НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

СКОРОХОД ТЕТЯНА ВЛАДИСЛАВІВНА

УДК 551.510.535:551.511.31

ВНУТРІШНІ ГРАВІТАЦІЙНІ ХВИЛІ В ТЕРМОСФЕРІ ЗА ДАНИМИ ПРЯМИХ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Лізунов Георгій Вячеславович,
Інститут космічних досліджень
НАН України та ДКА України, м. Київ,
завідувач лабораторії супутникових досліджень
ближнього космосу.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Чорногор Леонід Феоктистович
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна, м. Харків
професор кафедри космічної радіофізики;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Залізовський Андрій Владиславович
Радіоастрономічний інститут НАН України, м. Харків
завідувач відділу радіофізики геокосмосу.

Захист дисертації відбудеться “21” вересня 2018 р. о 15^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.205.01 Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України за адресою: 03187, Україна, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 40, корп. 4/1, ауд. 209.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України за адресою: 03187, Україна, м. Київ, проспект Академіка Глушкова 40, корп. 4/1.

Автореферат розісланий “___” _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.205.01,
кандидат технічних наук Л.М. Колос

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Верхня атмосфера Землі демонструє величезну мінливість параметрів, середній рівень яких контролюється рівнем сонячної активності, але також залежить від низки інших факторів. Уявлення про рівноважний стан атмосфери, який встановлюється при заданих геліофізичних умовах є ідеалізацією (хоча параметри саме такого стану розраховуються і повертаються користувачеві в моделях «стандартної атмосфери»). Насправді, атмосфера знаходиться в процесі перманентної перебудови, пристосуванні до рівноваги, що змінюється, і пов'язаному з цим глобальному русі. Циркуляція речовини в навколоземному космосі виступає структуроутворюючим фактором, який формує ряд різномасштабних утворень. Тому розробка нового покоління моделей геокосмосу (атмосфери – іоносфери – магнітосфери), які б задовольняли все більш зростаючим вимогам до точності і горизонту прогнозу, вимагає обов’язкового врахування динамічних процесів.

Серед переліку динамічних процесів у верхній нейтральній атмосфері важливу роль відіграють внутрішні атмосферні гравітаційні хвилі (далі – ГХ). Дані спостережень і теоретичні оцінки свідчать про те, що ці хвилі вносять суттєвий вклад у формування балансу енергії та імпульсу космічного простору, а також виступають агентом його зв'язку з нижчими шарами нейтральної атмосфери. Завданнями сучасних досліджень у цій області є вивчення ГХ як фактора космічної погоди та врахування (параметризація) ефектів ГХ в референсних моделях атмосфери та іоносфери.

В галузі фізики ГХ сьогодні працюють сотні фахівців світового рівня, у тому числі D.C. Fritts, S.L. Vadas, J.B. Snively (США), J.P. Artru, P. Lognonne (Франція), А.А. Намгаладзе, А.И. Погорельцев, Н.С. Ерохин, Э. Астафьева (Росія), J. Lastovicka (Чехія) тощо. Серед українських колег – лідерів творчих колективів та провідних спеціалістів в цій галузі – слід виділити Л.Ф. Чорногора (Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна), Ю.М. Ямпольського та А.В. Залізовського (Радіоастрономічний інститут НАН України), О.К. Черемних та А.К. Федоренко (Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України), С.В. Панасенко (МОН України), Ю.Г. Рапопорта та Л.В. Козак (Київський національний університет імені Тараса Шевченка).

Незважаючи на вказаний існуючий потужний доробок у галузі фізики ГХ, кількісне вивчення їх властивостей представляє труднощі. Справа в тому, що методи дистанційного зондування іоносфери не надають прямої інформації про збурення нейтральних атмосферних компонент. Перерахунок параметрів спостережуваних плазмових збурень в параметри ГХ неточний, проводиться з використанням модельних положень, і на практиці носить характер оцінок. В таких умовах джерелом кількісних даних виступають вимірювання атмосферних параметрів *in situ*, на борту низькоорбітальних супутників.

Протягом 1970-х і на початку 1980-х років була реалізована серія супутникових проектів з реєстрацією концентрації, температури і швидкості руху атмосферних компонент контактними методами. Найбільш досконалим був супутник DE 2, політ якого відбувся в період 1980–1983 рр. в умовах високої сонячної активності. Тривалі сеанси включень апаратури DE 2 забезпечили накопичення значної вибірки даних

про стан атмосфери у висотному шарі 250–500 км. Однак, лише малий відсоток цих даних був в подальшому використаний для характеристики поля ГХ.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, яка присвячена кількісному дослідженню ГХ за даними прямих супутникових спостережень, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота велась в лабораторії супутникових досліджень ближнього космосу Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України в рамках наукових тем і проектів: спільний науковий проект НАН України та EISCAT «Аналіз та моделювання плазмових і магнітних збурень за даними супутникових вимірювань в арктичному регіоні» (2008–2010 рр.); науково-дослідна робота «Проблемно-орієнтований аналіз та розроблення інформаційної системи іоносферних супутникових спостережень», що виконувалась відповідно до програми наукових досліджень НАН України та НКА України «Наукові основи, методичне, технічне та інформаційне забезпечення створення системи моніторингу геосистем на території України (GEO-UA)» та Розпорядження Президії НАН України (2010 р.); базова тема НАН України «Математичне моделювання динамічних процесів у ближньому космосі та геліосферній плазмі на основі супутникових і наземних спостережень» (2013–2017 рр.); базова тема НАН України «Розробити моделі фізико-хімічних та гідродинамічних процесів у космічному просторі та методи оброблення супутникових даних» (2013–2017 рр.); базова тема НАН України «Моделі спостережуваних динамічних процесів у ближньому космосі та методи їх математичної інтерпретації й прогнозування» (2018 р.); грантова угода 7-ї Рамкової програми Євросоюзу «Проблемно-орієнтований аналіз та розроблення інформаційної системи іоносферних супутникових спостережень» (POPDAT) (2011–2013 рр.); науково-дослідна робота «Вивчення сонячно-земних і сейсмо-іоносферних зв’язків», яка виконувалась за контрактом з ДКА України (2013 р.).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є кількісне дослідження хвильового поля термосфери шляхом аналізу даних супутникових вимірювань термосферних параметрів.

Досягнення поставленої мети передбачає розв’язання наступних задач:

1. Аналіз поточного стану знань про хвильову активність термосфери, вибір придатних методів цифрової обробки та аналізу супутникових даних.
2. Розроблення комплексного методу визначення та аналізу повного спектрального складу хвильових збурень термосфери за даними супутникових спостережень. Реалізація методу у формі набору алгоритмів та програмного забезпечення.
3. Оцінювання точності представлення хвильового поля термосфери, зумовленого застосуванням моделей широкосмугових процесів порівняно з гармонічними процесами. Визначення похибок спектральних оцінок.
4. Систематична обробка даних вимірювань на супутнику DE 2. Каталогізація спостережених хвильових подій.
5. Дослідження глобальної морфологічної структури і повного спектрального складу хвильового поля термосфери.

6. Пошук зв'язку термосферних збурень з космічними і приземними джерелами енерговиділення.

7. Кількісний аналіз енергетичних характеристик ГХ та вкладу ГХ в процеси енергопереносу в термосфері.

Об'єкт дослідження: атмосферні гравітаційні хвилі в термосфері Землі.

Предмет дослідження: фізичні характеристики атмосферних гравітаційних хвиль за даними супутникових спостережень.

Методи дослідження: гідродинамічна теорія, супутникові вимірювання атмосферних параметрів, цифрова обробка рядів даних, візуалізація та геопросторова прив'язка хвильових процесів.

Наукова новизна одержаних результатів визначається наступним:

вперше:

– встановлено повний спектральний склад хвильового поля термосфери $\{\omega, k_x, k_y, k_z\}$. Показано, що спостережувані збурення являють собою суперпозицію широкосмугових хвильових пакетів;

– виявлено зв'язок сейсмічних і термосферних подій. Визначена група просторово локалізованих сплесків ГХ, ідентифікованих як провісники землетрусів;

– проведено пряме вимірювання інтенсивності ГХ. Уточнено кількісний внесок ГХ в енергетичний баланс термосфери;

– розроблено та застосовано метод відокремлення просторових і часових змін хвильового поля ГХ вздовж орбіти супутника, який дозволяє скорегувати спостережений спектральний розподіл параметрів ГХ на основі визначеної частоти ГХ;

– встановлено обмеження на точність визначення спектральних параметрів ГХ в умовах космічного експерименту, зумовлені прямими точковими вимірюваннями просторових параметрів ГХ вздовж орбіти супутника. Обмеження виникають з первинних принципів і не підлягають корегуванню;

отримали подальший розвиток

– методи і алгоритми селекції хвильових збурень в експериментальних даних, що отримало вираз у розробленому комплексному методі визначення та аналізу повного спектрального складу хвильових збурень термосфери за даними прямих супутникових спостережень.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений в дисертаційній роботі комплексний метод дозволить ввести в науковий обіг великий масив даних старих супутників, що до теперішнього часу не мали попит через складнощі фільтрації корисного сигналу. Метод реалізовано у програмному комплексі автоматизованого опрацювання та кількісного аналізу експериментальних даних.

