосфери внаслідок залучення нейтральних частинок у конвективні рухи іоносферної плазми. Поміж вихорами виникає сильний просторово неоднорідний потік зі швидкостями порядку 300...700 м/с, швидкість і напрямок якого залежить від сонячної та геомагнітної активності [25, 26]. Такі швидкості вітрів є максимальними за величиною в земній атмосфері. Цей збурений потік накладається на звичайну сонячну вітрову циркуляцію, спричинену поглинанням сонячного ультрафіолетового випромінювання, швидкість якого на ви-

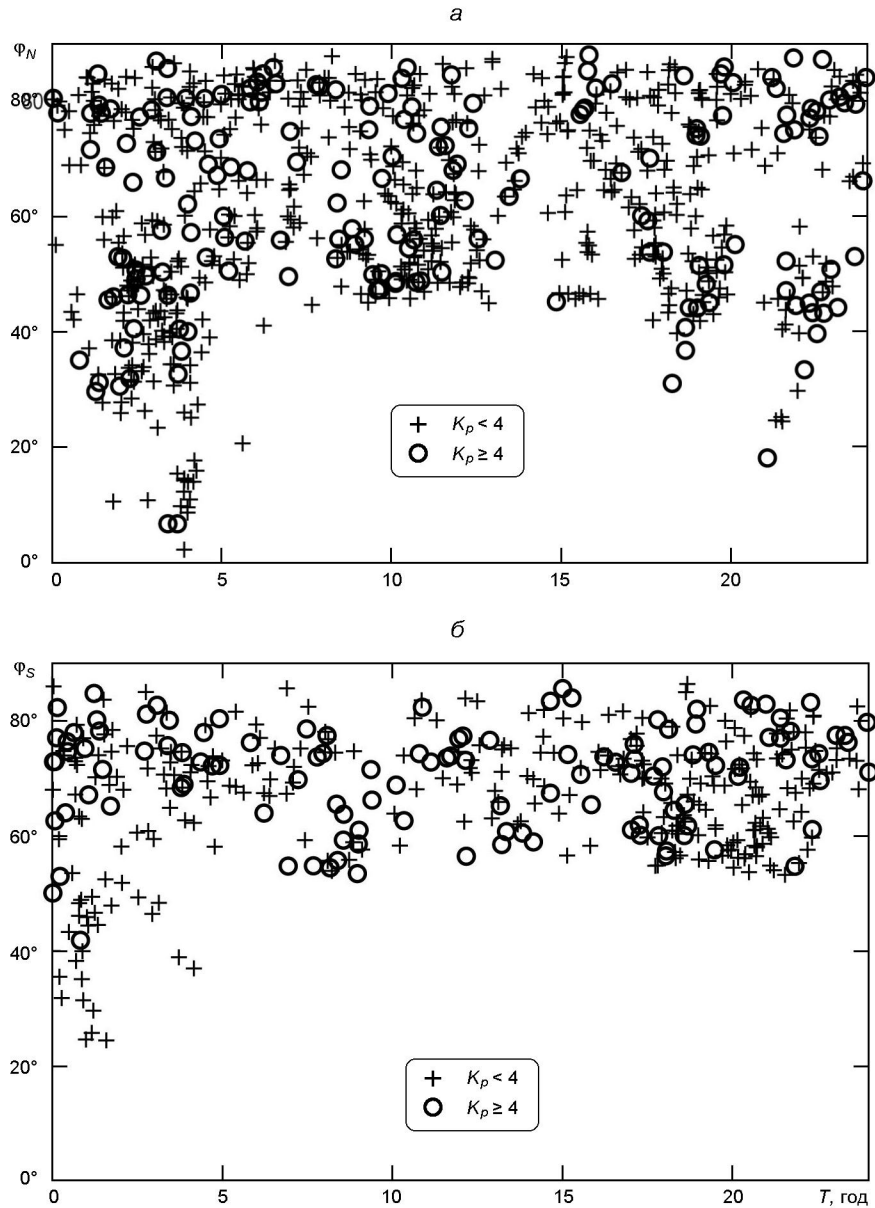


Рис. 5. Границі полярних АГХ в залежності від рівня геомагнітної активності у північній (а) та південній (б) півкулях

сотах термосфери зазвичай не перевищує 250 м/с. Суперпозиція цих двох вітрових систем дає складну конфігурацію, яка змінюється в залежності від часу доби, сезону, сонячної та геомагнітної активності. В результаті структура вітрів у полярній термосфері більшою мірою визначається процесами магнітосферо-іоносферної взаємодії, ніж умовами інсоляції. Подібні складні вітрові структури формуються в термосфері обох півкуль Землі.

