

ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Скороход Тетяна Владиславівна

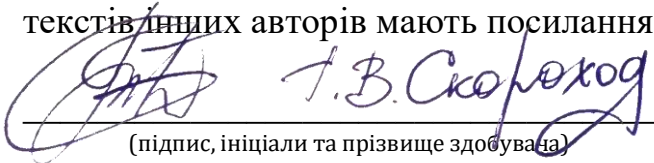
УДК 551.510.535:551.511.31

ДИСЕРТАЦІЯ
ВНУТРІШНІ ГРАВІТАЦІЙНІ ХВИЛІ В ТЕРМОСФЕРІ
ЗА ДАНИМИ ПРЯМИХ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження
природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Лізунов Георгій Вячеславович,
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник.

Київ - 2018

АНОТАЦІЯ

Скориход Т.В. Внутрішні гравітаційні хвилі в термосфері за даними прямих супутникових спостережень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Зміст анотації.

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 вигляді набору алгоритмів, математичного і програмного забезпечення. Метод включає два ключові етапи. На першому етапі проводиться селекція розподілу хвильової форми ГХ вздовж орбіти супутника $s(x)$ і обчислення відповідного спектру хвильових чисел k_x . На другому етапі теоретично оцінюються «неспостережувані» параметри ГХ – частота ω , хвильові числа k_y, k_z .

В дисертаційній роботі вперше поставлено та розв'язано задачу визначення похибок вимірювання ГХ. Для цього аналіз похибок перенесений з просторово-часової в спектральну область. Встановлено, що реєстрація спектру

k_x здійснюється з високим ступенем точності. Оцінка ω, k_y, k_z носить наближений характер з похибкою порядку півширини спектра хвильового процесу. Таким чином, дослідник, має можливість отримати досить точну інформацію про розподіл інтенсивності хвильового поля вздовж орбіти супутника, і лише наближену інформацію про частоти, довжину хвилі, напрямки поширення, фазові і групові швидкості хвиль. Зазначені обмеження виникають з перших принципів і не можуть бути усунені завдяки «більш ретельній» обробці даних.

Наріжним методичним принципом проведеного дослідження є покроковий контроль змін, які обробка даних вносить в їх частотне представлення. Завдяки цьому вдалося з'ясувати природу складності відділення хвильового збурення від трендової складової: проблема полягає не в наявності тренда як такого, а в розтіканні спектра тренда – артефакті цифрової обробки сигналів, що призводить до перекриття спектра тренда і спектра ГХ. Відповідно методика селекції хвильових збурень передбачає подвійну фільтрацію даних: на першому кроці здійснюється грубе видалення тренда з метою зменшення компоненти, що розтікається, потім – смугова фільтрація ГХ на фоні залишків тренда і високочастотних шумів. Алгоритм обробки даних реалізований у вигляді програмного комплексу, з використанням якого проведено аналіз декількох місяців вимірювань на супутнику DE 2. Отримані результати занесені до каталогу ГХ, який створює статистичне підґрунтя для подальшого вивчення фізики ГХ.

В розділі 4 (Характеристика поля ГХ у верхній термосфері) проаналізована репрезентативна вибірка даних, які характеризують хвильову активність термосфери у висотному шарі 250–500 км. На цій основі досліджено спектральний склад термосферних збурень. Зокрема встановлено, що

структурним елементом хвильового поля є хвильові пакети, локалізовані як в просторово-часовій, так і в спектральній областях. Спостережений склад хвильових збурень наступний: основною компонентою є ГХ, другими за інтенсивністю і по частоті реєстрації – дактовані моди термосферного хвилеводу, третіми – акустичні моди. (Планетарні хвилі в даній роботі не досліджувалися).

Географічний розподіл термосферних хвиль демонструє наявність сильнозбурених високоширотних областей і спокійної низькоширотної області. Обидві полярні шапки повністю заповнені ГХ аврорального походження з амплітудами $a \sim 0.1$ (за відносним збуренням густини нейтральної атмосфери). В цих областях ГХ виступають важливим фактором формування енергетичного балансу термосфери (після прямого нагріву сонячним УФ випромінюванням і на рівні з теплопровідністю). У спокійній зоні реєструються окремі сплески ГХ з амплітудами $a \sim 0.01$. У більшій частині спокійної зони інтенсивність хвильового поля падає нижче рівня виявлення.

Встановлено зв'язок термосферних збурень із землетрусами. Виділено область в просторі (відстань біля 2000 км) і часі (приблизно –6 год), в якій має місце генерація ГХ як провісника землетрусів.

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

Список публікацій здобувача.

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. Космична наука і технологія **14**(4), 3–8 (2008).

2. Лизунов, Г.В., **Скороход, Т.В.:** Планетарное распределение среднемасштабных атмосферных гравитационных волн по данным спутниковых измерений. *Космічна наука і технологія* **16**(1), 36–41 (2010).

3. **Скороход, Т.В.:** Морфологическая структура и возможные источники акустико-гравитационных волн в ионосфере. *Космічна наука і технологія* **17**(2), 61–67 (2011).

4. **Скороход Т.В.,** Лизунов Г.В. Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия* **52**(1), 1–6 (2012).

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. *J. Space Weather Space Clim.* **4**(A17), (2014).
<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». Академперіодика, Киев, 26–45 (2013).

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

Роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. **Skorokhod, T.**, Lizunov, G., Fedorenko, A.: Global Distribution of Atmosphere Gravity Waves According to DE 2 data. Сборник тезисов Девятой украинской конференции по космическим исследованиям, 54 (2009).

9. **Скороход, Т.В.**, Лізунов, Г.В.: Глобальний розподіл акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері за даними супутника DE 2. Сборник тезисов Конференции молодых ученых «Дистанционное радиозондирование ионосферы», 53 (2010).

10. **Скороход, Т.В.**, Лізунов, Г.В.: Локалізовані хвильові пакети акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері Землі. Сборник тезисов Конференции молодых ученых «Дистанционное радиозондирование ионосферы», 54 (2010).

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, 63 (2010).

12. **Скороход, Т.В.**, Лізунов, Г.В.: Морфологическая структура и возможные источники АГВ в ионосфере. Сборник тезисов 10-й украинской конференции по косм. Исследованиям, 21 (2010).

13. **Скороход, Т.В.**, Лизунов, Г.В.: Связь среднемасштабных вариаций нейтральных и ионизированных компонент термосферы по данным измерений на DE 2.. Сборник тезисов 11-й украинской конференции по косм. исследованиям, 13 (2011).

14. **Скороход, Т.В.**: Среднемасштабные атмосферные гравитационные волны на ионосферных высотах. Сборник тезисов 9-й конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 76–77 (2012).

15. Леонтьев, А.Ю., **Скороход, Т.В.**: Поглощение АГВ в термосфере в присутствии ветра. Сборник тезисов 12 Украинской конференции по космическим исследованиям, 39 (2012).

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, 29 (2014).

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, 34 (2016).

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, 35 (2016).

19. **Скороход, Т.В.**, Лизунов, Г.В.: Анализ амплитудных и частотных характеристик атмосферных гравитационных волн в верхній термосфере. 17-th Ukrainian Conference on Space Research. Abstracts, 35 (2017).

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 is carried out and the corresponding wave number spectrum is calculated. At the second stage the "unobserved" spectral parameters (frequency, wave numbers) 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 spectrum can be done with a high precision. The estimation of 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

(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. 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.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	14
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1 ВНУТРІШНІ ГРАВІТАЦІЙНІ ХВИЛІ У ВЕРХНІЙ АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	25
1.1 Вступ	25
1.2 Становлення концепції ГХ	27
1.3 Дослідження ГХ – РІЗ наземними методами	37
1.4 Супутникові спостереження ГХ	44
1.5 Висновки до розділу 1	53
1.6 Постановка завдання наукового дисертаційного дослідження	54
РОЗДІЛ 2. СЕЛЕКЦІЯ ХВИЛЬОВИХ ЗБУРЕНЬ В ДАНИХ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ	55
2.1 Вступ	55
2.2 Цифрова обробка даних	57
2.2.1 Теоретичні основи селекції хвильових збурень у вихідних рядах даних	57
2.2.2 Ризик реєстрації фіктивних частот	58
2.2.3 Явище розтікання спектру тренда	59
2.2.4 Процедура виключення тренда	61
2.2.5 Математична реалізація ковзаючого середнього	63
2.2.6 Селекція хвильових форм ГХ	64
2.2.7 Верифікація методики селекції ГХ	67
2.2.8 Оцінка інструментальної похибки	70
2.3 Каталогізація ГХ	72
2.3.1 Концепція «хвильових каталогів»	72
2.3.2 Структура каталогу ГХ	73
2.3.3 Іоносферний хвильовий сервіс	75
2.4 Висновки до розділу 2	77
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ХВИЛЬОВИХ ЗБУРЕНЬ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ГХ	79

3.1 Вступ	79
3.2 Метод спектрального оцінювання	82
3.2.1 Базові теоретичні співвідношення	82
3.2.2 Зміщення спектральних оцінок	85
3.2.3 Оцінка частоти ГХ	88
3.2.4 Оцінка компонент хвильового вектора	94
3.2.5 Приклад розрахунку спектра хвильового пакета ГХ	94
3.2.6 Методика розбиття хвильового процесу на хвильові пакети	96
3.2.7 Похибки	99
3.3 Автоматизація обробки даних	101
3.3.1 Вхідні дані	101
3.3.2 Узгодження даних приладів NACS і WATS	104
3.3.3 Детрендування та фільтрація атмосферних параметрів	105
3.3.4 Розрахунок δz та p	105
3.3.5 Розрахунок повного спектрального складу ГХ	106
3.4 Висновки до розділу 3	108
РОЗДІЛ 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЯ ГХ У ВЕРХНІЙ ТЕРМОСФЕРІ	110
4.1 Вступ	110
4.2 Спектр хвильового поля	112
4.3 Геопросторовий розподіл хвильового поля	116
4.3.1 Глобальна структура ГХ	116
4.3.2 Просторова локалізація хвильових пакетів	120
4.3.3 Залежність від геомагнітної активності	124
4.4 Зв'язок термосферних ГХ з приземними джерелами енерговиділення	126
4.4.1 Загальні зауваження	126
4.4.2 Зв'язок із землетрусами і процесами підготовки землетрусів	127
4.4.3 Інші джерела ГХ	130
4.5 Енергія ГХ	134
4.6 Висновки до розділу 4	139

