



УДК 551.510

Використання вимірів супутника UARS для дослідження варіацій вітру у верхній атмосфері

С.Г. Пилипенко

Кафедра астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка

В роботі проведено дослідження змін динаміки верхньої атмосфери над ураганами. Досліджувалися особливості горизонтальної складової швидкості вітру в діапазоні висот 80–300 км. Аналізувалися дані, отримані за допомогою приладу WINDII (Wind Imaging Interferometer), встановленому на супутнику UARS за 1994 р. над ураганами потужністю 4 і 5 балів по шкалі Саффіра–Сімпсона [9]. При цьому будувалися висотні розподіли зональних і меридіональних складових швидкості. Отримано підсилення динаміки вітрів на висотах до 108 км над потужними тропосферними збуреннями. Оскільки можливим механізмом передачі збурення від тропосфери вгору є атмосферно-гравітаційні хвилі (АГХ), то були чисельно змодельовані флуктуації вертикальної і горизонтальної складової швидкості при їх наявності. Крім того, досліджено зміни складових швидкості при зміні періоду хвилі і горизонтального хвильового числа, а також розглянуто просторові масштаби даних ефектів.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКА UARS ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ВЕТРА В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ, Пилипенко С.Г. — В работе проведено исследование изменений динамики верхней атмосферы над ураганами. Исследовались особенности горизонтальной составляющей скорости ветра в диапазоне высот 80–300 км. Анализировались данные, полученные с помощью прибора WINDII (Wind Imaging Interferometer), установленном на спутнике UARS за 1994 г. над ураганами мощностью 4 и 5 баллов по шкале Саффира–Симпсона [9]. При этом строились высотные распределения зональных и меридиональных составляющих скорости. Получены усиления динамики ветров на высотах до 108 км над мощными тропосферными возмущениями. Поскольку возможным механизмом передачи возмущения от тропосферы вверх является атмосферно-гравитационные волны (АГХ), то были численно смоделированы флуктуации вертикальной и горизонтальной составляющей скорости при их наличии. Кроме того, исследованы изменения составляющих скорости при изменении периода волны и горизонтального волнового числа, а также рассмотрены пространственные масштабы данных эффектов.

APPLICATION OF UARS SATELLITE MEASUREMENTS FOR INVESTIGATION OF WIND VARIATIONS IN THE UPPER ATMOSPHERE, by Pilipenko S.G. — In this work we investigated the change of dynamics of the upper atmosphere over hurricanes. We studied characteristics of the horizontal component of the wind speed within 80–300 km range of altitudes. We analyzed data obtained in 1994 by WINDI (Wind Imaging Interferometer) onboard UARS satellite for hurricane intensities of 4 and 5 points by Saffir–Simpson scale [9]. We plotted the distributions of the zonal and meridional velocity components on height. We found an increase of wind dynamics over strong tropospheric perturbations for altitudes up to 108 km. Acoustic-gravity waves (AGW) may be responsible for propagation of perturbations from the troposphere up, therefore we made a numerical modeling of fluctuations of the vertical and horizontal velocity components when AGW are present in the atmosphere. Moreover, we studied changes of the velocity components due to variation of wave period and horizontal wave number and considered spatial scales of such changes as well.

Ключевые слова: атмосферні гравітаційні хвилі; мезосфера; ураган.

Key words: atmospheric gravity wave; mesosphere; hurricane.

1. ВСТУП

На даний момент існує багато гіпотез відносно можливих механізмів передачі енергії із тропосфери, і навіть літосфери, в верхні шари атмосфери Землі. Серед них можна виділити електромагнітну взаємодію, інфразвукові хвилі, атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ) та ін. [6, 2]. В певній мірі кожен з цих механізмів заслуговує на увагу, і, звичайно ж, тягне за собою цілий ланцюг спостережних явищ і проявів [1, 3].

В рамках даної роботи проведено аналіз змін динаміки верхньої атмосфери над циклонічними утвореннями і розглянуто АГХ — як можливий канал перенесення енергії від тропосфери до іоносферних висот. При цьому досліджено до яких змін в динамічних процесах вони можуть призвести і на яких просторових масштабах проявлятися.