Створений в дисертації каталог ГХ є кількісною основою для подальшого дослідження цих хвиль як фактора космічної погоди та врахування ефектів ГХ в моделях атмосфери-іоносфери.

Виявлені ГХ – провісники землетрусів становлять інтерес з точки зору розробки методів короткочасного прогнозу землетрусів.

Результати та розробки дисертаційної роботи впроваджені в міжнародному науково-технічному проекті 7-ї рамкової програми POPDAT (2011–2013 рр.) та

використовуються у підготовці українського космічного експерименту «Іоносат – Мікро» на супутнику «Мікросат-М», який здійснюється в рамках Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані особисто автором і є його самостійним науковим доробком. За темою дисертації опубліковано сім статей, які повністю відповідають спеціальності 05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження, 5 з них є фаховими, 1 – підрозділ у колективній монографії, 1 – стаття у збірнику.

В роботі [1] автором проаналізовані інформативні ознаки ГХ на іоносферних висотах та проведений пошук прийнятних джерел спостережень ГХ; в роботі [2] автором оброблено та проаналізовано біля 150 орбітальних витків супутника DE 2, систематизовано результати щодо планетарного розподілу варіацій основних атмосферних газів O та N_2 в області висот 250–450 км та проаналізована залежність локалізованих сплесків ГХ від геомагнітної активності (Кр-індекс); в роботі [3] (виконана одноосібно) проведено візуалізацію хвильових форм на меркарторівській мапі, досліджено і описано зв'язок локалізованих сплесків ГХ із землетрусами, потужними ураганами та запусками ракет з космодромів СРСР; в роботі [4] автором оброблено та проаналізовано 265 орбітальних витків супутника DE 2 та виявлено 29 просторово локалізованих сплесків ГХ в спокійній області планетарного розподілу, проведено кількісний аналіз параметрів цих сплесків, розраховано діаграму методу накладення епох стосовно зв'язку ГХ із землетрусами; в роботі [5] автором адаптовано метод Гілберта-Хуанга для селекції хвильових пакетів ГХ, створено відповідний програмний комплекс обробки даних, створено каталог спостережуваних хвильових процесів; в роботі [6] автором змодельована картина вітрів в термосфері (з використанням відкритого програмного забезпечення), проведено розрахунки кількісних параметрів взаємодії ГХ з іоносферою; в роботі [7] автором проведена обробка даних, систематизація та візуалізація результатів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались на наступних конференціях та семінарах: Дев'ята Українська конференція з космічних досліджень (Національний центр управління та випробовування космічних засобів, Євпаторія, Крим, Україна, 31 серпня-5 вересня 2009 р.), Конференція молодих вчених «Дистанційне радіозондування іоносфери» (Інститут іоносфери Національний технічний університет Харківський політехнічний інститут, Харків, Україна, 6-9 квітня 2010 р.), 17th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, Ukraine, April 26 – May 1, 2010), Десята Українська конференція з космічних досліджень (Національний центр управління та випробовування космічних засобів, Євпаторія, Крим, Україна, 30 серпня-3 вересня 2010 р.), Одинадцята Українська конференція з космічних досліджень (Національний центр управління та випробовування космічних засобів, Євпаторія, Крим, Україна, 29 серпня-3 вересня 2011 р.), Девятая конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 12-13 апреля 2012 г.), Дванадцята Українська конференція з космічних досліджень (Національний центр управління та випробовування космічних засобів, Євпаторія, Крим, Україна, 3-7 вересня 2012 р.), Чотирнадцята Українська конференція з

космічних досліджень (Ужгород, Україна, 8-12 вересня 2014 р.), Науковий семінар (ЛЦ ІКД, Львів, Україна, жовтень 2014 р.), Шістнадцята Українська конференція з космічних досліджень (Одеса, Україна, 22-27 серпня 2016 р.), Науковий семінар (ХНУ ім. Каразіна. Харків, Україна, 2 грудня 2016 р.), Сімнадцята Українська конференція з космічних досліджень (Одеса, Україна, 21-25 серпня 2017 р.), Науковий семінар (Інститут іоносфери. Харківський політехнічний інститут. Харків, Україна, листопад 2017 р.), Науковий семінар (ЛЦ ІКД, Львів, Україна, листопад 2017 р.), Розширений науковий семінар (Лабораторія супутникових досліджень ближнього космосу, ІКД НАН України та ДКА України. Київ, Україна, лютий 2018 р.), Розширений науковий семінар (Лабораторія супутникових досліджень ближнього космосу, ІКД НАН України та ДКА України. Київ, Україна, березень 2018 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 19 робіт: 5 – у наукових фахових журналах, 1 – підрозділ колективної монографії, 1 – стаття у збірнику, 12 – тези профільних наукових конференціях (в тому числі міжнародних).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів та висновків. Загальний обсяг дисертації 128 сторінок, включаючи 58 рисунків і 5 таблиць. Список використаних джерел містить 119 бібліографічних найменувань. Додатково дисертація містить 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано завдання дисертаційного дослідження, відзначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** – «Внутрішні гравітаційні хвилі у верхній атмосфері Землі. Огляд літератури» – дано огляд розвитку наукової думки про ГХ. Показано, що ця область знань містить прогалини. Матеріали публікацій викладено в історичній послідовності та розділено на структурні елементи: наземні методи виявлення та дослідження ГХ; історичне становлення теоретичного підґрунтя; супутникові дослідження ГХ. Детально описані унікальність та труднощі супутникових вимірювань. Подано відомості про серію супутників, які мали обладнання для реєстрації параметрів нейтральної атмосфери. Окремий акцент поставлено на проблемах виділення корисної інформації із супутникових даних. На основі аналізу невирішених проблем з математичного моделювання збурень верхньої термосфери, малого обсягу даних супутникових термосферних спостережень і встановлених труднощів їх використання у наукових дослідженнях намічені шляхи розв’язання цих проблем і поставлене загальне завдання дисертаційного дослідження.

У **розділах 2 і 3** розроблено комплексний метод визначення та аналізу повного спектрального складу хвильових збурень верхньої термосфери за даними прямих супутникових спостережень. Комплексний метод реалізований у формі набору алгоритмів та програмного забезпечення. Метод включає наступні взаємопов’язані етапи реалізації:

1. Фільтрація хвильових збурень в експериментальних даних;

2. Візуалізація та геопросторова прив'язка спостережуваних хвильових форм, загальна оцінка їх характеристик (інтенсивність, тривалість, особливості морфологічної структури);

3. Аналіз спектрального складу збурень (частота та хвильовий вектор, напрямок поширення, фазова та групова швидкості);

4. Оцінка похибок визначення хвильових характеристик;

5. Каталогізація хвильових подій.

У **другому розділі** – «Селекція хвильових збурень в даних супутникових вимірювань» – розроблений метод фільтрації хвильових форм ГХ на фоні інших типів атмосферних неоднорідностей (тренди, шуми). З цією метою адаптовані класичні методи цифрової обробки сигналів [27], а також врахований підхід подвійної фільтрації даних супутникових спостережень [22].

Серед переліку факторів, які обмежують можливості діагностики ГХ і виступають джерелами похибок такої діагностики, слід виокремити два основні. По-перше, це неповнота супутникових вимірювань. З позицій теоретичної гідродинаміки, вичерпну інформацію про процеси в нейтральній атмосфері дають просторово-часові розподіли густини $\rho(t,x,y,z)$, температури $T(t,x,y,z)$ (або тиску $p(t,x,y,z)$) та швидкості атмосферного середовища $\vec{V}(t,x,y,z)$. На борту супутника реєструється одновимірний розподіл частини цих параметрів: $s=s(x)$, де координата x відраховується вздовж орбітального витка. Відповідно, дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) повертає дослідникові просторовий спектр процесу $S=S(k_x)$. Інші спектральні параметри – частота ω і компоненти хвильового вектора k_y, k_z – не реєструються. (Крім того в даних супутникових вимірювань змішуються часові і просторові варіації поля ГХ вздовж орбіти супутника. Оскільки швидкість супутника значно перевищує фазову швидкість ГХ, останній фактор допускає корекцію; див. далі).