ВИСНОВКИ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	144
Додаток А. Атмосферні супутникові проекти, які є джерелами даних для дисертаційного дослідження	154
Додаток Б. Програмний комплекс автоматизованої обробки та інтерпретації експериментальних даних, створений в середовищі Matlab	159
Додаток В. Каталог файлів даних супутника DE 2 та фрагмент робочого каталогу параметрів ГХ	166
Додаток Г. Просторово локалізовані сплески ГХ в спокійній області	203
Додаток Д. Довідка про використання результатів наукового дисертаційного дослідження	205

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕ-В – Aeronomy-B або Explorer-32, супутник

АЕ-С – Atmosphere Explorer-C або Explorer-51, супутник

АЕ-D – Atmosphere Explorer-D або Explorer-54, супутник

АЕ-E – Atmosphere Explorer-E або Explorer-55, супутник

DE 1 – Dynamics Explorer 1, супутник

DE 2 – Dynamics Explorer 2, супутник

NACS – Neutral Atmosphere Concentration Spectrometer, бортовий прилад на супутнику DE 2

TID – travelling ionosphere disturbance

WATS – Wind And Temperature Spectrometer, бортовий прилад на супутнику DE 2

ГНСС – глобальна навігаційна супутникова система

ГХ – внутрішні атмосферні гравітаційні хвилі

ДПФ – дискретне перетворення Фур'є

КХ випромінювання – коротко-хвильове випромінювання

НАСА – Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору

ПЕВ – повний електронний вміст іоносфери

РІЗ – рухомі іоносферні збурення

ПЗ – програмне забезпечення

ТЦ – тропічний циклон

ЧУЗІ – частотно-кутове зондування іоносфери

$s(x)$ – хід вимірюваного атмосферного параметра вздовж орбіти супутника (сигнал)

$\bar{s}(x)$ – середня складова $s(x)$ (тренд)

$S(f)$ – результат дискретного перетворення Фур'є функції $s(x)$

$x(n) = n / f_s$ – дискретна координата

f_s – просторова частота дискретизації

$f(m) = mf_s / N$ – дискретна частота

L – довжина області вимірювань вздовж орбітального витка супутника (інтервал накопичення даних)

$N = f_s L$ – кількість відліків на інтервалі вимірювань

$n, m = \overline{0, N-1}$

ω, k_x, k_y, k_z – кругова частота і три компоненти хвильового вектора

Осі координат: ОХ направлена вздовж руху супутника, ОZ вертикально вгору, ОУ лежить в горизонтальній площині перпендикулярно руху супутника, доповнюючи праву трійку векторів

$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$ – хвильове число

$k_h = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ – горизонтальне хвильове число

$\omega_g = \sqrt{(1-\gamma^{-1})g / H}$ – частота Брента – Вайсяля

$k_g = (2H)^{-1}$ – масштаб хвильових чисел ГХ

$c_g = \omega_g / k_g$ – масштаб швидкості ГХ

$c_s = \sqrt{\gamma RT / \mu}$ – швидкість звуку

$w = \omega / \omega_g$ – нормована частота

$q = k / k_g$ – нормоване хвильове число

$H = RT / \mu g$ – висота однорідної атмосфери

T – температура

R – універсальна газова стала

g – прискорення вільного падіння

γ – показник адіабати

μ – середня молекулярна маса

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

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 (Інститут іоносфери НАН та 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.

Мета і 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

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.

Особистий внесок здобувача

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 праці (виконана одноосібно)

Скороход, Т.В.: Морфологическая структура и возможные источники акустико-гравитационных волн в ионосфере. Космічна наука і технологія **17(2)**, 61–67 (2011).

здобувачем проведено візуалізацію хвильових форм на меркаторівській мапі; досліджено і описано зв'язок локалізованих сплесків ГХ із землетрусами, потужними ураганами та запусками ракет з космодромів СРСР;

– в праці

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 **14**(4), 3–8 (2008).

здобувачем проаналізовані інформативні ознаки ГХ на іоносферних висотах та проведений пошук прийнятних джерел спостережень ГХ;

– в праці

Лизунов, Г.В., Скороход, Т.В.: Планетарное распределение средне-масштабных атмосферных гравитационных волн по данным спутниковых измерений. Космічна наука і технологія **16**(1), 36–41 (2010).

здобувачем оброблено та проаналізовано біля 150 орбітальних витків супутника DE 2, систематизовано результати щодо планетарного розподілу варіацій основних атмосферних газів O та N₂ в області висот 250–450 км та проаналізована залежність локалізованих сплесків ГХ від геомагнітної активності (Kp-індекс);

– в праці

Скороход, Т.В., Лизунов, Г.В.: Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере. Геомагнетизм и аэрномия **52**(1), 93–98 (2012).

здобувачем 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 з потужними землетрусами;

– в праці

Ferencz, Cs., Lizunov, G., Crespon, F., Price, I., Bankov, L., Przepiórka, D., Brieff, 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. J. Space Weather Space Clim. 4(A17), (2014). <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014013>.

здобувачем адаптовано метод Гільберта-Хуанга для селекції хвильових пакетів ГХ, створено відповідний програмний комплекс обробки даних, створено каталог спостережених хвильових процесів;

– в праці (підрозділ колективної монографії)

Лизунов, Г.В., Леонтьев, А.В., Скороход, Т.В.: Изучение динамики ионосферы в проекте «Ионосат – Микро». Космический проект «Ионосат – Микро». Академперіодика, Киев, 26–45 (2013).

здобувачем змодельована картина вітрів в термосфері (з використанням відкритого програмного забезпечення); проведено розрахунки кількісних параметрів взаємодії ГХ з іоносферою;

– в праці (у збірнику)

Лизунов, Г.В., Скороход, Т.В. Спутниковые исследования динамических процессов в ионосфере. Космічні дослідження в Україні. Звіт COSPAR. 2008–2010. Академперіодика, Киев, 11–15 (2011).

здобувачем проведена обробка даних, систематизація та візуалізація результатів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались на наступних конференціях та семінарах:

1. Дев'ята Українська конференція з космічних досліджень (Національний центр управління та випробовування космічних засобів, Євпаторія, Крим, Україна, 31 серпня – 5 вересня 2009 р.);

2. Конференція молодих вчених «Дистанційне радіозондування іоносфери» (Інститут іоносфери, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, 6 – 9 квітня 2010 р.);

3. 17th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, Ukraine, April 26 – May 1, 2010);

4. Десята Українська конференція з космічних досліджень (Національний центр управління та випробовування космічних засобів, Євпаторія, Крим, Україна, 30 серпня – 3 вересня 2010 р.);

5. Одинадцята Українська конференція з космічних досліджень (Національний центр управління та випробовування космічних засобів, Євпаторія, Крим, Україна, 29 серпня – 3 вересня 2011 р.);

6. Девятая конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 12 – 13 апреля 2012 г.);

7. Дванадцята Українська конференція з космічних досліджень (Національний центр управління та випробовування космічних засобів, Євпаторія, Крим, Україна, 3 – 7 вересня 2012 р.);

8. Чотирнадцята Українська конференція з космічних досліджень (Ужгород, Україна, 8 – 12 вересня 2014 р.);

9. Науковий семінар (ЛЦ ІКД. Львів, Україна, жовтень 2014 р.);

10. Шістнадцята Українська конференція з космічних досліджень (Одеса, Україна, 22 – 27 серпня 2016 р.);

11. Науковий семінар (ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна, 2 грудня 2016 р.);

12. Сімнадцята Українська конференція з космічних досліджень (Одеса, Україна, 21 – 25 серпня 2017 р.);

13. Науковий семінар (Інститут іоносфери, Харківський політехнічний інститут, Харків, Україна, листопад 2017 р.);

14. Науковий семінар (ЛЦ ІКД. Львів, Україна, листопад 2017 р.);

15. Розширений науковий семінар (Лабораторія супутникових досліджень ближнього космосу, ІКД НАН України та ДКА України, Київ, Україна, лютий 2018 р.);

16. Розширений науковий семінар (Лабораторія супутникових досліджень ближнього космосу, ІКД НАН України та ДКА України, Київ, Україна, березень 2018 р.).

Структура дисертації. Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, чотирьох основних 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась 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.);

– 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.);

– 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.).

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 попиту 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.

РОЗДІЛ 1

ВНУТРІШНІ ГРАВІТАЦІЙНІ ХВИЛІ У ВЕРХНІЙ АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Вступ

Атмосферні гравітаційні хвилі на іоносферних висотах (далі – ГХ) вперше були описані Коліном Хайнсом (*Hines*) у 1960 році. За минулі відтоді більше ніж півстоліття на тему ГХ було опубліковано тисячі досліджень, результати яких систематизовані та узагальнені в низці оглядів та монографій. У цій множині публікацій можна виділити основоположні джерела, які утворюють базис сучасних знань про ГХ. Такими джерелами є:

- власне піонерська стаття Хайнса ([Hines 1960](#));
- фундаментальні огляди ([Hines 1974](#); [Yeh and Liu 1974](#); [Francis 1975](#); [Hooke 1977](#); [Госсард и Хук 1978](#); [Kato 1980](#); [Hocke and Schlegel 1996](#); [Григорьев 1999](#); [Fritts and Lund 2011](#)) плюс, можливо, ще декілька основоположних праць;
- а також перелік ключових оригінальних статей, по можливості вказаних нижче.

Разом взяті вказані праці складають «хрестоматію» по фізиці ГХ. На їх основі в даному розділі дисертації приведено огляд розвитку наукової думки про ГХ. Показано, що ця область знань містить лакуни, і це створює простір для даного дисертаційного дослідження. Матеріали публікацій викладено в історичній послідовності та розділено на структурні елементи: історичне становлення концепції ГХ; наземні методи виявлення та вивчення ГХ; 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.