Термосферна циркуляція в основному визначається процесами поглинання жорсткого ультрафіолетового сонячного випромінювання з довжинами хвиль менше 200 нм та динамічними процесами в результаті яких відбувається перерозподіл тепла від неоднорідно розподілених джерел. При розгляді вітру в верхній атмосфері, аналізують рух саме нейтрального газу, який глобальний за масштабом і повільно змінюється з часом.

Таблиця 1. Параметри вимірюваних емісійних ліній

Емісія	Час життя метастабільного рівня, с	Довжина хвилі, нм	Висотний діапазон, км	Висота макс. інтенсивності, км
зелена лінія O(¹ S)	0.8	557.7	нижче 80–110 вище 150–300	97 200
червона лінія O(¹ D)	110	630.0	150–300	250
смуга OH (8–3)	4.2 ms	730.0	80–110	87
смуга O ₂ (0–0)	14	762.0	80–110	94
лінія O ⁺	5	732.0	200–300	150

Інформацію про швидкості вітру на висотах мезосфери отримують переважно шляхом радіолокаційного спостереження за іонізованими метеорними слідами, що утворюються на цих висотах, або за допомогою спостережень методом рознесеного прийому в довгохвильовому діапазоні рухомих іоносферних збурень [5, 7].

До найбільш характерних закономірностей в динаміці атмосфери на висотах 80–100 км можна віднести:

- чітко виражену квазігоризонтальну складову зі значеннями, що досягають 100 м/с, а іноді й більше;
- швидкості меридіонального вітру становлять у середньому 50–75% від швидкостей зонального вітру;
- швидкості істотно залежать від сезону та широти.

Очевидно, що для виявлення ефектів, пов'язаних з тропосферними збуреннями, необхідно виконання ряду умов: циклонічні утворення мають бути потужними, а вимірювання складових швидкості вітру в області даної події повинні охоплювати тривалий період часу. Необхідно мати на увазі, що особливості, викликані тропосферним збуренням, можуть бути замасковані збуреннями іншого походження, а саме сонячною і геомагнітною активністю, сезонно-широтними варіаціями, добовими змінами. Все це, по можливості, враховувалося в даній роботі.

2. ВИКОРИСТАНІ СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ

Для дослідження змін термосферної циркуляції було використано супутникові виміри горизонтальних складових швидкості вітру за 1994 рік.

Значення горизонтальних складових швидкостей вітру отримані на супутнику UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) взяті з архіву GSFC DAAC (NASA Goddard Space Flight Center Distributed Active Archive Center) [10]. Вимірювання супутника включали в себе визначення вертикальних профілів температури, переміщення деяких газів, горизонтальних складових швидкості вітру та потоку сонячної енергії.

Нами використовувалися значення вітру, які були визначені приладом WINDII (Wind Imaging Interferometer). WINDII вимірює вітер, температуру та коефіцієнт емісії у висотному діапазоні 80–300 км. Висотний профіль компонент вітру отримували вимірюючи фотохімічне світіння емісійних ліній параметри яких наведено в табл. 1 [11]. Дані приведені з дискретністю через 4° по широті та 3–5 км по висоті. Каталог ураганів було взято із бази даних [12]. Розглянуто урагани Cyclone 5 (26.12.1993 р. – 21.01.1994 р., –18° широти, 154° довготи) та Cyclone 13 (25.01–05.02.1994 р., –11° широти, 97° довготи).

3. ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ ТА ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Розгляд особливостей зміни меридіональної і зональної складової вітру проводився в зоні з радіусом 1000 км. При цьому аналізувалися безпосередні відхилення компонент швидкості вітру з висотою під час ураганів та порівнювалися із висотним розподілом горизонтальної швидкості для моментів до його виникнення та після повної релаксації (в залежності від наявності вимірів). Найбільш суттєвими виявилися зміни в висотному діапазоні від 80 до 105 км (рис. 1) та (рис. 2). Вище даної області значення компонент швидкості для різних часових моментів порівняно із початком урагану не спостерігалось (знаходилися в межах похибок вимірів супутника (10 м/с)).