Друга фундаментальна складність полягає в необхідності вилучення з вхідних даних потужних низькочастотних змін атмосферних параметрів – трендів. Як приклад, на рис. 1 а наведена епюра із записом концентрації атомарного кисню [O] на одному з орбітальних витків DE 2. Можна бачити, що протягом сеансу вимірювань параметр [O] змінюється більше ніж на порядок величини. Невеликі «брижі» на експериментальній кривій є ГХ. З метою їх селекції різні групи авторів використовують різні алгоритми фільтрації даних. Але застосування різних математичних фільтрів до тих же вхідних даних породжує на виході відмінні хвильові форми, і це ставить результати обробки під сумнів. Найбільш необґрунтовано виглядає селекція ГХ малої амплітуди, хоча такими є переважна більшість спостережуваних хвиль.

В **підрозділі 2.2** (Цифрова обробка даних) вивчена природа спотворень, які процедура фільтрація вносить в корисний сигнал. З цією метою проведено покроковий контроль змін, які сигнал зазнає в спектральній області.

Генерація фіктивних частот. Відомо, що в результаті дискретизації аналогового сигналу спектр сигналу акумулюється в смузі частот $(0, f_s/2)$ (де $f=k_x/2\pi$ – просторова частота, f_s – частота дискретизації), а компоненти сигналу

з частотами $f > f_s/2$ породжують фіктивні гармоніки [27]. В дисертації обґрунтовано, що атмосфера як фізичне середовище грає роль «антиелайзингового фільтру», який виключає можливість появи фіктивних гармонік ГХ в даних супутників AE-E і DE 2. При аналізі вимірювань на супутниках AE-B, AE-C зазначений ризик існує.

Розтікання спектру даних. Скінченність інтервалу вимірювання хвильового процесу спричиняє «розтікання» монохроматичних компонент сигналу згідно функції sinc [27]: $\delta(f - f_0) \to L\,\mathrm{sinc}(\pi(f - f_0)L)$, де f_0 – просторова частота аналогового сигналу, L – довжина області вимірювань вздовж орбітального витка, функція $\mathrm{sinc}(x) = \sin(x)/x$.

Явище розтікання спектру даних призводить до ефективного розширення спектральних ліній збурень в межах головного максимуму функції sinc: $\delta f = 1/L$, і це спричиняє певну похибку визначення параметру k_x (менше 5% в діапазоні частот ГХ). Крім того, частина спектральної енергії розтікається вздовж бічних максимумів функції sinc.

Розтікання спектру реального сигналу ілюструє рис. 1. На рис. 1 b показаний амплітудний спектр вхідної послідовності даних, на рис. 1 d – спектр тренда, який для порівняння наведений на рис. 1 b тонкою лінією. Можна бачити, що тренд, хоч і не є коливальним процесом, повністю маскує спектр ГХ. Перекриття спектрів тренда і ГХ виникає через те, що спектр тренду проникає в область частот корисного сигналу. Оскільки трендова складова велика, а ГХ – малі, вищі гармоніки тренда перевищують основні гармоніки ГХ.

Алгоритм фільтрації ГХ:

1. Грубе видалення тренда з вхідного ряду даних з метою зменшення компоненти, що розтікається. Конкретний спосіб апроксимації тренду не є важливим за умови, що процедура «детрендування» не вносить спотворень в частотний діапазон ГХ;

2. Ідеальна смугова фільтрація сигналу в області масштабів ГХ $(k_{x\min}, k_{x\max})$;

3. Відновлення хвильової форми ГХ $s = s(x)$ шляхом обчислення зворотного ДПФ.

Приклад обробки даних, наведений на рис. 1, є типовим, що дозволяє зробити деякі загальні висновки щодо властивостей ГХ. А саме, термосферні ГХ є надширокосмуговими – в діапазоні горизонтальних довжин хвиль від приблизно 200 км до, принаймні, 2500 км. Хвильові форми візуально розпадаються на декілька хвильових пакетів різних масштабів. Півширини спектрів пакетів $(k_{\max} - k_{\min})/(k_{\max} + k_{\min})$ досягають десятків процентів.

Одержаний за описаним методом профіль хвильового процесу $s = s(x)$ є завершеним продуктом обробки даних. При необхідності дослідник може продовжити обробку (наприклад, піддати розподіл $s = s(x)$ вейвлет-аналізу з метою пошуку сигнатур нелінійних ефектів і т.п.). У даній роботі, подальший аналіз хвильових форм вівся з метою встановлення їх повного спектрального складу $\{\omega, k_x, k_y, k_z\}$.

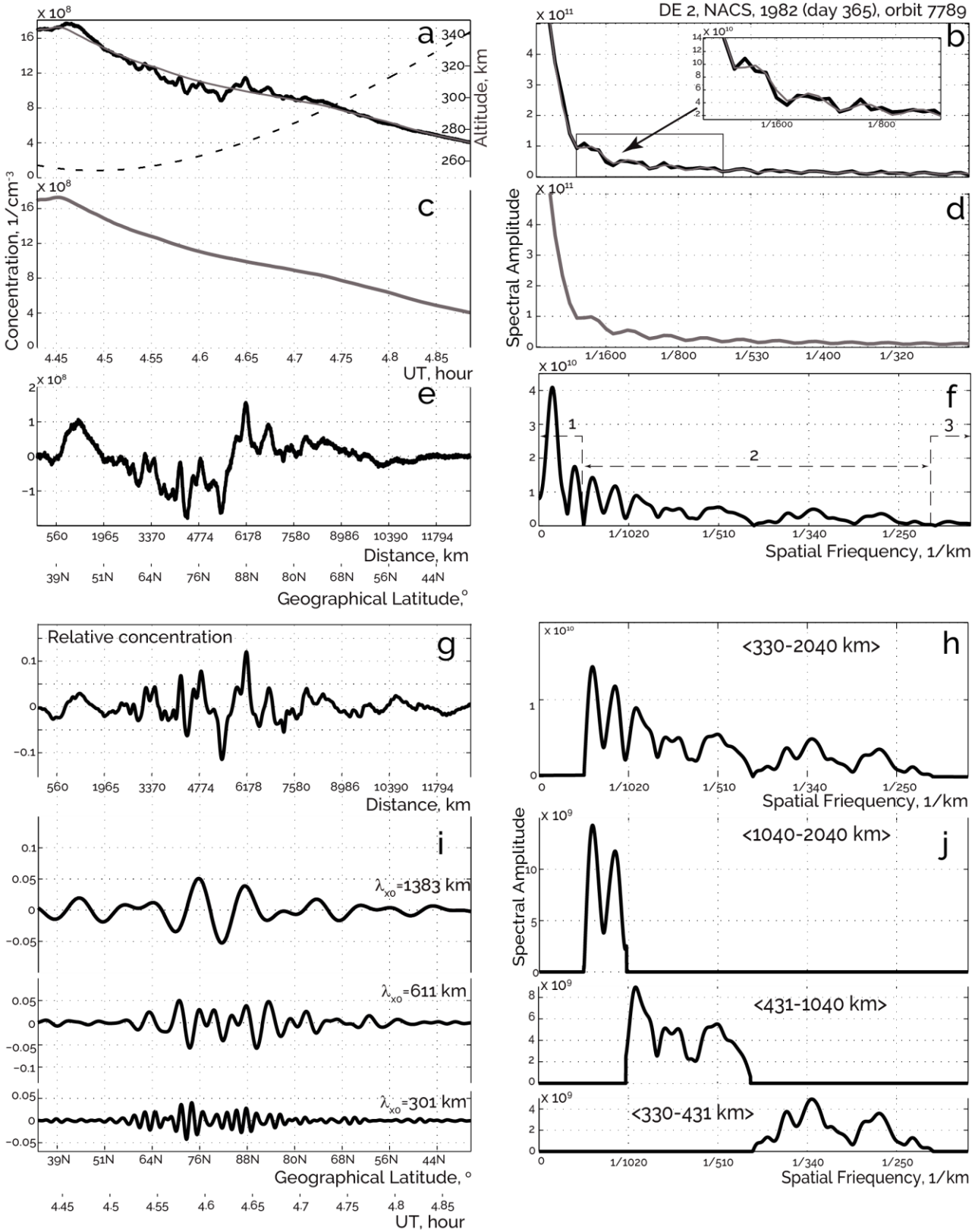


Рисунок 1 – Селекція хвильових збурень в розподілі концентрації атомарного кисню на орбітальному витку супутника DE 2. (a) Дані вимірювань (чорна суцільна лінія), висота супутника (пунктирна лінія). (b) Амплітудний спектр даних (чорна лінія) і тренда (сіра лінія). (c) Тренд. (d) Амплітудний спектр тренда. (e) Різницевий сигнал. (f) Амплітудний спектр різницевого сигналу (1 – залишки тренда, 2 – діапазон ГХ, 3 – шуми). (g) Хвильова форма ГХ. (h) Амплітудний спектр ГХ. (i),(j) – складові хвильові пакети ГХ.