Термінологічне уточнення. Для позначення атмосферних гравітаційних хвиль в літературі використовуються різні поширені назви: «внутрішні гравітаційні хвилі» (ВГХ) (наприклад, [Hines 1960](#)), «акустико-гравітаційні хвилі» (АГХ) (наприклад, [Григорьев 1999](#); [Innis and Conde 2002](#); [Antonova et al. 2006](#); [Fedorenko 2015](#) тощо), «атмосферні гравітаційні хвилі» (АГХ) (наприклад, [Francis 1975](#); [Hocke and Schlegel 1996](#) тощо). Чимало авторів переходять до загальної складової – «гравітаційні хвилі» (ГХ) (наприклад, [Hooke 1977](#); [Makhlouf et al. 1990](#); [Johnson et al. 1995](#); [Oliver et al. 1997](#); [Sauli et al. 2001](#); [Fritts and Lund 2011](#); [Chu et al. 2011](#); [Smith et al. 2013](#); [Vadas et al. 2015](#) тощо). (При цьому вважається, що в контексті фізики атмосфери термін «гравітаційні хвилі» не можна переплутати з «хвилями гравітації» як об'єктом загальної теорії відносності).

1.2 Становлення концепції ГХ

Концепцію ГХ важко пояснити просто, не ризикуючи звести її до примітивних, відірваних від дійсності схем. Це викликано, з одного боку, складною динамікою атмосферно-іоносферного середовища, виявленням якої і виступають ГХ, а з іншого боку, недостатньою кількістю інформації про хвильову активність атмосфери «як вона є насправді».

Концепція атмосферних гравітаційних хвиль введена до фізики іоносфери роботою ([Hines 1960](#)). Це у багатьох відношеннях видатна робота, яка є одним з найбільш вдалих введень у фізику ГХ. В роботі систематизовано і переосмислено солідний кавалок знань, накопичених на той час в області іоносферних спостережень і фізики космічної плазми. Результатів, представлених Хайнсом, вистачило б на кілька публікацій. Але його стаття є одним цілним дослідженням, яке народилося немов би у вже готовому вигляді, і до якого важко щось додати. Матеріал статті ретельно відібраний методично і орієнтований на широке коло вчених – фахівців у галузі теоретичної гідродинаміки, фізики атмосфери та іоносфери і суміжних дисциплін. У статті наведені наочні малюнки зі схемами, що пояснюють ідеї автора, описано деталі спостережень, розроблено математичний апарат, представлені графіки з результатами числових розрахунків.

Робота Хайнса складається з експериментальної та теоретичної частин. В експериментальній частині вказані і проаналізовані явища, що є демонстрацією існування ГХ у верхній атмосфері. До таких явищ Хайнс відносить:

1. Вітрові структури нижньої термосфери (80–120 км). На [рис. 1.1](#) показаний приклад реєстрації такої структури і її тлумачення як ГХ. Теорія Хайнса пояснює важливі властивості цих структур: 1) спостережені періоди (кілька годин) і довжин хвиль (близько 10 км) узгоджуються з дисперсійним співвідношенням ГХ, 2) варіації швидкості вітру зростають з висотою;

2. Спорадичні шари *Es*. Відповідно до розуміння тих років, Хайнс називає ці шари «дрейфи неоднорідностей на висотах областей *D* і *E*». Сучасне розуміння шарів *Es*, як результату вітрового зганяння металевих іонів, під дією ГХ з'явилося пізніше (див., наприклад, (Kelley 1989));

3. Рухомі іоносферні збурення (PI3). Це явище є найбільш значущим проявом термосферних ГХ. PI3 (в англomовній літературі – traveling ionosphere disturbance, TID) являє собою цуг коливань швидкості і концентрації плазми на висотах *F*-області з горизонтальними довжинами хвиль від сотень км до декількох тисяч км і періодами від приблизно десяти хвилин до кількох годин. Хоча перші спостереження PI3 були документовані в 1940-х роках (Beynon 1948; Munro 1948), фізична природа цього явища залишалася незрозумілою, а спроби витлумачити PI3 з позицій магнітної гідродинаміки або атмосферної аеронмії – безуспішними. Так, спостережувана швидкість поширення PI3 становить від кількох сотень м/с до майже 1 км/с. Це занадто багато, щоб інтерпретувати PI3 як дрейф іоносферної плазми в схрещених полях $E \times B$, і занадто мало, щоб трактувати PI3 як магнітогідродинамічну хвилю. Генерацію PI3 також неможливо пояснити як фотохімічну аномалію, або як результат впливу на атмосферу сонячних спалахів та/або висипань енергійних частинок.

Хайнс припустив, що PI3 є пасивним відгуком іоносферної плазми на поширення хвилі в нейтральній атмосфері, що ілюструє [рис. 1.2](#). На відміну від вітрових структур нижньої термосфери, які належать до короткохвильових і довгоперіодних ГХ, PI3 є проявом довгохвильового і короткоперіодного спектру цих хвиль. Пряма перевірка зв'язку ГХ та PI3 проведена в 1970-х роках за даними супутникових спостережень (Gross et al. 1984).

Важливим результатом теорії Хайнса стало встановлення факту, що вертикальна групова та фазова швидкості ГХ напрямлені протилежно одна до одної. Таким чином, спостережуваний низхідний рух фази PI3, який раніше трактувався як свідчення поширення енергії від магнітосферних джерел вниз, насправді є свідченням поширення енергії знизу вгору. Звідси випливає

далекоглядний висновок про те, що джерела генерації РІЗ розташовані в нейтральній атмосфері.

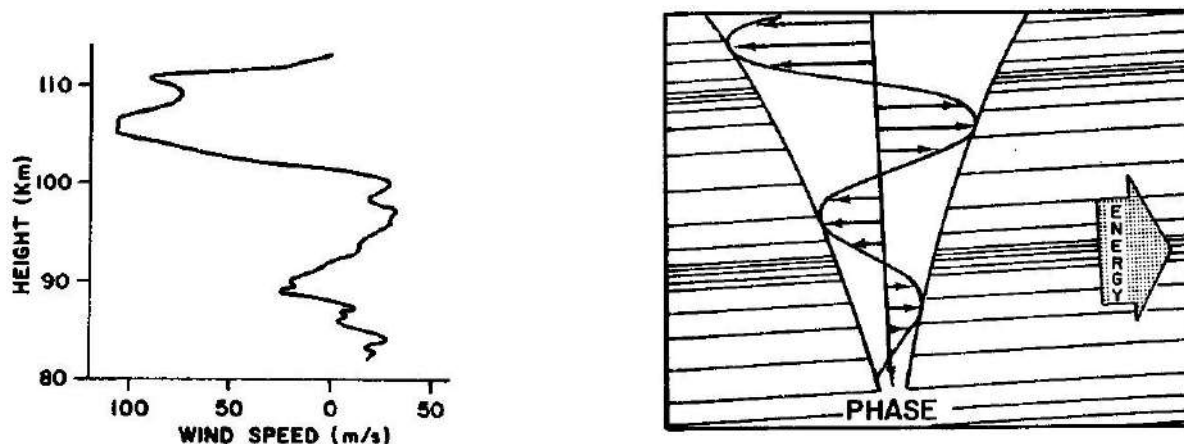


Рисунок 1.1 – Оригінальні рисунки зі статті (Hines 1960). (зліва) Вертикальна структура вітру на метеорних висотах; (справа) Її тлумачення як атмосферної гравітаційної хвилі.

Генерація РІЗ призводить до зміни умов поширення радіохвиль на трасах, які перетинають РІЗ, і зокрема, викликає варіації сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). Похибка позиціонування, що при цьому виникає, сягає більше 10 м. Тим самим РІЗ виступають фактором «космічної погоди», у зв'язку з чим розробка кількісних моделей ГХ – РІЗ розглядається сьогодні як актуальна практична задача.

Теоретична частина статті (Hines 1960) являє світу лінійну теорію ГХ. З перших принципів виведені дисперсійне і поляризаційні рівняння ГХ (що стали свого роду класикою; ці рівняння виписані далі у розділі 3). Показано, що амплітуда ГХ експоненційно зростає з висотою; звідси випливає висновок, що на деякому висотному рівні може відбуватися перекидання профілю хвилі.

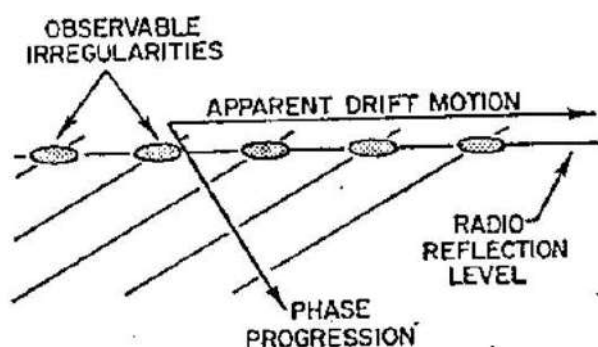


Рисунок 1.2 – Оригінальний рисунок зі статті (Hines 1960). Картина удаваного руху іоносферних неоднорідностей при поширенні ГХ, що реєструється методами радіозондування іоносфери.

Спростуючі припущення, використані Хайнсом при розробці теорії, наступні:

1. Амплітуда збурень мала (вихідні рівняння лінеаризуються);
2. У незбуреному стані атмосфера покоїться (немає вітрових зсувів);
3. У незбуреному стані атмосфера однорідна за температурою та хімічним складом (швидкість звуку і параметр висоти однорідної атмосфери не залежать від висоти);
4. Атмосфера трактується як ідеальна рідина (немає дисипації).

Робота Хайнса започаткувала лавину експериментальних і теоретичних робіт, спрямованих на вивчення ГХ, а також на подолання обмежень базової теорії. До середини 1970-х років концепція ГХ цілком склалася. Опис концепції дають фундаментальні огляди та монографії (Hines 1974a; Yeh and Liu 1974; Francis 1975; Hooke 1977; Kato 1980).