Із графіків прослідковується наявність підсилення меридіональної компоненти швидкості вітру в північному напрямку на висотах 85–108 км безпосередньо після урагану. Для зональної компоненти на даних висотах має місце складна залежність в зміні швидкості вітру і важко виділити переважний напрям підсилення. Найбільші флуктуації динамічних рухів в областях до, під час і після найпотужнішої стадії ураганів мали місце саме до висот 108 км.

Для висот більше 108 км спостерігалися незначні зміни меридіональної компоненти швидкості в південному напрямку, а флуктуації зональної компоненти швидкості вітру малі (порядку точності вимірів ~10 м/с).

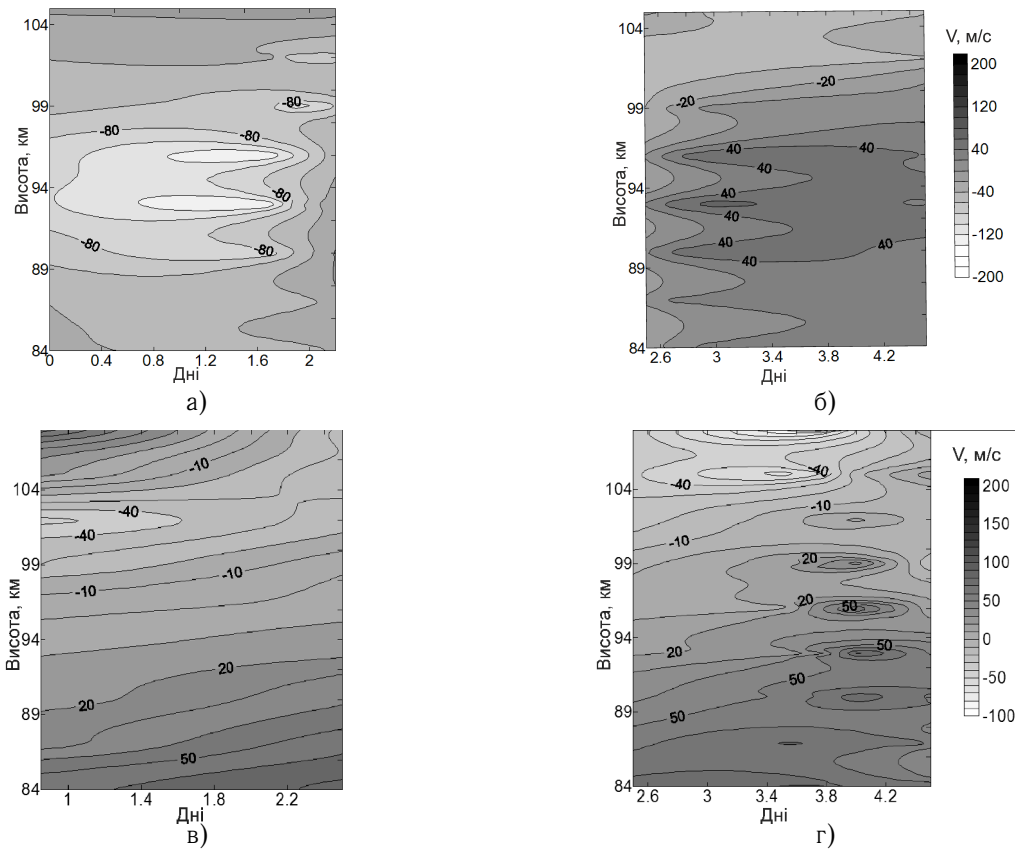


Рис. 1. Значення горизонтальних складових швидкості вітру на різних висотах: а — меридіональна до урагану; б — меридіональна під час урагану; в, г — зональна складова швидкості вітру до та під час урагану Cyclone 5 (01.1994).