Ми вважаємо, що саме такі високошвидкісні просторово неоднорідні вітрові потоки визначають особливості поширення АГХ у поляр-

ній термосфері. На це вказують результати наших досліджень розподілу хвильового поля АГХ у глобальному масштабі, а також наявність певних виділених спектральних масштабів і азимутів, що було встановлено раніше [5]. Було проведено теоретичні дослідження взаємодії АГХ з горизонтально неоднорідними течіями у наближенні слабкої неоднорідності [17]. Результати цих досліджень показали, що хвилі, які поширюються в неоднорідній течії, обмінюються енергією з середовищем. При цьому зустрічні хвилі відбирають енергію у середовища, збільшуючись по амплітуді. Попутні з вітром хвилі, навпаки, віддають енергію середовищу, і тому швидко затухають [17]. Згідно з такою інтерпретацією у спостереженнях мають переважати підсилені по амплітуді АГХ, що рухаються назустріч вітру.

Найбільш сприятливі умови для формування низькоширотних хвостів у розподілі полярних АГХ виникають при умові освітлення Сонцем і низькій геомагнітній активності. В такі періоди у циркуляції полярної термосфери переважає вітрова течія в напрямку від Сонця. Полярні АГХ вишиковуються вздовж цієї течії, рухаючись їй назустріч. В умовах полярної ночі, а також під час геомагнітних збурень, активізується вихрова циркуляційна система, а вітрова течія від Сонця стає нестійкою. Така перебудова вітрової циркуляції в загальних рисах відображає просторову картину розподілу полярних АГХ.

## ВИСНОВКИ

За даними вимірювань концентрацій нейтральних частинок на супутнику «Dynamics Explorer 2» досліджено просторовий розподіл середньомасштабних АГХ у полярних областях термосфери (250...500 км). Над полярними регіонами обох півкуль систематично спостерігаються хвильові збурення, амплітуди яких у відносних флуктуаціях концентрації становлять 5...10%, що на порядок перевищує амплітуди хвиль у середніх широтах. Ці збурення мають типові для середньомасштабних АГХ горизонтальні масштаби 400...700 км. Характер коливань у різних параметрах узгоджується з теоретичними уявленнями щодо атмосферних гравітаційних хвиль. Протяжність збурених областей над Антарктикою і Арктикою в середньому становить 3...5 тис. км.

На великому обсязі експериментальних даних проаналізовано просторовий розподіл АГХ у полярних областях в залежності від умов освітлення Сонцем та геомагнітної активності. Встановлено сезонні особливості розподілу хвильового поля в термосфері над Антарктикою та Арктикою. Показано, що основна хвильова активність зосереджена всередині аврорального овалу. Проте в нічні години у літні місяці протяжність збурених областей є значно більшою. Так, вночі над Антарктикою у грудні — лютому, і над Арктикою у червні — серпні збурена АГХ область простягається до низьких геомагнітних широт.

В зимові місяці активність полярних АГХ переважно обмежується високими геомагнітними широтами. Навесні і восени локалізація границь хвильової активності стає більш розмитою по геомагнітній широті, що більш відчутно у північній полярній області. В цілому особливості сезонних розподілів АГХ над Антарктикою і Арктикою мають симетричні риси, проте є і відмінні особливості, які потребують уточнення.

Залежність від геомагнітної активності проявляється не так чітко, як сезонні зміни. Проте помічено, що зі зміною  $K_p$ -індексу також відбувається певна перебудова розподілу полярних АГХ, характер якої потребує подальших досліджень.

Отримані результати щодо просторового розподілу АГХ вказують на зв'язок цих хвиль з вітровою циркуляцією у полярній термосфері. Перебудова вітрової циркуляції при зміні умов інсоляції та геомагнітної активності відображається у просторовій картині розподілу АГХ.