Про дисперсію ГХ. В атмосфері співіснують два типи хвиль – акустичні та гравітаційні. Сила тяжіння модифікує властивості перших та обумовлює існування других. Відповідні дисперсійні криві представлені на [рис. 1.3](#).

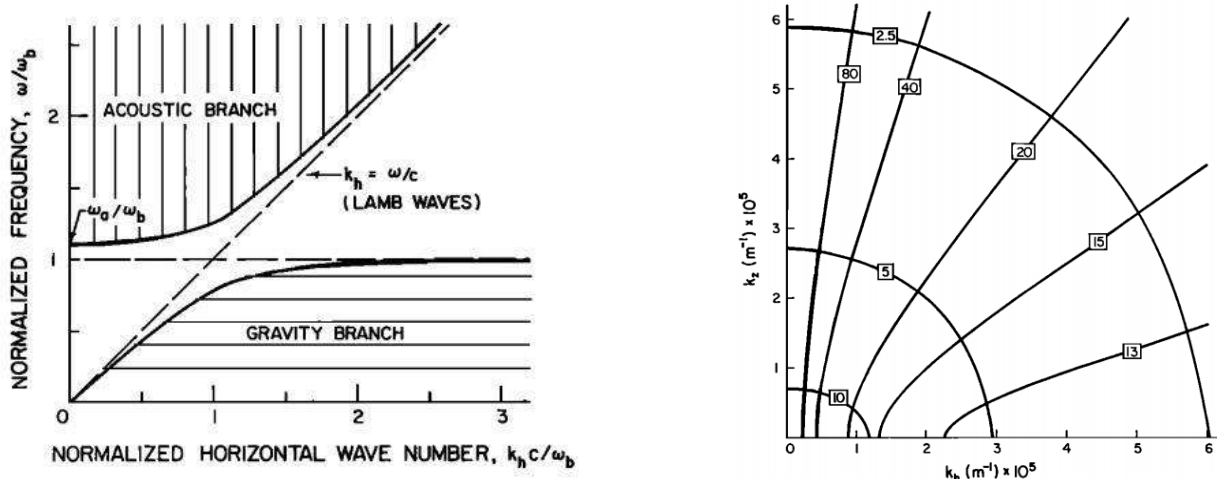


Рисунок 1.3 – Сімейства дисперсійних кривих акустичної та гравітаційної хвиль (Yeh and Liu 1974). (зліва) Залежність частоти від горизонтального хвильового числа. Акустичні та гравітаційні гілки утворюють сімейства, які, в залежності від значення вертикального хвильового числа, заповнюють на графіку заштриховані області. (справа) Рівні постійної частоти на поверхні хвильових чисел: еліпси – акустичні хвилі, гіперболи – ГХ. Числами вказані значення періодів в хвилинах (для умов середньої сонячної активності).

Максимальні фазова та групова швидкості поширення ГХ приблизно дорівнюють швидкості звуку. Але такі значення досягаються у випадку квазігоризонтального напрямку поширення та в довгохвильовій границі. Зі зменшенням довжини хвилі та/або збільшенням вертикального кута хвильового вектора фазова і групова швидкості ГХ зменшуються. В короткохвильовій границі або у випадку квазівертикального поширення швидкості ГХ прямують до нуля. При цьому фазова та групова швидкості напрямлені у вертикальній площині не однаково, а їх вертикальні компоненти напрямлені завжди протилежно одна до одної. Це означає, що якщо енергія ГХ розповсюджується косо вгору, то фаза хвилі прямує косо вниз.

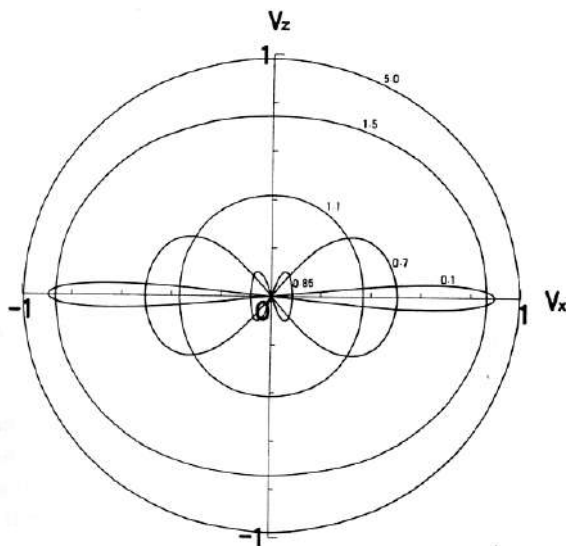


Рисунок 1.4 – Полярні діаграми групової швидкості V (нормованої на швидкість звуку), в залежності від частоти Ω (нормованої на частоту Брента - Вайсяля) (Kato 1980). Значення Ω вказані на графіку числами. Акустичні хвилі $\Omega > 1$ (еліпси), ГХ: $\Omega < 1$ (петлі).

На [рис. 1.4](#) представлені полярні діаграми групових швидкостей акустичної та гравітаційної хвиль. Можна бачити, що акустичні хвилі переносять енергію практично ізотропно, гравітаційні – квазігоризонтально. Анізотропію поширення ГХ ілюструє [рис. 1.5 \(лівий\)](#), на якому зображена форма збурення, згенерованого миттєвим точковим джерелом $\delta(t)\delta(x)\delta(y)\delta(z)$ (типу землетрусу або вибуху). Хвильовий пакет ГХ не має заднього фронту: за переднім фронтом (жирна крива) безперервно слідують гармоніки із все меншими і меншими швидкостями. Таким чином, ГХ повністю заповнюють собою область простору нижче жирної кривої на рисунку. На експерименті спектр спостережних хвиль може бути технічно обмежений деякою смугою

частот $\omega_{\min} < \omega < \omega_{\max}$. Тоді з хвильового пакета «вирізається» його частина (позначена штрихуванням).

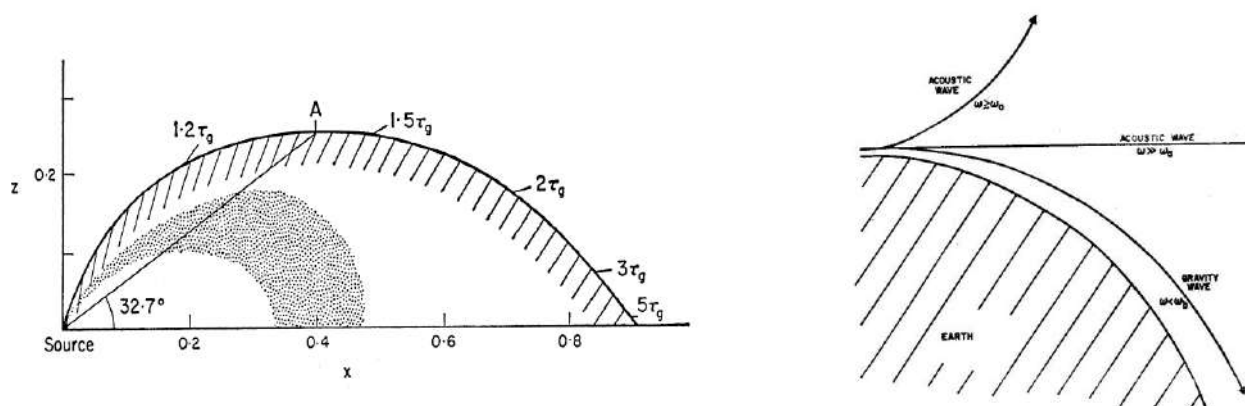


Рисунок 1.5 – (зліва) Збурення, створюване миттєвим точковим джерелом ГХ, що знаходиться в початку координат (Hines 1974b). Жирна лінія – передній фронт ГХ, на передньому фронті вказані значення періоду в одиницях періоду Брента – Вьяйсяля. (справа) Рефракція різних типів хвиль в гравітаційному полі Землі (Francis 1975).

Горизонтальні довжини хвильових пакетів ГХ на іоносферних висотах сягають тисячі кілометрів і більше. На таких «загоризонтних» дистанціях поширення, хвилі, здавалося б, мають випромінюватись в космос в наслідок кривизни земної поверхні. В дійсності, напрямок хвильового вектора ГХ контролюється напрямком сили тяжіння, і поширення ГХ відбувається так, наче Земля була б плоскою (рис. 1.5, правий). В цьому полягає радикальна різниця ГХ та акустичної моди, завдяки якій ГХ виступають ефективним агентом горизонтального транспорту енергії атмосферних збурень в планетарному масштабі.

Про роль вертикальної неоднорідності атмосфери. В теорії ГХ під неоднорідністю розумію не зміну густини повітря з висотою (барометричний розподіл, який власне і обумовлює існування ГХ), а зміну хвилеводних характеристик атмосфери (швидкість звуку тощо). В діапазоні висот від приблизно 100 км до 300 км швидкість звуку збільшується у два-три рази, що призводить до заломлення променів поширення ГХ. По аналогії з електромагнітною теорією, можна сказати, що нижня атмосфера є більш «оптично густим» середовищем, ніж термосфера. Більше того, частина спектру

ГХ, яка генерується космічними джерелами, зазнає повного внутрішнього відбивання від основи термосфери. Також має місце відбиття хвиль від поверхні землі. На [рис. 1.6](#) представлений теоретичний розрахунок променів ГХ (ліній групової швидкості) від джерела, що моделює полярне сяйво.