Верифікація методу: обробка модельних наборів даних (селекція гармонічного сигналу на фоні гауссового тренда і т.п.); порівняння з результатами застосування вейвлет-аналізу; порівняння з опублікованими результатами.

Оцінка інструментальної похибки. Встановлено рівень приладових шумів $2\sigma \sim 0.5\%$ (по відношенню до вимірюваного параметру). При характерних амплітудах ГХ ~ 5%, відношення сигнал/шум ~ 10.

В **підрозділі 2.3** (Каталогізація ГХ) описано каталог спостережуваних подій, розроблений в рамках міжнародного науково-дослідного проекту 7-ї рамкової програми POPDAT (Problem Oriented Processing and Database Creation for Ionosphere Exploration, 2011–2013 pp.).

Третій розділ – «Аналіз спектрального складу хвильових збурень на основі теорії ГХ» – присвячений дослідженню динаміки хвильового поля термосфери. Реєстрація хвильового процесу у варіаціях одночасно декількох атмосферних параметрів відкриває можливість теоретичної оцінки повного складу спектральних характеристик хвильового процесу – частоти, хвильового вектору, фазової і групової швидкості. Так, за величиною осциляцій вертикальної швидкості частинок V_z (вимірюється безпосередньо) і вертикального зміщення частинок δz (визначається за варіаціями газових концентрацій) можна оцінити частоту хвилі $\omega \sim V_z / \delta z$, а з використанням дисперсійного та поляризаційних співвідношень теорії ГХ – оцінити невистачаючі хвильові числа k_y, k_z. Даний підхід був розроблений і детально описаний в роботі [24]. Аналітичним підґрунтям для обчислень служить теорія ГХ [20, 23, 26]. Певні корисні алгоритми наведені в [25, 28].

Підрозділ 3.2 (Метод спектрального оцінювання) присвячений теоретичному обґрунтуванню відповідних розрахунків. Показано, що вищеописаний підхід до задачі спектрального оцінювання містить протиріччя, яке полягає в тому, що широкосмугові хвильові процеси трактуються як монохроматичні. До теперішнього часу цей факт цілком ігнорувався, і його нерозуміння призводило до помилок у визначенні параметрів ГХ.

Зміщення спектральних оцінок. Слід розрізняти: $s(x)$, $S(k_x)$ – спостережувані хвильова форма та просторовий спектр ГХ; $s(t)$, $S(\omega)$ – залежність від часу і частотний спектр ГХ, які не спостерігаються в космічному експерименті; не спостерігаються і залежності $s(y)$, $S(k_y)$, $s(z)$, $S(k_z)$. В дисертації показано, що теоретична оцінка неспостережуваних спектральних параметрів хвильового процесу зазнає зміщення порядку півширини головного піка спектру процесу (рис. 2); це зміщення слід розглядати як похибку спектрального оцінювання.

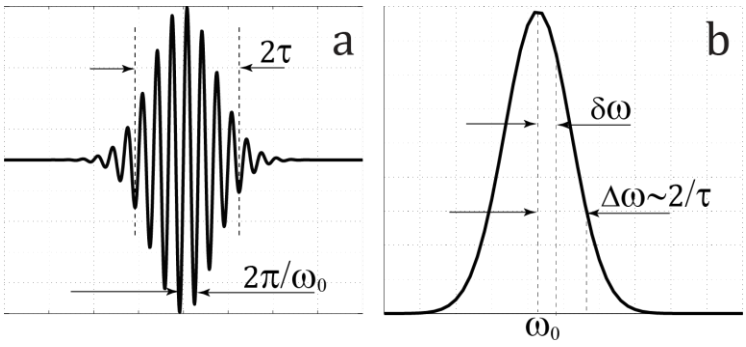


Рисунок 2 – До оцінки несучої частоти хвильового пакету. (a) Хвильова форма в часі (в космічному експерименті не реєструється). (b) Відповідний спектр (не реєструється). Позначені: частота головного піка (несуча частота) ω_0, ефективна півширина спектру $\Delta\omega$, зміщення теоретичної оцінки несучої $\delta\omega$.

Алгоритм спектрального оцінювання. Несучі частоти хвильових збурень ω_0 і хвильові числа k_{y0}, k_{z0} обчислюються ніби процес був монохроматичним, тим самим алгоритм спектрального оцінювання зводиться до запропонованого в роботі [24]. Для цього реальний процес замінюється еквівалентним гармонічним процесом $s(x) \to A_0 \sin(k_{x0} \cdot x)$. Амплітуда останнього визначається з умови рівності енергій обох процесів: $A_0 = \sqrt{2} s_{\text{rms}}$. Оцінка несучої частоти має вигляд: $\omega_0 \sim V_{z\,\text{rms}} / \delta z_{\text{rms}}$. Похибка оцінки $\delta\omega \sim \Delta\omega = V_g \Delta k \sim V_g \Delta k_x$, де V_g – групова швидкість ГХ, Δk_x – ефективна півширина спектрального розподілу $S(k_x)$. Хвильові числа k_{y0}, k_{z0} визначаються з співвідношень теорії ГХ з похибкою $\delta k_y \sim \Delta k_y \sim \Delta k_x$. Формули розрахунків наведені у дисертації.

Корегування просторово-часової невизначеності. Знання частоти ω дозволяє скорегувати спостережуваний спектральний розподіл $S = S(k_x)$ за формулою $k_x^{(1)} = k_x^{(0)} \pm \omega / V_{sc}$, де V_{SC} – швидкість супутника, знак «плюс» відповідає випадку, коли хвиля і супутник рухаються назустріч одне одному, знак «мінус», коли вони рухаються в одному напрямку.

Похибки визначення хвильових параметрів:

- Приладова похибка ~ 0,5%;
- Розтікання спектру хвильових чисел k_x. Після корегування просторово-часової невизначеності, похибка ~ 1–5%;
- Зміщення оцінки параметрів ω, k_y, k_z порядку півширини спектра хвильового пакета (десятки відсотків).

На рис. 3 умовно зображено об’єм, зайнятий хвильовим процесом у фазовому просторі. Форма фазового об’єму дослідникові невідома, але з аналізу експериментальних даних відомі його «габарити» – півширини спектру $\Delta k, \Delta\omega$; ці розміри визначають похибку центрування об’єму на дисперсійній площині.

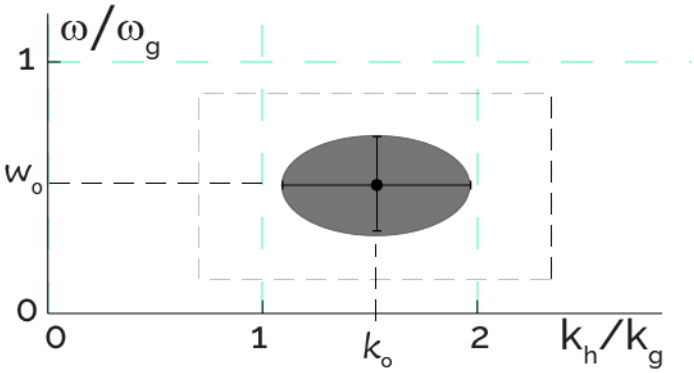


Рисунок 3 – Умовне зображення хвильового пакету ГХ на дисперсійній площині. Вказані несучі частота і хвильове число, прямолінійні відрізки – похибки визначення несучих, пунктирна лінія – довірчий інтервал локалізації пакета в цілому.

Розбиття хвильового процесу на складові хвильові пакети. Повертаючись до рис. 1 h, зазначимо, що енергія ГХ розподілена по спектру хвильових чисел k_x у вигляді окремих згустків. Можна припустити, що поширення ГХ відбувається у вигляді набору хвильових пакетів різних частот.