Роботу виконано за фінансової підтримки Державної установи Національний антарктичний науковий центр МОН України (Договір № Н/05-2021) та часткової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера».

1. Едемский И. К., Ясюкевич А. С. Наблюдения волновых пакетов в ПЭС, генерируемых солнечным терминатором, у периоды действия тайфунов. *Солнечно-земная физика*. 2018. 4. № 2. Р. 33—40. DOI: 10.12737/szf-42201806.
2. Ладиков-Роев Ю. П., Черемных О. К., Федоренко А. К., Набивач В. Е. Акустико-гравитационные волны в вихревой полярной термосфере. *Проблемы управления и информатики*. 2015. №5. С. 74—84.
3. Сопин А. А., Ямпольский Ю. М., Пазнухов В. В. и др. Ионосферный отклик на распространение АГВ по данным ГНСС измерений и когерентного ВЧ зондирования над антарктическими станциями Вернадский и Палмер. *Український антарктичний журнал*. 2016. 15, С. 50—59.
4. Федоренко А. К., Беспалова А. В. Жук И. Т., Крючков Е. И. Широтные особенности акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере по данным спутниковых измерений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2017. 57, №4, С. 510—521.
5. Федоренко А. К. Крючков Е. И. Распределение среднемасштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. 51, №1. Р. 527—539.
6. Федоренко А. К., Крючков Е. И. Наблюдаемые особенности акустико-гравитационных волн в гетеросфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54, № 1. С. 116—123.
7. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Динаміка падіння Челябінського метеороїда: розміри, випромінювання та руйнування. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2021. 37, № 5. С. 58—81.
8. Agapitov O., Cheremnykh O. K. Natural oscillations of the Earth magnetosphere associated with solar wind sudden impulses. *Ukrainian J. Phys.* 2008. 53(5). Р. 508—512.

9. Beer T. *Atmospheric Waves*. John Wiley, New York, 1974. 300 p.
10. Bespalova A. V., Fedorenko A. K., Cheremnykh O. K., Zhuk I. T. Satellite observations of wave disturbances caused by moving solar terminator. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2016. 140. P. 79—85. doi:10.1016/j.jastp.2016.02.012.
11. Cai H. T., Yin F., Ma S. Y., McCrea I. W. Observations of AGW/TID propagation across the polar cap: a case study. *Ann. Geophys.* 2011. 29. P. 1355—1363. doi.org/10.5194/angeo-29-1355-2011.
12. Carignan G. R., Block B. P., Maurer J. C., Hedin A. E., Reber C. A., Spencer N. W. The neutral mass Spectrometer on Dynamics Explorer. *Space Sci. Instrum.* 1981. 5. P. 429.
13. Cheremnykh O. K., Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Selivanov Y. A. Evanescent acoustic-gravity modes in the isothermal atmosphere: systematization, applications to the Earth's and Solar atmospheres. *Ann. Geophys.* 2019. 37, N3. P. 405—415.
14. Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. Influence of ionospheric conductivity on the ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth. *Adv. Space Res.* 2006. 37(3). P. 599—603.
15. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y., Luo Y. Supertyphoon Hagibis action in the ionosphere on 6—13 October 2019: Results from multi-frequency multiplepath sounding at oblique incidence. *Advances in Space Res.* 2021. 67, Is. 8. P. 2439—2469. doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.038.
16. Dudis J. J., Reber C. A. Composition effects in thermospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.* 1976. 3, №12. P.727—730.
17. 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. Solar. Terr. Phys.* 2018. 178. P. 17—23. doi.org/10.1016/j.jastp.2018.05.009.
18. Fitzgerald T. J. Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. 59, № 7. P. 829—834.
19. Gossard E. E., Hooke Y. X. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation*. Developments in Atmospheric Science. Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. 456 p.
20. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 201. *Radio Sci.* 2020. 55, N. 2. e2019RS006866. doi.org/10.1029/2019RS006866.
21. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982-1995. *Ann. Geophys.* 1996. 14. P. 917—940.
22. Hunsucker R. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. 20. P. 293—315.
23. Innis J. L., Conde M. Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data. *J. Geophys. Res.* 2002. 107, A12, doi: 10.1029/2002JA009370.
24. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., Coley W. R., Carignan G. R., Spencer N. W. Gravity waves near 300 km over the polar caps. *J. Geophys. Res.* 1995. 100. P. 23993—24002.
25. Killeen T. L., Won Y. I., Niciejewski R. J., Burns A. G. Upper thermosphere winds and temperatures in the geomagnetic polar cap: Solar cycle, geomagnetic activity, and interplanetary magnetic fields dependencies. *J. Geophys. Res.* 1995.100. P. 21327—21342.