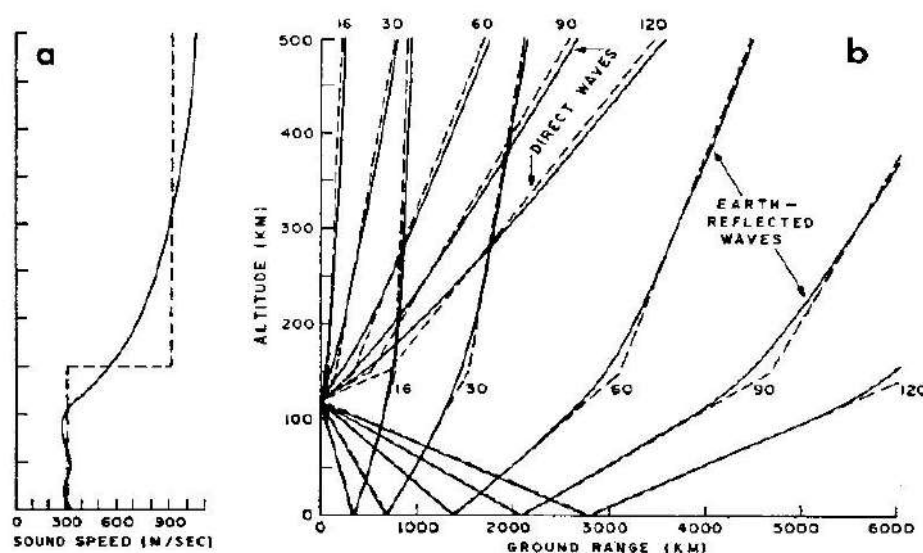


Рисунок 1.6 – а. Вертикальний розподіл швидкості звуку в атмосфері (суцільна крива) і його модельна апроксимація (пунктир). б. Променеві траєкторії ГХ, що генеруються модельним авроральним джерелом ([Francis 1975](#)).

Про термосферний хвилевод. ГХ, як велико-, так і середньомасштабні, реєструються на відстанях більш ніж 3000 км від джерела (близько 30° дуги великого кола на глобусі). Не рідкісні випадки спостережень ГХ і на набагато більших дистанціях. Під час атмосферних ядерних випробувань ГХ спостерігались на відстанях до 6500 км від епіцентру (60° дуги) ([Francis 1975](#)). Максимальна задокументована дистанція поширення ГХ складає 9000 км (біля 80° дуги) ([Rice et al. 1988](#)).

Мале розсіяння енергії ГХ на таких довгих трасах наводить на думку про хвилеводне поширення ГХ. В роботі Тома ([Thome 1968](#)) запропонована відповідна теоретична модель ([рис. 1.7](#)). Область термоклину трактується як поверхня розриву, що розділяє «гарячий» шар атмосфери, який знаходиться згори, від «холодного», який лежить нижче. Розглядається поверхнева хвиля на цій поверхні.

Чисельному розрахунку поширення поверхневих хвиль в термосфері присвячений цикл робіт Френціса, результати яких він детально описав в роботі (Francis 1975). Френціс встановив, що, враховуючи плавний профіль температури на термоклині та зростаючі з висотою дисипативні ефекти, поверхнева хвиля Тома розділяється на сімейство мод. На рис. 1.7 зображено розрахований вертикальний розподіл енергії однієї з мод.

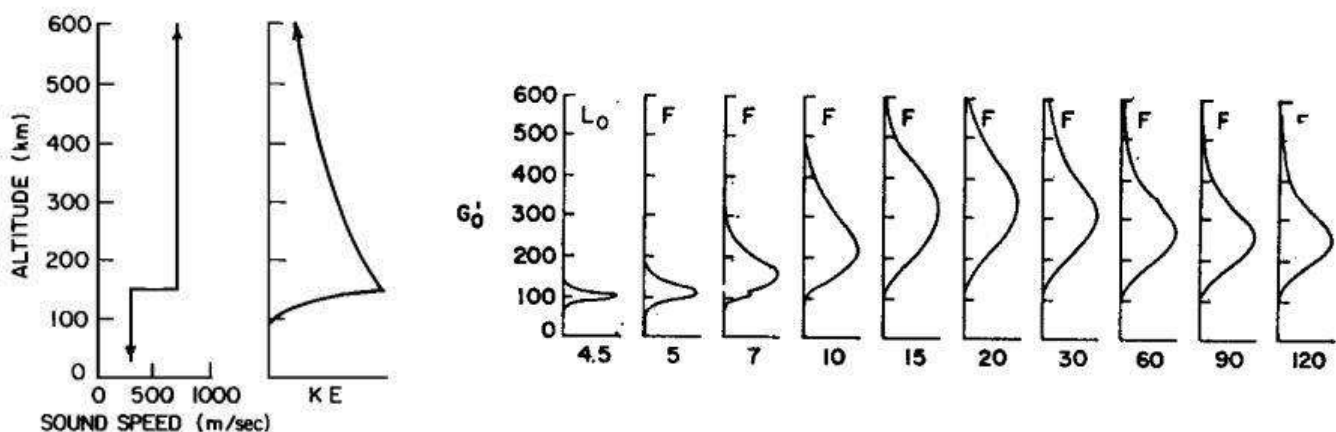


Рисунок 1.7 – Термосферна поверхнева хвиля. (зліва) Базова модель Тома (Yeh and Liu, 1974). Показана апроксимація стрибка температури в основі термосфери і вертикальний розподіл кінетичної енергії хвилі (KE). (справа) Модель Френціса (Francis, 1975). Показаний вертикальний профіль енергії моди F в залежності від періоду хвилі (вказаний числами в хв.).

Про числове моделювання ГХ. З вищесказаного стає очевидним, що провести більш менш реалістичний розрахунок поширення ГХ в атмосфері, враховуючи заломлення і відбивання хвиль, можливість генерації поверхневих мод, і дисипативні ефекти можливо тільки чисельно. В роботі (Mayr et al. 1990) розроблена числова модель хвильового поля термосфери при заданих геліофізичних умовах і джерелах генерації хвиль (задаються користувачем).

Обмеженість будь-якого чисельного експерименту полягає в тому, що в результаті його проведення будується один окремий розв'язок, з якого не відомо, як зміниться результат при зміні початкових умов та/або параметрів системи. Для отримання більш менш цілісної картини ГХ в роботі (Mayr et al. 1990) були узагальнені результати сотень числових експериментів. Створена віртуальна реальність дозволила зробити певні фізичні висновки.

На [рис. 1.8](#) показана картина генерації ГХ модельним авроральним джерелом, як вона постала в даних чисельного моделювання ([Mayr et al., 1990](#)) (цікаво порівняти з [рис. 1.5](#)). Були ідентифіковані фундаментальні складові хвильового поля. Верхні хвилі 1 і 2 є великомасштабними ГХ. Хвиля 1 поширюється квазігоризонтально зі швидкістю близькою до швидкості звуку в термосфері і має ознаки поверхневої хвилі. Затухання хвилі 1 на великих відстанях відбувається під дією в'язкості і теплопровідності. Хвиля 2 випромінюється у верхню термосферу, де вона швидко дисипує. Нижні хвилі 3 і 4 є середньомасштабними ГХ. Хвиля 3 відбивається від поверхні землі, частково відбивається від термосфери, і це призводить до її хвилеводного поширення. Затухання хвилі 3 обумовлено поступовим витоком енергії вгору. Хвиля 4 презентує частину спектру середньомасштабних ГХ, які випромінюються в термосферу після відбиття від землі. У близькій до джерела області поле ГХ формується всіма чотирма типами хвиль. У далекій зоні – хвилями 1 і 3, відповідальними за генерацію великомасштабного й середньомасштабного РІЗ.

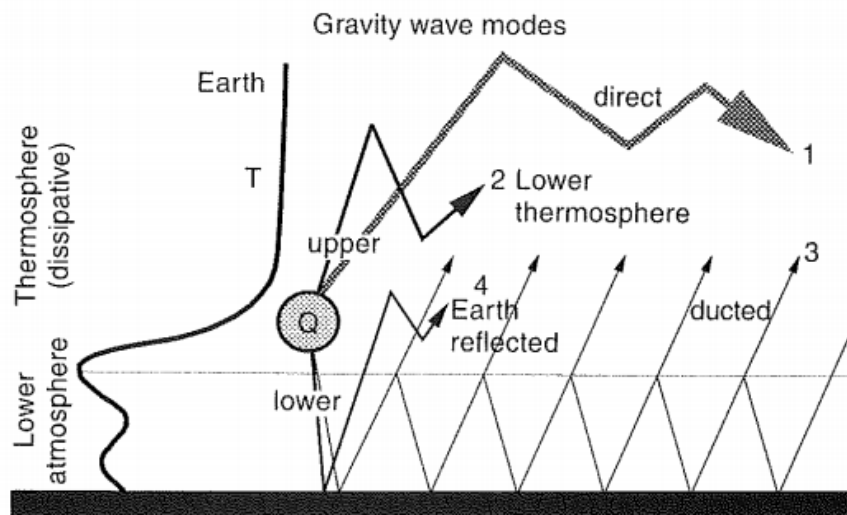


Рисунок 1.8 – Схематичне представлення 4-х складових поля ГХ, ідентифікованих в даних чисельного моделювання ([Mayr et al. 1990](#)). Зображені промені ГХ (лінії групової швидкості). Масштаби рисунку істотно спотворені: по вертикалі зображений діапазон висот до приблизно 350 км, по горизонталі – 3500 км.

Робота ([Mayr et al. 1990](#)) увійшла до «золотого фонду» теорії ГХ завдяки отриманим в ній фізичним висновкам. Але, власне модель цієї роботи (як сукупність математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення) стала потім непотрібною. Схожа доля спіткала і ряд наступних обчислювальних проектів. Сучасні дослідники віддають перевагу проведенню власних числових експериментів з використанням сучасних інформаційних технологій. В якості новітнього огляду в цій галузі див. ([Fritts and Lund 2011](#)).

1.3 Дослідження ГХ – РІЗ наземними методами

Основну частину даних про термосферні ГХ отримано завдяки наземним спостереженням РІЗ методами дистанційного зондування (з використанням іонозондів, радарів некогерентного розсіяння, доплерівського ВЧ зондування, радіопросвічування іоносфери сигналами ГНСС тощо). Огляд теми слід розпочати з роботи Джорджеса ([Georges 1968](#)).