У дисертації розроблений евристичний алгоритм локалізації розподілу енергії ГХ в тривимірному фазовому просторі $\{\omega, k_x, k_y\}$. Встановлено, що енергія в основному концентрується у декількох відокремлених фазових об'ємах (фазових краплях). Це далекосяжний результат, який дозволяє перейти від розгляду статичної картинки хвильового поля $s(x)$ до аналізу динаміки його поширення. Якби хвильовий процес був би більш-менш рівномірно розподілений по усьому надширокому спектру, теоретична оцінка частот та хвильових чисел процесу втратила би всякий сенс, оскільки би супроводжувалася похибкою в сотні відсотків величини. Саме поділ процесу на складові хвильові пакети, хоча теж широкосмугові, але компактно локалізовані в фазовому просторі, дозволяє приписати їм такі характеристики як середня (несуча) частота і хвильовий вектор, напрямок поширення, групова швидкість, а також виміряти енергію і потік енергії.

В **підрозділі 3.3** (Автоматизація обробки даних) описано програмний комплекс, який забезпечує обрахунок параметрів спостережуваних хвильових процесів. Вхідними є дані вимірювань на супутнику DE 2 (інструменти NACS і WATS). Після невеликого коригування, програмне забезпечення можна застосувати для обробки даних інших космічних проектів. На рис. 4, що є продовженням рис. 1, представлений приклад багатокомпонентної візуалізації одного із хвильових пакетів ГХ.

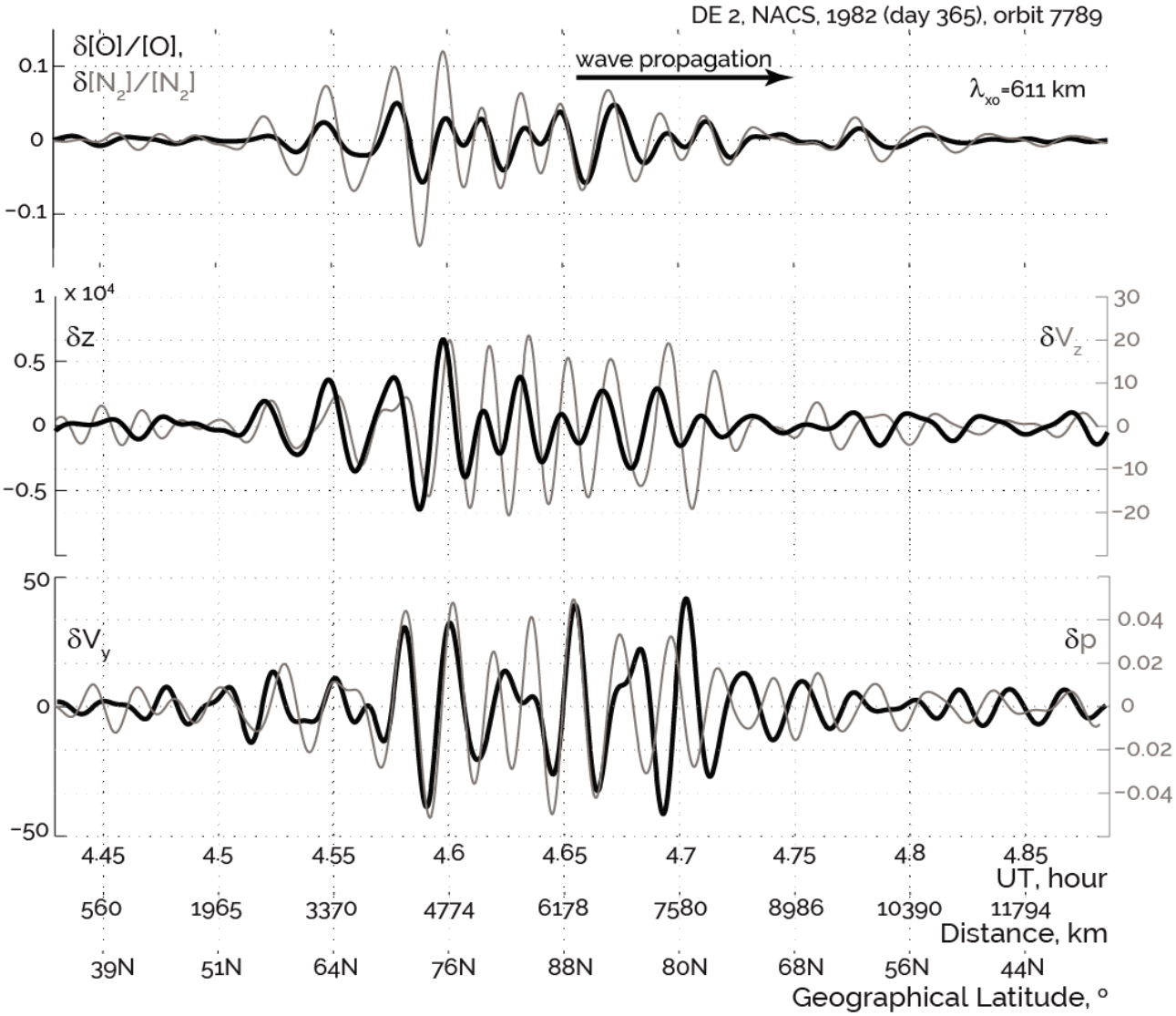


Рисунок 4 – Середньомасштабний хвильовий пакет ГХ у варіаціях різних фізичних параметрів. Зверху-вниз: хвильові форми в концентраціях газових компонент $\delta[\mathrm{O}]/[\mathrm{O}]$ і $\delta[\mathrm{N}_2]/[\mathrm{N}_2]$; у вертикальному зміщенні δz і швидкості; у швидкості V_y і тиску δp.

В **розділі 4** – «Характеристика поля ГХ у верхній термосфері» досліджена вибірка даних спостережень (біля 1000 орбітальних витків DE 2), які характеризують хвильову активність термосфери у висотному шарі 250–500 км.

В **підрозділі 4.2** (Спектр хвильового поля) проаналізовано розташування хвильових пакетів на дисперсійній площині (рис. 5). Встановлено, що в кожен момент часу хвильове поле являє собою суперпозицію (групу) декількох хвильових пакетів з різними значеннями несучих хвильових чисел і частоти. У зв'язку з цим на рисунку вказана подвійна нумерація подій: перша цифра позначає приналежність хвильового пакета до певної групи, друга – нумерує пакети в ній.

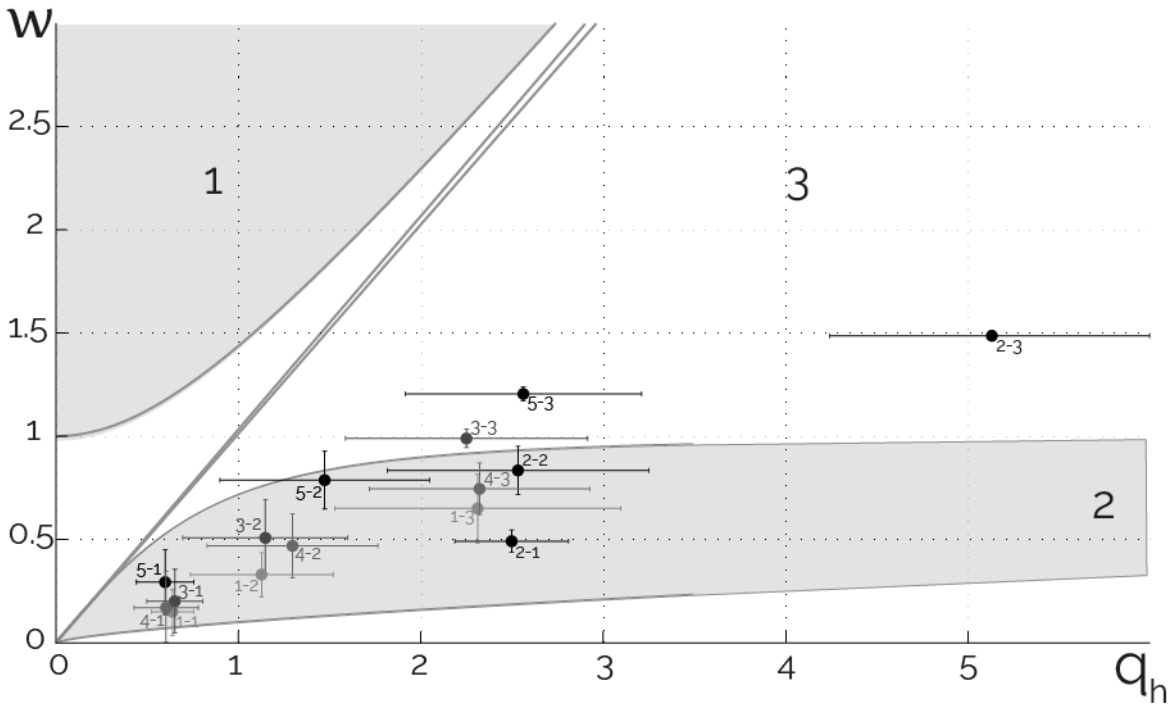


Рисунок 5 – Розташування хвильових пакетів на дисперсійній площині. 1 – область акустичних мод, 2 – область гравітаційних мод, 3 – заборонена область.