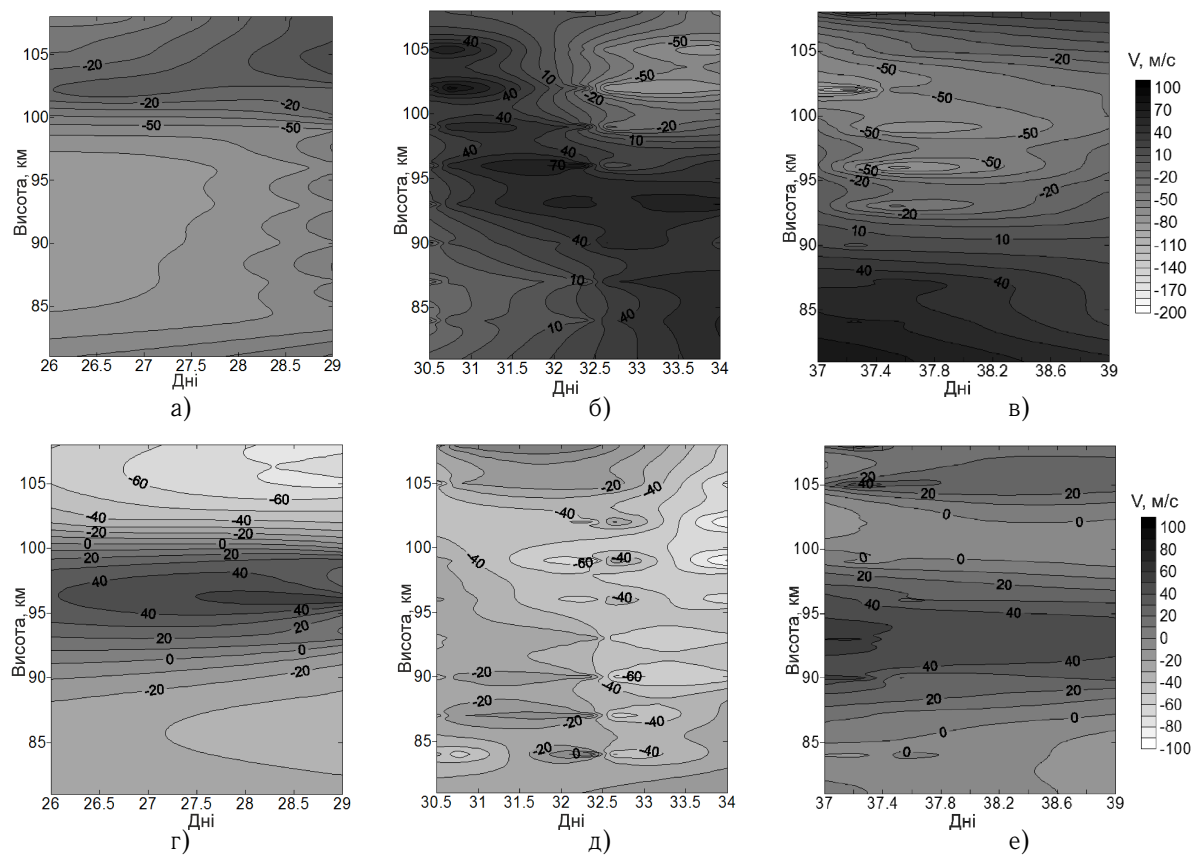


Рис. 2. Значення горизонтальних складових швидкості вітру на різних висотах: а, б, в — меридіональна; г, д, е — зональна складова швидкості вітру до, під час та після урагану Cyclone 13 (02.1994).

Найбільша зміна горизонтальних компонентів швидкості вітру спостерігається на висотах близько 85–100 км.

Для того, щоб впевнитися, що отримані зміни є наслідком саме тропосферних впливів, були розглянуті інші можливі чинники впливу на динаміку верхньої атмосфери — вплив сонячної і геомагнітної активності. На рис. 3 представлені значення потоку сонячного випромінювання на довжині хвилі 10,7 см і тригодинного Кр-індексу для моментів часу виникнення ураганів.

Найбільш потужні стадії розглянутих ураганів відмічені вертикальними лініями на обох рисунках. Із графіків видно, що дані фактори не можуть зумовити отримані зміни термосферної циркуляції.

4. МОДЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ПОШИРЕННЯ АГХ

Зміна зональної і меридіональної складової швидкості вітру може говорити про збільшення динамічних рухів на висотах мезопauзи.

Одним з механізмів, який може бути використаний для пояснення отриманих результатів, є поширення атмосферних гравітаційних хвиль, які генеруються на тропосферних висотах. При адіабатичному

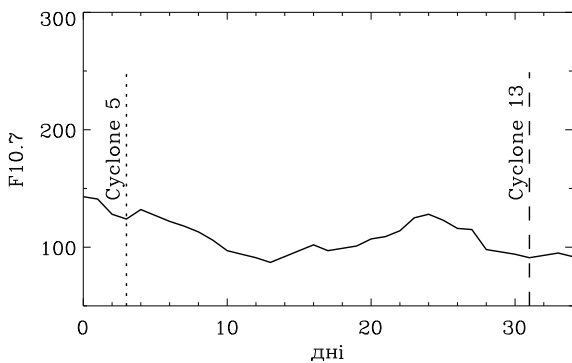


Рис. 3а. Значення потоку випромінювання від Сонця на довжині хвилі 10,7 см для розглянутих ураганів.

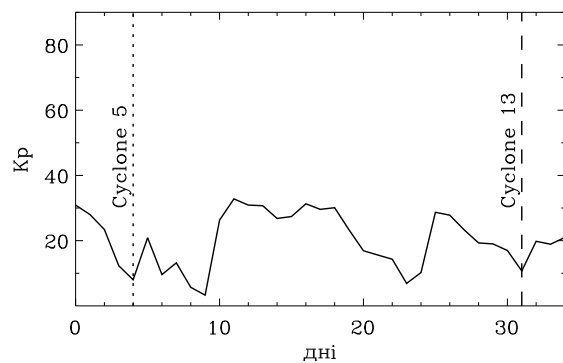


Рис. 3б. Значення тригодинного Кр-індексу для розглянутих ураганів.

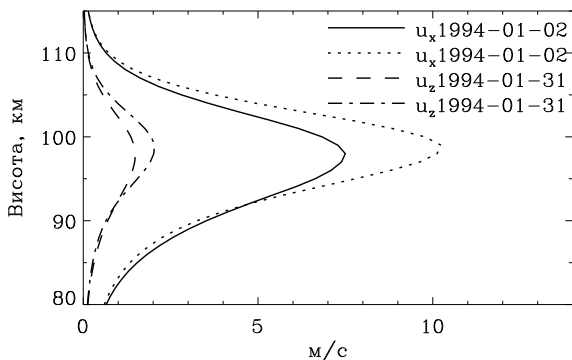


Рис. 4. Модельні розрахунки амплітуди вертикальної та горизонтальної компоненти швидкості АГХ з періодом $T = 65$ хв, $k_x = 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ для днів, коли мали місце урагани.

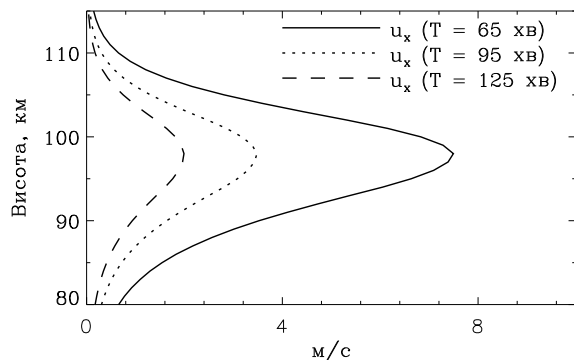


Рис. 5. Модельні розрахунки горизонтальної компоненти швидкості для АГХ з різними періодами та горизонтальним хвильовим числом $k_x = 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ для моменту часу, коли мав місце ураган Cyclone 5.