Ряд міркувань Джорджеса з позицій сьогодення виглядають занадто спрощено, особливо звернення до маловідомої тоді теорії ГХ, але власне встановлені ним експериментальні факти увійшли в «аннали» фізики іоносфери. Загальноприйнятою є класифікація РІЗ «за Джорджесом»:

1. Дуже великі рухомі збурення (very large traveling disturbances), за сучасною термінологією – великомасштабні РІЗ (large scale TID). Джорджес відзначив, що збурення цього типу супроводжують магнітні бурі, і це свідчить про космічні джерела їх генерації;

2. Середньомасштабні РІЗ (medium scale TID);

3. А також два типи акустичних збурень, номенклатура яких не прижилась.

На [рис. 1.9](#) представлено приклад реєстрації великомасштабного РІЗ. Цей рисунок став класичним і в подальшому відтворювався багатьма авторами (наприклад, [Davis and Rosa 1969](#); [Jacobson et al. 1995](#) тощо). Щоб правильно розуміти [рис. 1.9](#) необхідно враховувати, що по вертикальній вісі відкладено діючу висоту відбиття радіосигналу. Реально на епюрі охопчений діапазон висот від приблизно 100 км до 250 км. Також важливо, що первинною є прив'язка до шкали часу, вказаній по вісі абсцис. Але завдяки тому, що дане іоносферне збурення спостерігалось в декількох рознесених пунктах зондування, вдалося оцінити швидкість його поширення, і це дозволило змодельовати просторову шкалу (нанесену також на вісь абсцис). Параметри РІЗ складають: середній період 30 хвилин, горизонтальна швидкість 700–

800 м/с (що близько до швидкості звуку в термосфері), горизонтальна довжина хвилі біля 1500 км, вертикальна довжина хвилі порядку 800 км. З [рис. 1.9](#) видно, що фаза ГХ переміщується під кутом вниз, отже, згідно теорії ГХ, енергія піднімається під кутом вгору.

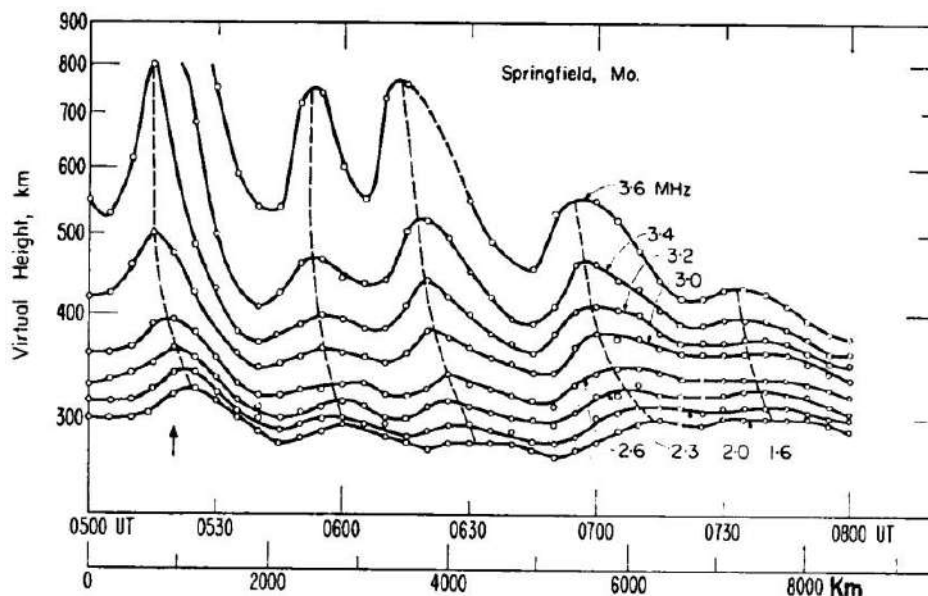


Рисунок 1.9 – Рисунок зі статі ([Georges 1968](#)) з реєстрацією великомасштабного РІЗ. Показані висотні рівні (ізолінії) концентрації електронів, отримані методом доплерівського ВЧ зондування на станції Springfield.

Величезна кількість спостережень РІЗ (накопичених протягом кількох десятиріч, в тому числі в рамках міжнародних компаній) узагальнена в оглядах ([Francis 1975](#); [Hocke and Schlegel 1996](#)). Обидва огляди починаються з категоричного наголошення на тому, що РІЗ поділяються на великомасштабні та середньомасштабні. Великомасштабні РІЗ характеризуються швидкостями поширення від 400–1000 м/с, періодами від 30 хвилин до 3 годин, горизонтальними довжинами хвиль більше ніж 1000 км. Середньомасштабні РІЗ мають менші швидкості, зазвичай, 100–200 м/с, періоди від 15 хвилин до більш ніж 1 години та горизонтальну довжину хвиль – кілька сотень км ([Francis 1975](#); [Hocke and Schlegel 1996](#)).

Той факт, що швидкість поширення РІЗ пов'язана з довжиною хвилі є прямим наслідком закону дисперсії ГХ. Важливо, що великомасштабні збурення поширюються зі швидкостями більше швидкості звуку в нижній

атмосфері. Тому, за законами геометричної оптики, великомасштабні ГХ не можуть проникати з термосфери вниз і не можуть генеруватися приземними джерелами. Середньомасштабні ГХ, навпаки, вільно поширюються між нижньою і верхньою атмосферою. Отже, іоносферний відгук на приземні джерела енерговиділення слід шукати в діапазоні середньомасштабних ГХ.

Найбільш потужними та постійно діючими джерелами генерації ГХ є процеси нагрівання та прискорення газу в авроральних зонах, а також в проекціях магнітосферних каспів на атмосферу. Поряд з цим ідентифіковані інші космічні джерела ГХ, наприклад, рух сонячного термінатора (Сомсиков 1991), сонячні затемнення тощо. Також в літературі вказується, що до генерації ГХ може призводити нелінійний розпад припливних рухів атмосфери. Задokumentованими приземними джерелами ГХ є грозова конвекція в тропосфері, виверження вулканів, землетруси і цунамі, старти важких ракет, потужні вибухи. В оглядах (Francis 1975; Hocke and Schlegel 1996) наведено відповідну бібліографію. З пізніших публікацій необхідно виділити роботи (Черногор 1999; Ямпольский и др. 2004; Antonova et al. 2006; Blagoveshchenskaya et al. 2006; Лизунов и Федоренко 2006; Afraimovich et al. 2009; Черногор 2009; Черногор 2012).

Спостереження зв'язку великомасштабних РІЗ з авроральним джерелом представлено в роботі (Rice et al. 1988). На рис. 1.10 наведено приклад реєстрації поширення РІЗ за допомогою мережі іоносферних обсерваторій і виделена область сплеску авроральної активності, яка спостерігалась оптично з супутника DE 1. З області полярного сяйва дане РІЗ поширюється (через полюс) на відстань до, принаймні, 9000 км.

Значні зусилля дослідників було покладено на зіставлення експерименту і теорії. Як буває при аналізі «живих даних», якісь результати задовільно узгоджувалися з теорією, а деякі вступали з нею в конфлікт, істинний або надуманий. В роботах (Francis 1975; Hocke and Schlegel 1996) представлено апробований в кінцевому підсумку експериментальний матеріал, що складає

базис сучасної теорії ГХ. Поряд з ним, зазначені і «апокрифічні» результати, достовірність яких викликає сумнів, і які, врешті решт, залишилися «за бортом» сьогоднішньої парадигми. (Див. обговорення спостережень РІЗ від ядерних вибухів в (Francis 1975)).

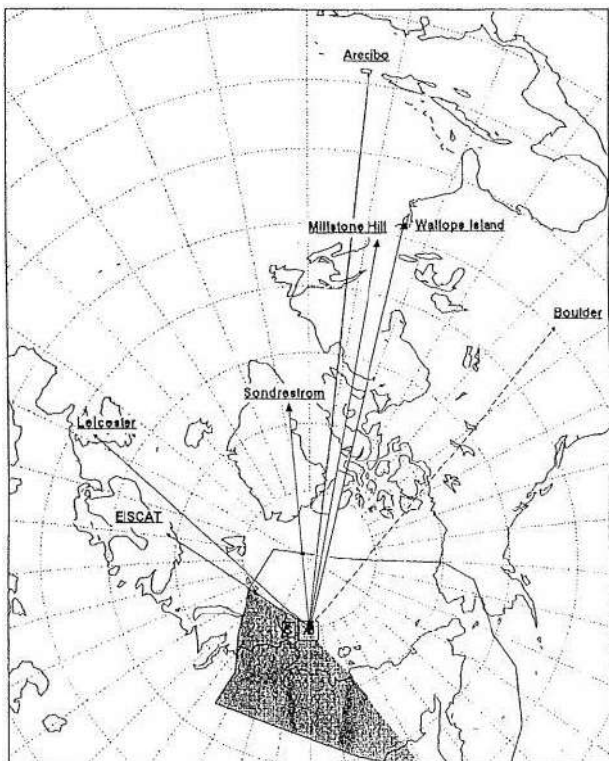


Рисунок 1.10 – Карта реєстрації ГХ – РІЗ, що поширюються від зони потужного полярного саява (Rice et al. 1988; Hocke and Schlegel 1996).

На рис. 1.11 (Hocke and Schlegel 1996) показана вертикальна структура РІЗ (за даними радара некогерентного розсіяння з мережі EISCAT). На відміну від рис. 1.9, по вертикальній осі відкладена істинна (не діюча) висота. Можна бачити, що хвильовий процес охоплює всю товщу термосфери (до екзобазис включно), а вертикальна довжина ГХ складає ~ 400 км. Нахил хвильових фронтів вказує, що фазова швидкість ГХ напрямлена косо вниз.

Подальші приклади спостережень РІЗ наведені на рис. 1.12 та рис. 1.13. Перший з графіків отримано з використанням метода частотно-кутового зондування іоносфери (ЧУЗІ) – оригінальної техніки іоносферного зондування, розробленої в Радіоастрономічному інституті НАН України, який дозволяє реєструвати горизонтальну структуру РІЗ. На рис. 1.12 представлено фрагмент анімації даних спостережень (Galushko et al. 2003). Додаткове уявлення про характерну часову структуру РІЗ дає рис. 1.13 (за даними іонозонта

Радіофізичної лабораторії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (Черногор и Барабаш 2012)).