На рис. 5 експериментальні точки заповнюють фазовий простір відповідно до теорії атмосферних хвиль [23], що слід розглядати як пряме підтвердження теорії і, більш широко, як доказ застосовності класичного гідродинамічного підходу до опису динаміки термосфери на масштабах ГХ. У фрагменті даних, виведених на рис. 5, відсутні сигнатури акустичних хвиль, хоча на деяких орбітальних витках акустичні хвилі реєструвалися (приблизно у 10% випадків). Можна зробити висновок про те, що інфразвукове поле енергетично слабше за поле ГХ, і що генерація потужних акустичних збурень у верхній термосфері є порівняно рідкісною подією. Також на рисунку відсутні сигнатури планетарних хвиль, але останні не детектуються технічно, оскільки в процесі обробки дані пропускаються через короткохвильовий фільтр $\lambda_x < 2500$ км. Хвильові пакети 2-3 і 5-3 лежать в області, забороненій для поширення як акустичних, так і гравітаційних хвиль. Ми трактуємо зазначені хвильові пакети як дактовані (поверхневі) термосферні моди, відомі з теоретичних робіт [21].

В цілому хвильове поле не демонструє певної структури просторових і часових спектрів. Від витка до витка супутника спостерігається мінлива картина збурень, які поширюються в різних напрямках і вірогідно генеруються різними джерелами. Слід вважати, що у верхній термосфері ГХ є лінійними або слабо нелінійними, про що свідчать як малі амплітуди хвиль (див. далі), так і відсутність ознак нелінійності в їх спектрах і скалограмах.

Підрозділ 4.3 (Планетарний розподіл хвильового поля) присвячений дослідженню глобального розподілу хвильової активності термосфери. Спостережено географічну структуру хвильового поля, в якій виділяються активні високоширотні області (північна і південна, вище магнітної широти 40...50°) і спокійна низькоширотна область (рис. 6). Активні області повністю заповнені ГХ

аврорального походження з максимальними амплітудами $a_{\max} \approx 0.1$ (за відносним збуренням густини нейтральної атмосфери). У спокійній зоні реєструються ізольовані сплески хвиль з амплітудами $a \sim 0.01$, генерація яких може бути викликана приземними джерелами.

В **підрозділі 4.4** (Зв'язок термосферних ГХ з приземними джерелами енерговиділення) представлено дослідження вибірки сплесків ГХ, спостережуваних в спокійної області термосфери (всього 53 інтенсивних сплески ГХ). У якості можливих джерел ГХ розглянуті потужні землетруси, тропічні циклони, що досягли фази урагану (тайфуну, циклону), та запуски важких ракет-носіїв.

З використанням методу накладання епох досліджені всі ГХ у просторово-часовому вікні розміром 4500 км від епіцентрів землетрусів та ±12 год. від головного поштовху. Множина землетрусів – можливих джерел генерації ГХ обмежена умовами: магнітуда M > 5, глибина гіпоцентру D < 100 км (що в галузі сейсмо-іоносферних досліджень є загальноприйнятими припущеннями). Виявлена група локалізованих сплесків ГХ (~ 2000 км до епіцентру, ~ 6 годин до головного поштовху), ідентифікованих як провісники землетрусів.

В цілому, зв'язок термосферних збурень з подіями на землі спостерігається лише в поодиноких випадках. Цей факт не слід трактувати як твердження про відсутність впливів на іоносферу знизу. Можна припустити, що ГХ від приземних джерел дисипують в основному нижче висот проведення супутникових спостережень.

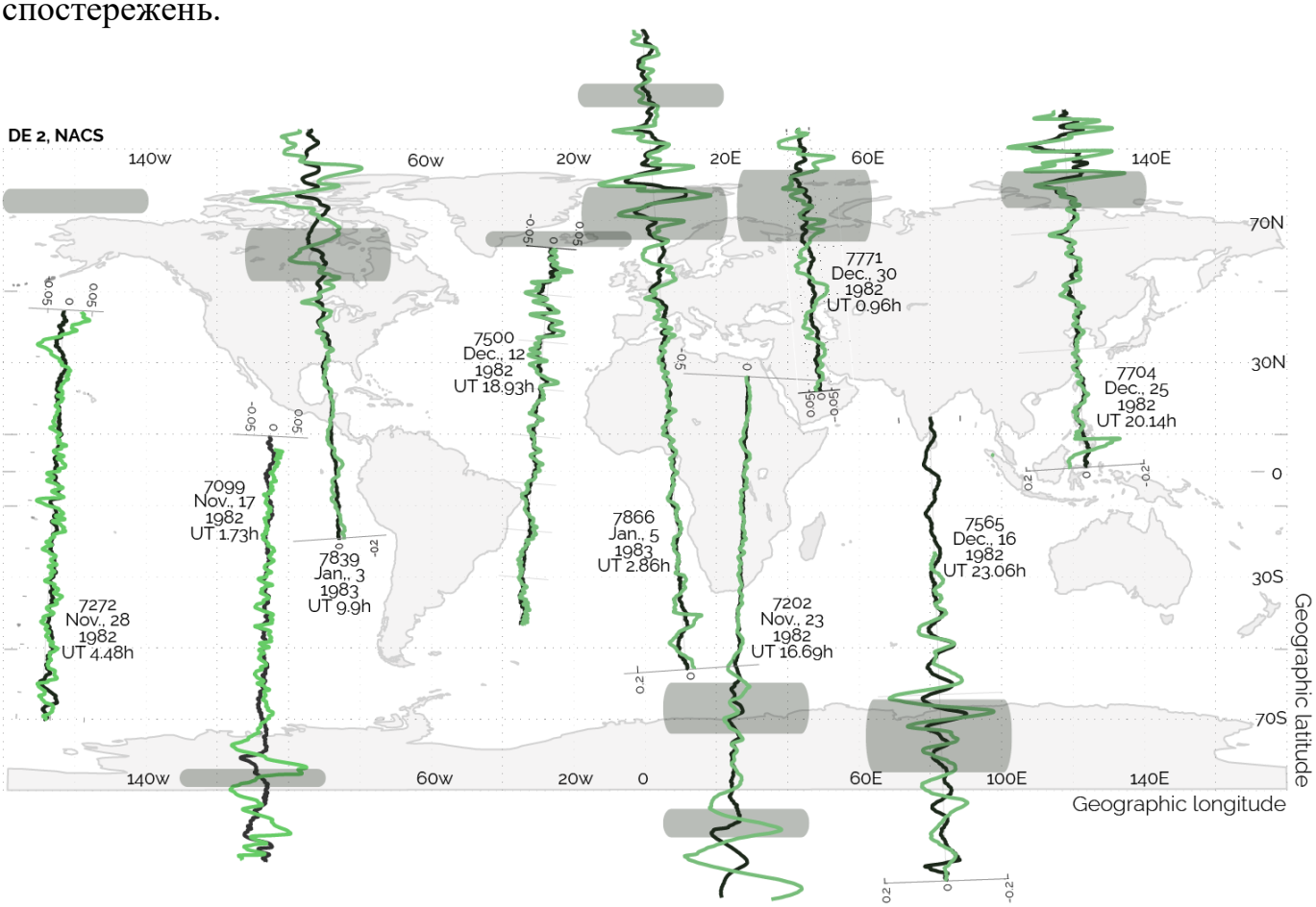


Рисунок 6 – Візуалізація набору хвильових форм з каталогу ГХ. Темно-сірими областями показано поточні положення авроральних зон.

В **підрозділі 4.5** (Енергія ГХ) виміряні енергія і потік енергії ГХ. Показано, що інформативним параметром хвильового процесу є безрозмірна амплітуда ГХ, розрахована за відносними збуреннями густини $a = \delta\rho / \rho$; цей параметр виступає кількісною мірою енергії ГХ по відношенню до внутрішньої термічної енергії атмосферного середовища: $E \sim a^2 U$. У регіонах полярних шапок амплітуди ГХ сягають $a \sim 0.1$, відповідно $E \sim 0.01U$. Дисипація зазначених хвиль здатна викликати підвищення температури термосфери на декілька десятків градусів. В дисертації проведено кількісний аналіз цього питання. Встановлено, що ГХ відносяться до основних факторів формування енергетичного балансу полярної термосфери (після прямого нагріву сонячним короткохвильовим випромінюванням і на рівні з теплопровідністю).