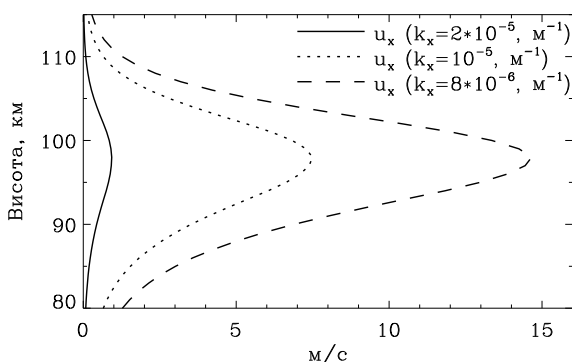


Рис. 6. Модельні розрахунки горизонтальної компоненти швидкості для АГХ з періодом $T = 65$ хв та різними горизонтальними хвильовими числами для моменту часу, коли мав місце ураган Cyclone 5.

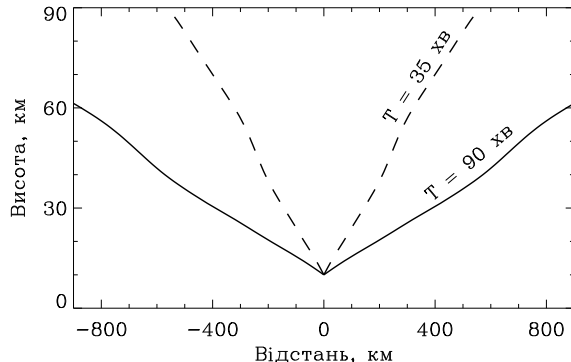


Рис. 7. Траєкторія поширення АГХ від приземного джерела. Штрихована лінія відповідає періоду коливань ($T = 35$ хв). Суцільна — $T = 95$ хв. Горизонтальне хвильове число дорівнює $k_x = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$.

поширенні вгору амплітуда АГХ зростає, так як густина середовища з висотою падає. Тому і виявити ці хвилі легше на великих висотах. На певній висоті вся картина коливань перестане бути стійкою і дрібномасштабні компоненти АГХ затухають.

Фізичний механізм затухання АГХ — турбулізація середовища під дією хвилі, що приводить в кінці кінців, до розігріву верхньої атмосфери за рахунок дисипації енергії хвилі на турбулентній структурі й до виникнення суттєвих, переважно горизонтальних, рухів.

Отже, характерною особливістю АГХ в реальній атмосфері є те, що, досягаючи висот мезосфери, хвилі руйнуючись призводять до локального нагрівання і руху повітря.

Для моделювання змін в динаміці атмосфери розглядаються рівняння Нав'є–Стокса з врахуванням дисипативних процесів. При цьому атмосфера представляється у вигляді однорідних шарів в яких температура, маса, адіабатична стала, прискорення вільного падіння, відношення коефіцієнта в'язкості до густини, та відношення коефіцієнта теплопровідності до густини є сталими. Хвилі в суміжних шарах пов'язуються неперервністю між шарами вертикальної швидкості та вертикального потоку імпульсу [4].

Для моделювання поширення АГХ під час найпотужніших ураганів використовувалися профілі температур і концентрацій основних складових нейтральної атмосфери Землі, взяті з моделі нейтральної атмосфери MSIS-E-90 [8].

За допомогою чисельного моделювання отримано зміну з висотою амплітуди вертикальної і горизонтальної складової швидкості для АГХ з періодами 35, 65 і 95 хвилин і для різних значень горизонтального хвильового числа (рис. 4–6). Значення профілів амплітуди АГХ розраховані для днів 1994 року, коли мали місце розглянуті вище урагани.

З графіків добре простежується, що при вибраних параметрах моделювання хвилі поширюються до висот 120 км, а максимальне значення їх амплітуди відповідає діапазону висот від 90 до 100 км.

При збільшенні періоду коливань максимальне значення амплітуди хвиль зменшується при однаковому горизонтальному хвильовому числі $k_x = 10^{-5} \text{ м}^{-1}$.

При вибраних параметрах моделювання для хвиль з однаковим періодом ($T = 65 \text{ хв}$) спостерігається збільшення амплітуди коливань при зменшенні горизонтального хвильового числа k_x .