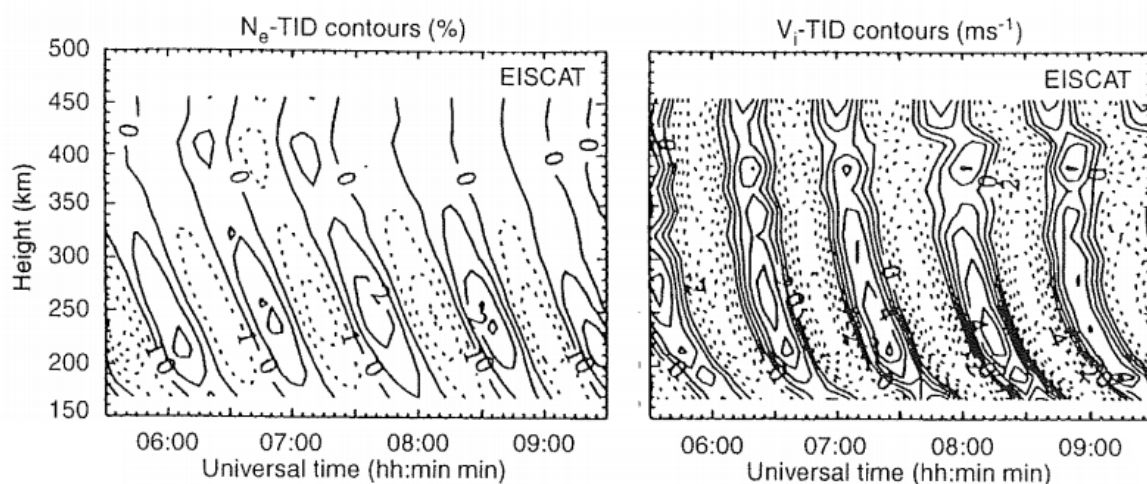


Рисунок 1.11 – Вертикальна структура РІЗ за даними радара некогерентного розсіяння з мережі EISCAT (Hocke and Schlegel 1996).

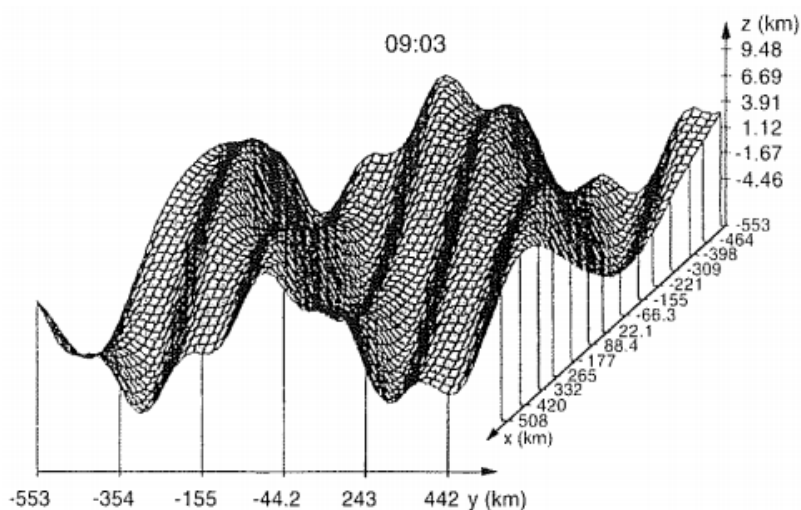


Рисунок 1.12 – Горизонтальна структура РІЗ (кадр анімації) (Galushko et al. 2003). Показана варіація висоти повного внутрішнього відбиття зондуючого сигналу від F - області іоносфери.

В кінці 1990-х років до арсеналу фізики іоносфери ввійшла нова методика зондування – вимірювання повного електронного вмісту іоносфери (ПЕВ) на трасах сигналів ГНСС (Afraimovich 2001; Perevalova et al., 2010). З її використанням групою дослідників під керівництвом Філіпа Лоньйона (Lognonné) був проведений цикл робіт з виявлення збурень ПЕВ від землетрусів і цунамі. Наведемо результати дослідження іоносферного

збурення над Великим східно-японським землетрусом (11 березня 2011 р., $M = 9,0$) (Rolland et al. 2011a).

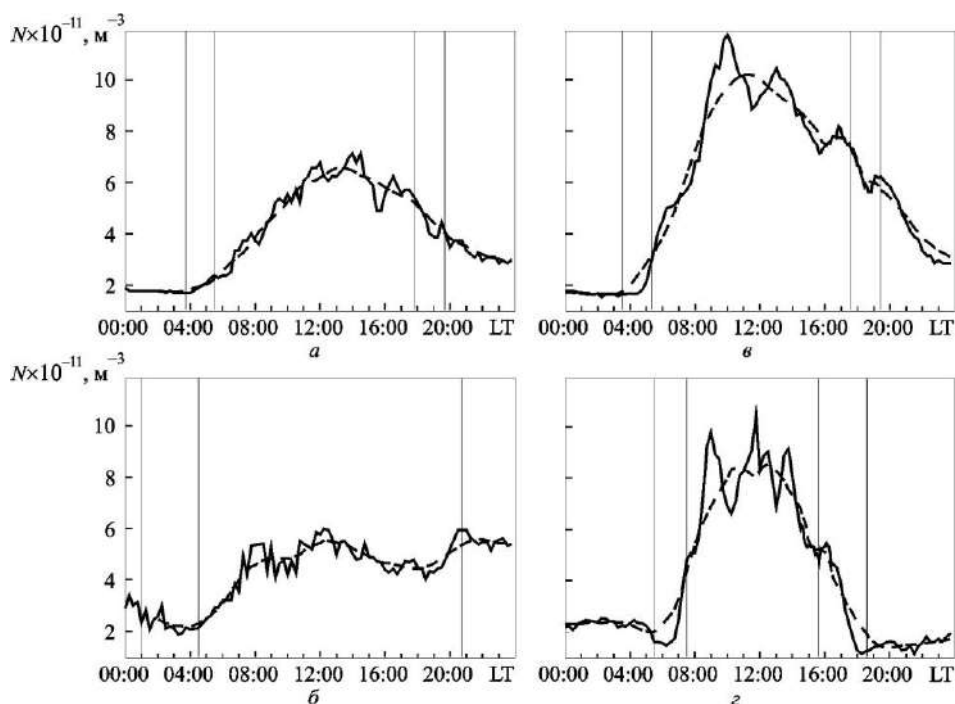


Рисунок 1.13 – Часові хвильові форми РІЗ (Черногор и Барабаш 2012).

Територія Японії вкрита щільною мережею GPS-станцій, в полі зору яких в момент цього катастрофічного землетрусу знаходилося більше 10 супутників ГНСС. За результатами обробки одержаних сигналів були складені карти ПЕВ, які дозволили з простежити картину виникнення і поширення іоносферного збурення на дистанціях до ~ 1500 км від епіцентру. Оскільки значення ПЕВ ефективно формується в області максимуму іоносферної концентрації, фактично реєструвалася горизонтальна структура збурення концентрації плазми на висоті ~ 250 км. В Інтернеті розміщена анімація результатів спостережень (Rolland et al. 2011b); фрагмент анімації зображений на [рис. 1.14](#).

Від епіцентру землетрусу розходилися концентричні кола збурень ПЕВ. Амплітуди збурень сягають 1 TECU (тобто всього кілька процентів величини ПЕВ). При цьому передній фронт збурення поширювався зі швидкістю 3,5 км/с, що інтерпретується як відгук іоносфери на біжучу по поверхні землі сейсмічну хвилю. Другий фронт поширюється зі швидкістю біля 1 км/с – це результат впливу на іоносферу акустичного (інфразвукового) імпульсу від головного

поштовху землетрусу. Далі йде цуг ГХ в діапазоні фазових швидкостей 170–230 м/с. Джерелом генерації є хвилі цунамі. Детальна структура хвильових фронтів представлена на діаграмах «час – відстань» на [рис. 1.15](#).

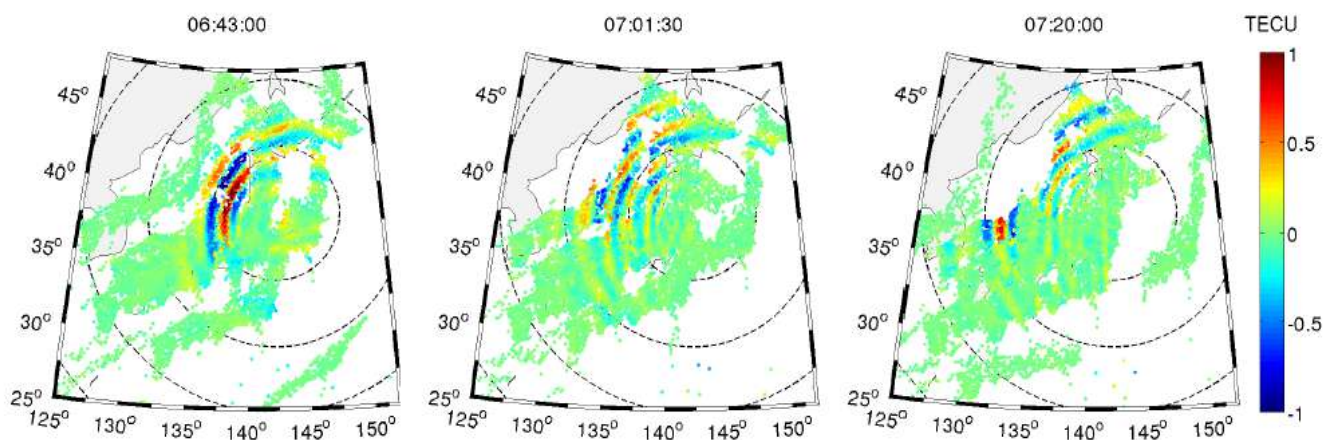


Рисунок 1.14 – Фрагмент анімації поширення іоносферного збурення від Великого східно-японського землетрусу ([Rolland et al. 2011a](#)).