ВИСНОВКИ

В дисертації представлене нове розв'язання актуальної наукової задачі в галузі фізики термосфери Землі, яке полягає у визначенні повного спектрального складу хвильових збурень за даними прямих супутникових спостережень, теоретичній інтерпретації виявлених хвильових збурень та кількісному дослідженні хвильової активності термосфери. Створено каталог хвильових параметрів ГХ, який є кількісною основою для дослідження динамічних процесів у верхній термосфері. Результати дослідження створюють підґрунтя для уточнення і розробки нового покоління моделей геокосмосу, а також подальшого вивчення ГХ як фактора космічної погоди.

У процесі досліджень отримано такі наукові результати:

1. Проведено аналіз стану проблеми дослідження фізичних характеристик ГХ за даними супутникових спостережень та встановлено недостатню повноту представлення існуючої картини хвильової активності термосфери (кількісна характеристика, динамічна структура, зв'язок з космічними і приземними джерелами тощо) і недостатню обґрунтованість методів вилучення корисної інформації із супутникових даних.
2. Розроблено комплексний метод визначення та аналізу повного спектрального складу хвильових збурень термосфери за даними прямих супутникових спостережень, реалізований у формі набору алгоритмів, математичного і програмного забезпечення. Метод включає наступні ключові етапи: селекція профілю хвильового процесу $s = s(x)$ (координата x відраховується вздовж орбіти супутника); теоретична оцінка неспостережуваних спектральних параметрів процесу ω, k_y, k_z; корекція спостережуваного профілю шляхом відокремлення часових і просторових варіацій хвильового поля.
3. Вперше здійснено оцінювання похибок визначення ГХ. Встановлено, що оцінювання спектру k_x здійснюється з високим ступенем точності (~ 1–5%). Оцінка ω, k_y, k_z носить наближений характер з похибкою порядку півширини головного піка спектра хвильового процесу (десятки %). Зазначені обмеження виникають з первинних принципів і не можуть бути усунені завдяки «більш ретельному» обробленню даних.

4. Вперше визначено повний спектральний склад хвильових збурень термосфери $\{\omega, k_x, k_y, k_z\}$, що відкриває можливість дослідження їх динаміки. Термосферні збурення поширюються у вигляді суперпозицій широкосмугових хвильових пакетів з різними несучими частотами і хвильовими числами. В спектрах хвиль ідентифіковані такі моди: ГХ є основною компонентою, другими за інтенсивністю і за частотою реєстрації є дактовані моди, треті – акустичні моди.

5. Отримана кількісна характеристика планетарного розподілу ГХ, в якому виділені активні високоширотні області і спокійна низькоширотна область. В активних областях ГХ виступають одним з головних факторів енергетичного балансу термосфери. У спокійній області реєструються ізольовані сплески ГХ малої інтенсивності.

6. Із застосуванням методу накладання епох встановлено зв'язок термосферних збурень з приземними джерелами енерговиділення. Виділено область в просторі (відстань приблизно 2000 км) і часі (приблизно –6 год.), в якій спостерігається група просторово локалізованих сплесків ГХ, ідентифікованих як провісники землетрусів.

7. Практичний результат роботи полягає у створенні програмного комплексу для автоматизованого опрацювання й інтерпретації супутникових даних, з використанням якого проведено аналіз архіву даних супутника DE 2. Після невеликого коригування, програмне забезпечення можна застосувати для обробки даних інших космічних проектів. Створено каталог ГХ, який є кількісною основою для широкого кола досліджень з фізики ГХ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Лизунов Г.В., Глемба В.И., Корепанов В.Е., Крючков Е.И., Лукенюк А.А., **Скороход Т.В.**, Федоров О.П., Шувалов В.А. Космический эксперимент “Потенциал” на борту спутника Сич-2. *Космічна наука і технологія*. 2008. Т. 14, № 4. С. 3–8.

2. Лизунов Г.В., **Скороход Т.В.** Планетарное распределение среднемасштабных атмосферных гравитационных волн по данным спутниковых измерений. *Космічна наука і технологія*. 2010. Т. 16, № 1. С. 36–41.

3. **Скороход Т.В.** Морфологическая структура и возможные источники АГВ в ионосфере. *Космічна наука і технологія*. 2011. Т. 17, № 2. С. 61–67.

4. **Скороход Т.В.,** Лизунов Г.В. Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012. Т. 52, № 1. С. 1–6.

5. Ferencz Cs., Lizunov G., Crespon F., Price I., Bankov L., Przepiórka D., Brieß K., Dudkin D., Girenko A., Korepanov V., Kuzmych A., **Skorokhod T.**, Marinov P., Piankova O., Rothkaehl H., Shtus T., Steinbach P., Lichtenberger J., Sterenharz A., Vassileva A. Ionosphere Waves Service (IWS) – A problem-oriented tool in ionosphere and Space Weather research produced by POPDAT project. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2014. V. 4, A17. 24 p. http://dx.doi.org/10.1051/swsc/ 2014013.

Роботи, що додатково відображають наукові результати дисертації:

6. Лизунов Г.В., Леонтьев А.В., **Скороход Т.В.** Изучение динамики ионосферы в проекте «Ионосат – Микро». *Космический проект «Ионосат – Микро»: монография* / ред. С.А. Засухи, О.П. Фёдорова. Киев: Академпериодика, 2013. С. 26–45.

7. Лизунов Г.В., **Скороход Т.В.** Спутниковые исследования динамических процессов в ионосфере. *Космічні дослідження в Україні. Звіт COSPAR. 2008-2010.* Київ: Академперіодика, 2011. С. 11–15.

Роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. **Skorokhod T.,** Lizunov G., Fedorenko A. Global Distribution of Atmosphere Gravity Waves According to DE 2 data. *Девятая украинская конференция по космическим исследованиям*: тезисы конференции (НЦУИКС, г. Евпатория, 31 августа – 5 сентября 2009 г.). Киев, 2009. С. 54.

9. **Скороход Т.В.,** Лізунов Г.В. Глобальний розподіл акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері за даними супутника DE 2. *Конференция молодых ученых «Дистанционное радиозондирование ионосферы»*: тезисы конференции (Институт ионосферы. Национальный технический университет Харьковский политехнический институт, г. Харьков, 6–9 апреля 2010 г.). Харьков, 2010. С. 53.

10. **Скороход Т.В.,** Лізунов Г.В. Локалізовані хвильові пакети акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері Землі. *Конференция молодых ученых «Дистанционное радиозондирование ионосферы»*: тезисы конференции (Институт ионосферы. Национальный технический университет Харьковский политехнический институт, г. Харьков, 6–9 апреля 2010 г.). Харьков, 2010. С. 54.

11. **Skorokhod T.,** Lizunov G. Morphology Structure of Atmosphere Gravity Waves According to the in Situ Satellite Measurements. *17th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*: Abstracts (Kyiv National Shevchenko University, Kyiv, April 26 – May 1, 2010). Kyiv, 2010. P. 63.

12. **Скороход Т.В.,** Лізунов Г.В. Морфологическая структура и возможные источники АГВ в ионосфере. *Десятая украинская конференция по космическим исследованиям*: тезисы конференции (НЦУИКС, г. Евпатория, 30 августа – 3 сентября 2010 г.). Киев, 2010. С. 21.

13. **Скороход Т.В.,** Лизунов Г.В. Связь среднемасштабных вариаций нейтральных и ионизированных компонент термосферы по данным измерений на DE 2. *11-я Украинская конференция по космическим исследованиям*: тезисы конференции (НЦУИКС, г. Евпатория, 29 августа – 2 сентября 2011 г.). Киев, 2011. С. 13.

14. **Скороход Т.В.** Среднемасштабные атмосферные гравитационные волны на ионосферных высотах. *9-я конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»*: материалы конференции (ИКИ РАН, г. Москва, 12–13 апреля 2012 г.). Москва, 2012. С. 76–77.

15. Леонтьев А.Ю., **Скороход Т.В.** Поглощение АГВ в термосфере в присутствии ветра. *12-я Украинская конференция по космическим исследованиям*: тезисы конференции (НЦУИКС, г. Евпатория 3 – 7 сентября 2012 г.). Киев, 2012. С. 39.

16. **Скороход Т.В.,** Лизунов Г.В. Планетарное распределение и спектральный состав поля АГВ в верхней термосфере. *14-th Ukrainian Conference on Space Research*: Abstracts (Uzhgorod, September, 8–12, 2014). Kyiv, 2014. P. 29.

17. **Скороход Т.В.,** Лізунов Г.В. Методика селекции волновых форм АГВ по данным спутниковых измерений термосферных параметров. *16-th Ukrainian Conference on Space Research*: Abstracts (Odessa, August, 22–27, 2016). Kyiv, 2016. P. 34.