26. Lühr H., Rentz S., Ritter P., Liu H., Häusler K. Average thermospheric wind pattern over the polar regions, as observed by CHAMP. *Ann. Geophys.* 2007. 25. P. 1093—1101. [www.ann-geophys.net/25/1093/2007](http://www.ann-geophys.net/25/1093/2007).
27. Plougonven R., Zhang F. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts. *Rev. Geophys.* 2014. 52. P. 1—37.
28. Pulnits S., Boyarchuk K. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*, Springer Science & Business Media, 2004, ISBN 3540208399, 9783540208396, 315 p.
29. 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.
30. Shun-Rong Zhang, Erickson P. J., Coster A. J., et al. Subauroral and Polar Traveling Ionospheric Disturbances During the 7-9 September 2017 Storms. *Space Weather.* 2019. 17, Is.12. P. 1748—1764. DOI:10.1029/2019SW002325.

#### REFERENCES

1. Edemsky I. K., Yasyukevich A. S. (2018) Observing wave packets generated by solar terminator in TEC during typhoons. *Solar-Terr. Phys.* 2. 33—40 (In Russian).
2. Ladikov-Royev Yu. P., Cheremnykh O. K., Fedorenko A. K., Nabivach V. E. (2015) Acoustic-gravity waves in whirling polar atmosphere. *J. Automation and Information Sci.* 47 (9). 10—22 (In Russian).
3. Sopin A. A., Yampolski Yu. M., Paznukhov V. V., et al. (2016) Ionospheric response to AGW propagation detected using GNSS measurements and coherent HF sounding over “Vernadsky” and “Palmer” Antarctic stations. *Ukrainian Antarctic J.* 15, 50—59 (In Russian).
4. Fedorenko A. K., Bespalova A. V., Zhuk I. T., et al. (2017) Latitude variability of acoustic-gravity waves in the upper atmosphere based on satellite data. *Geomagn. Aeron.* 57. 471—481. doi.org/10.1134/S0016793217030057 (In Russian).
5. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I. (2011) Distribution of medium-scale acoustic gravity waves in polar regions according to satellite measurement data. *Geomagn. Aeron.* 51(4), 520—533. doi.org/10.1134/S0016793211040128 (In Russian).
6. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I. (2014) Observed features of acoustic gravity waves in the heterosphere. *Geomagn. Aeron.* 54. 109—116. doi.org/10.1134/S0016793214010022 (In Russian).
7. Chornogor L. F., Milovanov Y. B. (2021) Dynamics of the fall of the Chelyabinsk meteoroid: size, radiation and destruction. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 37 (5). 58—81. (In Ukrainian)
8. Beer T. (1974) *Atmos. Waves*. John Wiley, New York, 300.
9. Agapitov O., Cheremnykh O. K. (2008) Natural oscillations of the Earth magnetosphere associated with solar wind sudden impulses. *Ukrainian J. Phys.* 53(5). 508—512.
10. 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. and Solar-Terr. Phys.* 140. 79—85. doi:10.1016/j.jastp.2016.02.012.
11. Cai H. T., Yin F., Ma S. Y., McCrea I. W. (2011) Observations of AGW/TID propagation across the polar cap: a case study. *Ann. Geophys.* 29. 1355—1363. doi.org/10.5194/angeo-29-1355-2011.
12. Carignan G. R., Block B. P., Maurer J. C., et al. (1981) The neutral mass Spectrometer on Dynamics Explorer. *Space Sci. Instrum.* 5. 429.
13. Cheremnykh O. K., Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Selivanov Y. A. (2019) Evanescent acoustic-gravity modes in the isothermal atmosphere: systematization, applications to the Earth’s and Solar atmospheres. *Ann. Geophys.* 37 (3). 405—415. doi.org/10.5194/angeo-37-405—2019.

14. Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. (2006) Influence of ionospheric conductivity on the ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth. *Adv. Space Res.* 37(3). 599—603.
15. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., et al. (2021) Supertyphoon Hagibis action in the ionosphere on 6—13 October 2019: Results from multi-frequency multiplepath sounding at oblique incidence. *Advances in Space Res.* 67(8). 2439—2469. doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.038.
16. Dudis J. J., Reber C. A. (1976) Composition effects in thermospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.* 3 (12). 727—730.
17. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Klymenko Yu. O., Yampolski Yu. M. (2018) Peculiarities of acoustic-gravity waves in inhomogeneous flows of the polar thermosphere. *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.* 178. 17—23. doi.org/10.1016/j.jastp.2018.05.009.
18. Fitzgerald T. J. (1997) Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 59 (7). 829—834.
19. Gossard E. E., Hooke Y. X. (1975) *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation*. Developments in Atmospheric Science. Elsevier Scientific Pub. Co., 456.
20. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2020) Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 201. *Radio Sci.* 55 (2). doi.org/10.1029/2019RS006866.
21. Hocke K., Schlegel K. A. (1996) review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982-1995. *Ann. Geophys.* 14. 917—940.
22. Hunsucker R. (1982) Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review. *Rev. Geophys. Space Phys.* 20. 293—315.
23. Innis J. L., Conde M. (2002) Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data. *J. Geophys. Res.* 107 (A12) doi: 10.1029/2002JA009370.
24. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., et al. (1995) Gravity waves near 300 km over the polar caps. *J. Geophys. Res.* 100. 23993—24002.
25. Killeen T. L., Won Y. I., Nicieyewski R. J., Burns A. G. (1995) Upper thermosphere winds and temperatures in the geomagnetic polar cap: Solar cycle, geomagnetic activity, and interplanetary magnetic fields dependencies. *J. Geophys. Res.* 100. 21327—21342.
26. Lühr H., Rentz S., Ritter P., Liu H., Häusler K. (2007) Average thermospheric wind pattern over the polar regions, as observed by CHAMP. *Ann. Geophys.* 25. 1093—1101. www.ann-geophys.net/25/1093/2007.
27. Plougonven R., Zhang F. (2014) Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts. *Rev. Geophys.* 52. 1—37.
28. Pulnits S., Boyarchuk K. (2004) *Ionospheric Precursors of Earthquakes*, Springer Science & Business Media, ISBN 3540208399, 315.
29. 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.
30. Shun-Rong Zhang, Erickson P. J., Coster A. J., et al. (2019) Subauroral and Polar Traveling Ionospheric Disturbances During the 7-9 September 2017 Storms. *Space Weather.* 17 (12). 1748—1764. DOI:10.1029/2019SW002325.

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

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

SEASONAL FEATURES OF THE SPATIAL DISTRIBUTION  
OF ATMOSPHERIC GRAVITATIONAL WAVES  
IN THE EARTH'S POLAR THERMOSPHERE

Features of the spatial distribution of atmospheric gravity waves (AGW) in the polar thermosphere Earth were investigated. Research is based on data of the direct satellite measurements of the neutral atmosphere parameters. AGW is systematically observed in the polar regions of both hemispheres according to the analyzed data. Amplitudes of the AGW in these regions are usually much greater than the amplitudes of the waves in the middle and low latitudes. At the same time polar AGW with large amplitudes are registered against the background of high-velocity spatially inhomogeneous wind flows that indicate their possible amplifying due to interaction with the wind. Based on the analysis of measurement data on the Dynamics Explorer 2 satellite, the relationship between the spatial distribution of atmospheric gravitational waves and the auroral oval was revealed. Seasonal regularities in the distribution of the wave field over the Antarctic and the Arctic have been established on a large volume of experimental data. A comparative analysis of the features of AGW in the polar thermosphere of both hemispheres was carried out for the conditions of the polar day and polar night. Some differences in the distribution of AGW depending on the  $K_p$ -index are noticed. It has been suggested that the observed seasonal features of the AGW distribution and its dependence on the level of geomagnetic activity are associated with the restructuring of the polar wind circulation when the conditions of solar illumination and geomagnetic conditions change.

**Keywords:** atmospheric gravity wave, polar thermosphere, satellite measurement.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2021

Після доопрацювання 24.09.2021

Прийнята до друку 16.12.2021