Відмінність АГХ від звукових хвиль полягає в тому, що в останніх коливання є чисто поздовжніми, а в випадку АГХ є поперечна складова коливань. Це призводить до того, що хвилі поширюються під кутом до горизонту. Промодельовані траєкторії поширення АГХ різних періодів від тропосферного джерела представлено на рис. 7. Можна відзначити, що при зміні періодів з 35 хв до 90 хв на мезосферних висотах локалізація в горизонтальному напрямі буде відрізнятися на 500–600 км.

5. ВИСНОВКИ

Підводячи підсумки проведеного аналізу, можна вказати на виявлені тенденції у варіаціях термосферної циркуляції над областями потужних ураганів:

При проходженні потужного урагану в нижній атмосфері, на висотах 85 ÷ 108 км спостерігаються підсилення меридіональної компоненти вітру в північному напрямку та флуктуації зональної компоненти.

При модельних розрахунках поширення АГХ виявлено зростання амплітуди коливань на висотах 80 ÷ 110 км, яке призводить до виникнення нестійкостей та руйнування хвиль. Енергія хвиль дисипує в атмосфері на вказаних висотах і впливає на динаміку верхньої атмосфери. Отримані результати вказують на те, що АГХ можуть слугувати механізмом переносу енергії від тропосферних областей у верхню атмосферу та суттєво впливати на поле вітрів в мезосфері.

1. Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Движения в ионосфере. — Новосибирск: Наука, 1979. — 344 с.
2. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992. — 340 с.
3. Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэрономия. — 1996. — **36**, № 2. — С. 111–118.
4. Пилипенко С.Г., Козак Л.В. Аналіз поширення та затухання атмосферних гравітаційних хвиль // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 4. — С. 22–29.
5. Протягин Ю. И., Шпренгер К. Измерение ветра на высотах 90–100 км наземными методами. — Л.: Гидрометеоздат, 1978. — С. 159–167.
6. Dzubenko M.I., Kozak L.V. Aurora activity depression after near seismic shocks // Proceedings of International Symposium: From solar corona through interplanetary space, into Earth's magnetosphere and groundbased observations. — Febr. 1–4, 2000. — Kyiv, Ukraine. — P. 129–131.
7. Fleming E.L., Chandra S., Barnett J.J., Corney M. Zonal mean temperature, pressure, zonal wind and geopotential height as functions of latitude // Adv. Space Res. — 1990. — **10**. — С. 1211–1259.
8. Hedin A.E. Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere // J. Geophys. Res. — 1991. — **96**. — P. 1159–1172.
9. Longshore D. Encyclopedia of Hurricanes, Typhoons, and Cyclones. — New York: Facts on File, Inc., 2008. — 468 p.

10. *Reber C.A., Trevathan C.E., McNeal R.J., Luther M.R.* The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) Mission // J. Geophys. Res. — 1993. — **98**, D6. — P. 10643–10647.
11. *Shepherd G., et al.* WINDII — The Wind Imaging Interferometer on the Upper Atmosphere Research Satellite // J. Geophys. Res. — 1993. — **98**. — P. 10725–10750.
12. База даних ураганів [Електронний ресурс]. — <http://weather.unisys.com/hurricane/>

Надійшла до редакції 13.04.2013

НОВІ ВИДАННЯ



Марченко О.М.

Референсні системи в геодезії: навч. посібник / О.М. Марченко, К.Р. Третяк, Н.П. Ярема. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. — 216 с.

Наведено основні відомості про референсні системи. Описано реалізації земної та небесної систем координат. Розглянуто різні методи перетворення геодезичних координат, а також нормальних висот. Особливу увагу звернуто на реалізацію Європейської вертикальної референсної системи. Описано принципи побудови референсної висотної поверхні на основі методу скінченних елементів.

Для магістрів, які вивчають курс “Геодезичні референсні системи”, та фахівців у цій галузі.

Зміст

Вступ

Розділ 1. Основні визначення та числові стандарти

Розділ 2. Небесна та земна системи координат

Розділ 3. Кінематика тектоніки плит та реалізація земної системи координат

Розділ 4. Визначення параметрів перетворення геодезичних координат

Розділ 5. Висоти. Європейська вертикальна система EVRS

Розділ 6. Перетворення геодезичних координат та нормальних висот методом скінченних елементів