18. Лізунов Г.В., **Скороход Т.В.** Анализ спектрального состава АГВ по данным спутниковых измерений термосферных параметров. *16-th Ukrainian Conference on Space Research*: Abstracts (Odessa, August, 22–27, 2016). Kyiv, 2016. P. 35.

19. **Скороход Т.В.,** Лизунов Г.В. Анализ амплитудных и частотных характеристик атмосферных гравитационных волн в верхней термосфере *17-th Ukrainian Conference on Space Research*: Abstracts (Odessa, August, 21–25, 2017). Kyiv, 2017. P. 35.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

20. Dudis J.J., Reber C.A. Composition effects in thermospheric gravity waves. *Geophysics Research Letters*. 1976. V.3, No 12. P. 727–730.

21. Francis S.H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1975. V. 37. P. 1011–1054.

22. Gross S.H., Reber C.A., Huang F.T. Large-scale waves in the thermosphere observed by the AE-C satellite. *The Transactions on Geoscience and Remote sensing*. 1984. V. GE-22, No 4. P. 340–351.

23. Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Canadian Journal of Physics*. 1960. V. 38. P. 1441–1481.

24. 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. *Journal of Geophysical Research*. 2002. V.107, A12. P.1418–1439. doi:10.1029/2002JA009370.

25. 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. *Journal of Geophysical Research*. 1995. V. 100. 23,993–24,002.

26. Makhlouf U., Dewan E., Isler J.R. Tuan T. F. On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations. *Journal of Geophysical Research*. 1990. V.95. P.4103–4111.

27. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: монография. Москва: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.

28. Федоренко А.К. Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основі мас-спектрометричних супутникових вимірювань. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009. Т.14, №3. С. 254–265.

АНОТАЦІЯ

Скороход Т. В. Внутрішні гравітаційні хвилі в термосфері за даними прямих супутникових спостережень. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження. – Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, м. Київ, 2018.

Метою дисертаційного дослідження є кількісне дослідження хвильового поля термосфери шляхом аналізу супутникових вимірювань термосферних параметрів. Робота складається з чотирьох основних розділів. В розділі 1 (Внутрішні гравітаційні хвилі у верхній атмосфері Землі. Огляд літератури) дано огляд розвитку наукової думки про атмосферні гравітаційні хвилі (ГХ). В розділі 2 (Селекція хвильових збурень в даних супутникових вимірювань) і розділі 3 (Аналіз спектрального складу хвильових збурень на основі теорії ГХ) розроблено комплексний метод селекції та аналізу ГХ за супутниковими даними, реалізований у формі набору алгоритмів, математичного і програмного забезпечення. Поставлено та розв'язано задачу оцінки похибок визначення ГХ. В розділі 4 (Характеристика поля ГХ у верхній термосфері) проведена систематична обробка даних супутника DE 2. Створена вибірка спостережень ГХ у висотному шарі 250–500 км. На цій основі проведено дослідження планетарного розподілу хвильового поля, спектрального складу хвиль, зв'язку термосферних збурень з космічними і приземними джерелами енерговиділення, вкладу ГХ в формування енергетичного бюджету верхньої атмосфери.

Ключові слова: атмосферні гравітаційні хвилі, верхня атмосфера, космічний експеримент, цифрова обробка сигналів, спектральний аналіз.

АНОТАЦИЯ

Скороход Т. В. Внутренние гравитационные волны в термосфере по данным прямых спутниковых наблюдений. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.07.12 – Дистанционные аэрокосмические исследования. – Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев, 2018.

Целью диссертационного исследования является количественное исследование волнового поля термосферы путем анализа спутниковых измерений термосферных параметров. Работа состоит из четырех основных разделов. В разделе 1 (Внутренние гравитационные волны в верхней атмосфере Земли. Обзор литературы) представлен обзор развития научной мысли про атмосферные гравитационные волны (ГВ). В разделе 2 (Селекция волновых возмущений в данных спутниковых измерений) и разделе 3 (Анализ спектрального состава волновых возмущений на основе теории ГВ) разработан комплексный метод селекции и анализа ГВ по спутниковым данным, реализованный в форме набора алгоритмов, математического и программного обеспечения. Поставлена и решена задача оценки погрешностей определения ГВ. В разделе 4 (Характеристика поля ГВ в верхней термосфере) проведена систематическая обработка данных спутника DE 2. Создана

выборка наблюдений ГВ в высотном интервале 250–500 км. На этой основе проведено исследование планетарного распределения волнового поля, спектрального состава волн, связи термосферных возмущений с космическими и приземными источниками энерговыделения, вклад ГВ в формирование энергетического бюджета верхней атмосферы.

Ключевые слова: атмосферные гравитационные волны, верхняя атмосфера, космический эксперимент, цифровая обработка сигналов, спектральный анализ

ABSTRACT

Skorokhod T. V. Internal gravity waves in the thermosphere according to direct satellite measurements. – Manuscript.

Thesis for scientific degree of Candidate of physical and mathematical sciences by specialty 05.07.12 – Remote aerospace research. – Space Research Institute of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine, Kyiv, 2018.

The purpose of the dissertation research is to study the thermospheric wave field by the analyzing the measurements of thermospheric parameters on board of LEO satellites. The work consists of four main sections. In section 1 (Internal gravity waves in the Earth upper atmosphere, review of the literature), the development of scientific ideas about the atmospheric gravity waves (GW) is described. In section 2 (Selection of wave disturbances in satellite measurement data) and in section 3 (Analysis of wave disturbances spectra on the basis of GW theory), an integral method for satellite measurements data processing has been developed. The method is realized in set of algorithms and mathematical software. Two key stages are united in this method. At the beginning the selection of GW wave form distribution along the satellite orbit $s(x)$ is carried out and the corresponding wave number spectrum k_x is calculated. At the second stage the "unobserved" spectral parameters (frequency ω, wave numbers k_y, k_z) are theoretically estimated. In the dissertation the task of GW measurement errors estimation was formulated and solved for the first time. For this purpose the error analysis was allocated from the spatial-temporal to the spectral domain. It was demonstrated that registration of k_x spectrum can be done with a high precision. The estimation of ω, k_y, k_z is approximate; it is done with an error of a half of the wave spectrum width. Thus, the researcher is able to obtain a fairly accurate information on the intensity distribution of the wave field along the satellite orbit, and only approximate information on the wave frequency, wavelength, propagation direction, and phase and group velocity. These restrictions are caused by initial physical principles and can not be eliminated by "more thorough" data processing.

The corner stone of the dissertation research is the step-by-step control of the changes that processing contributes into the data frequency domain. Due to this it was possible to find out the nature of the complexity of wave disturbance separation from the trend component. The problem is not the presence of the trend by itself, but it is in the trend spectrum spreading – the artefact of digital signal processing, which leads to the overlapping of trend and GW spectra. Correspondingly, the technique of wave disturbances selection needs the double data filtering. At the first step a rough trend

deletion is carried out in order to reduce the spreading component, and then GW band-pass filtering has to be done. The data processing algorithm is implemented in the form of software package, using which the analysis of several months of measurements on the satellite DE 2 was carried out. Obtained results are recorded in the GW catalogue, which actually is a statistical basis for the GW further study.

In section 4 (Characteristics of GW field in upper thermosphere), a representative data sample that describes a thermosphere wave activity at 250–500 km altitudes is suggested. Basing on this, the thermospheric disturbances spectral compositions are investigated. In particular, it was established that the structural element of the thermospheric wave field is the wave packages localized both in spatial-temporal and in spectral domains. The observed composition of wave disturbances is following: the main component is GW, the second one by the intensity and registration frequency – is the thermospheric ducted modes, and the third one – is the acoustic mode. (Planetary waves were not investigated in this work).

The geographic distribution of thermospheric waves demonstrates the presence of the strongly perturbed high-latitude regions and the quiet low-latitude area. Both polar caps are completely filled with GW of auroral origin with amplitudes $a \sim 0.1$ (according to the relative density perturbation of the neutral atmosphere). In these regions GW acts as an important factor in the formation of thermospheric energy balance (after the direct heating by EUV solar radiation and at the same level as thermal conductivity caused). In the quiet zone only some GW bursts are recorded with the amplitudes $a \sim 0.01$. In the largest part of the quiet zone the intensity of the waves falls below the level of their detection.

The relations of the thermospheric perturbations and the earthquakes were established. The areas in which the generation of GW as earthquake precursors happens were defined in space (distance is about 2000 km) and in time (about –6 h).

Key words: Atmospheric gravity waves, upper atmosphere, space experiment, digital signal processing, spectral analysis.