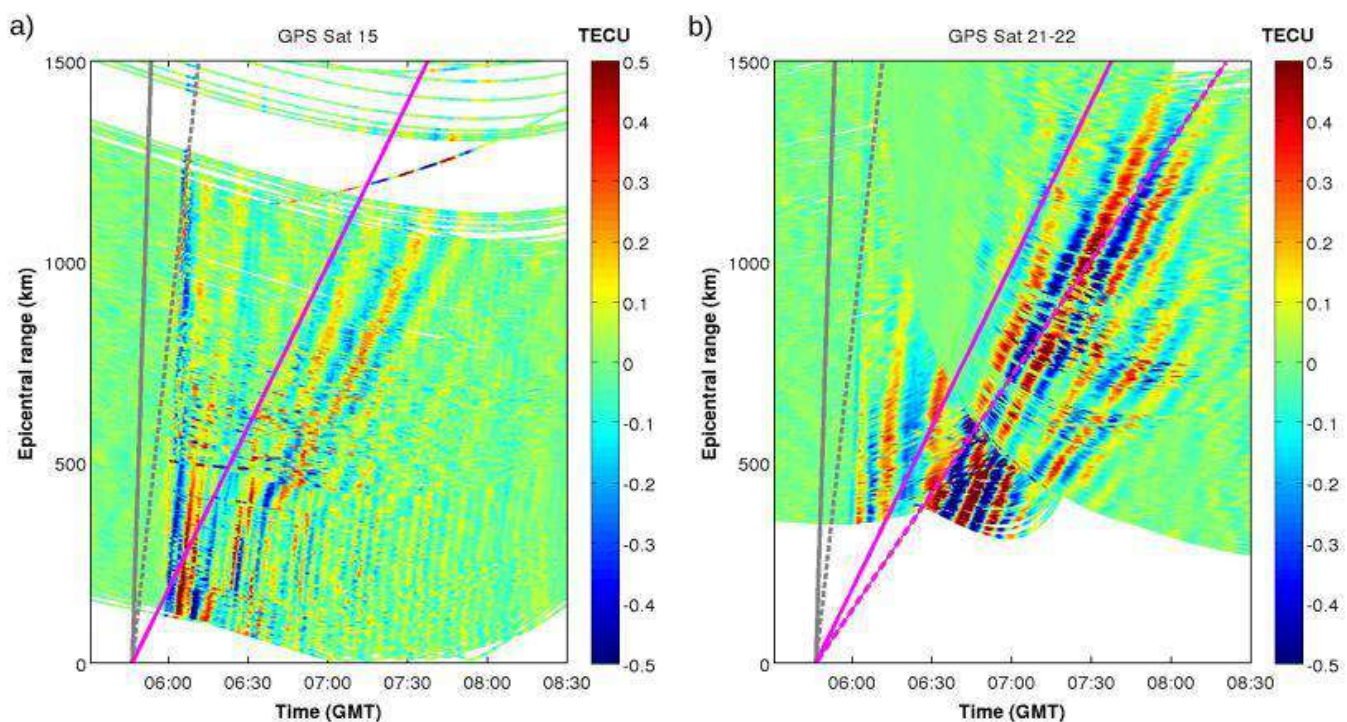


Рисунок 1.15 – Динаміка варіацій ПЕВ на діаграмі «час - відстань» (для двох різних азимутів) ([Rolland et al. 2011a](#)).

1.4 Супутникові спостереження ГХ

Вступні зауваження. Безпосереднім джерелом інформації про хвильові процеси у верхній атмосфері є вимірювання атмосферних параметрів *in situ*, на борту низькоорбітальних супутників. На відміну від наземних дистанційних спостережень, супутникові експерименти створюють нову якість діагностики атмосфери-іоносфери. По-перше, на борту супутника реєструється просторова картина атмосферних процесів. Навіть порівняно короткий сеанс вимірювань протягом одного орбітального витка супутника (тривалістю близько півтори години) дає уявлення про планетарний розподіл хвильових збурень, і це дозволяє судити про місцезнаходження джерел збурень та про еволюцію хвиль по мірі віддалення від джерела – питаннях, вивчення яких наземними методами потребувало б проведення узгоджених спостережень в багатьох рознесених пунктах іоносферного зондування. По-друге, пряма діагностика параметрів космічного середовища дозволяє провести порівняння з теорією ГХ, а також дослідити зв'язок ГХ та РІЗ. Більше того, реєстрація хвильового процесу у варіаціях одночасно декількох фізичних параметрів атмосфери відкриває можливість оцінки спектральних характеристик хвиль (цей пункт буде детально висвітлений у розділі 3).

Атмосферні супутникові проекти. Технічна складність реєстрації атмосферних параметрів *in situ* пов'язана з необхідністю виведення космічного апарату на надзвичайно низьку орбіту, хоча б нижче екзобазис (300...500 км), а краще, в область максимуму концентрації іоносферної плазми (250...300 км). Всього за космічну еру було запущено близько десяти таких супутників, оснащених приладовими комплексами для діагностики газодинамічних параметрів атмосфери (концентрація, температура, потокова швидкість та ін.). Шість з них – апарати НАСА серії Explorer. Комплекс наукової апаратури першого з апаратів (АЕ-А або Aeronomy-A, або Explorer-17; запущений в 1963 р.) відпрацював не належним чином, тому вкажемо тут 5 успішних проектів:

1. АЕ-В (Aeronomy-B або Explorer-32), середньоширотна орбіта з нахилом $i = 64,7^\circ$, запусканий у 1966 р.;

2. АЕ-С (Atmosphere Explorer-C або Explorer-51), середньоширотна орбіта з нахилом $i = 68,1^\circ$, 1973 р.;

3. АЕ-Д (Atmosphere Explorer-D або Explorer-54), полярна орбіта з нахилом $i = 90,1^\circ$, 1975 р.;

4. АЕ-Е (Atmosphere Explorer-E або Explorer-55), низькоширотна орбіта з нахилом $i = 19,7^\circ$, 1976 р.;

5. DE 2 (Dynamics Explorer 2 або Dynamics Explorer B, або DE-B, або Explorer 63), полярна орбіта з нахилом $i = 90^\circ$, 1981 р.

Супутник АЕ-В був виведений на еліптичну орбіту з перигеєм 286 км та апогеєм 2715 км. Наступні космічні апарати також спочатку запускалися на еліптичні орбіти, але потім, з використанням коригувальних двигунів, переміщалися на майже кругові орбіти з висотою 250–350 км. Технічні характеристики супутників, включаючи інформацію про склад корисного навантаження і конфігурації орбіт, наведені в монографії ([Kramer 2002](#)).

Необхідно підкреслити, що проекти НАСА являли собою послідовну серію. Зберігалася спадковість учасників проектів. На супутниках встановлювалися аналогічні комплекси наукової апаратури, які удосконалювалися від запуску до запуску. Дані вимірювань, отримані за майже 20-річний період реалізації проектів, утворюють єдиний масив наукової інформації.

Окрім «Експлорерів» було запуснено ще три супутника з контактною реєстрацією параметрів атмосфери:

6.OGO-6 (Orbiting Geophysical Observatory), орбіта сонячно-синхронна, нахил $i = 82^\circ$, перигей 413 км, апогей 1077 км, запусканий у 1969 р.;

7.ESRO-4 (European Space Research Organization), полярна орбіта $i = 91^\circ$, перигей 252 км, апогей 1186 км, запусканий у 1972 р.;

8.AEROS-A (Aero Space), майже сонячно-синхронна орбіта $i = 97^\circ$, перигей 223 км, апогей 867 км, запусканий у 1972 р.

Датчики тиску (манометри) встановлювались на «Space Shuttle» та орбітальних станціях «Spcelab 2» і «Мир», але метою цих експериментів було вивчення обтікання космічних апаратів газоплазмовим середовищем, а не реєстрація на них природних атмосферних варіацій.

Щоб зробити огляд завершеним, вкажемо проекти з діагностикою параметрів атмосфери неконтактними методами, які не являються предметом даного дисертаційного дослідження:

- супутники оптичних спостережень свічення атмосфери UARS (Upper Atmosphere Research Satellite; 1991 p.) і TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics; 2001 p.);

- супутники, що вивчали форму гравітаційного поля Землі CHAMP (Challenging Minisatellite Payload; 2000 p.) і GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment; 2002 p.). Встановлені на цих апаратах надчутливі акселерометри зареєстрували гальмування супутників на фронтах інтенсивних ГХ під час магнітних бур ([Bruinsma and Forbes 2007](#)).

Супутникові спостереження ГХ. Такі спостереження вперше задокументовані в роботі ([Newton 1969](#)) за даними супутника АЕ-В. Потім послідував ряд публікацій різних груп авторів з виявленням сигнатур ГХ у вимірах різних приладів і на різних супутниках. Лише у деяких з цих робіт належна увага приділялася обґрунтуванню того, що зареєстровані збурення є природними, а не артефактами вимірювань або обробки даних. Так, у роботі ([Hoegy et al. 1979](#)) був проаналізований зв'язок трьох незалежно виміряних параметрів атмосфери – швидкості, концентрації і температури, і було показано, що всі три параметри демонструють ідентичну хвильову складову, яка трактувалась як ГХ. Щоб співвіднести результати супутникових спостережень з картиною дистанційного зонування іоносфери, вивчалися варіації заряджених компонент. В контексті геліо- і геофізичного стану ідентифікувалися ймовірні джерела ГХ.

В роботі (Potter et al. 1976) за результатами обробки даних 338 орбітальних витків супутника АЕ-С побудовано статистику ГХ. На рис. 1.16 з цієї роботи представлені гістограми частоти виявлення хвиль різної амплітуди в залежності від широти. У відсотках вказана величина відносної варіації концентрації атмосфери $(n_{\max} - n_{\min})/n_{\text{average}}$, рівна подвоєному значенню амплітуди варіації. Максимальні збурення спостерігаються поблизу авроральних овалів, де їх амплітуди досягають 30% (в оригінальній частині дисертації буде показано, що дана оцінка в декілька разів завищена). У низькоширотних зонах амплітуди зменшуються до одиниць відсотків.

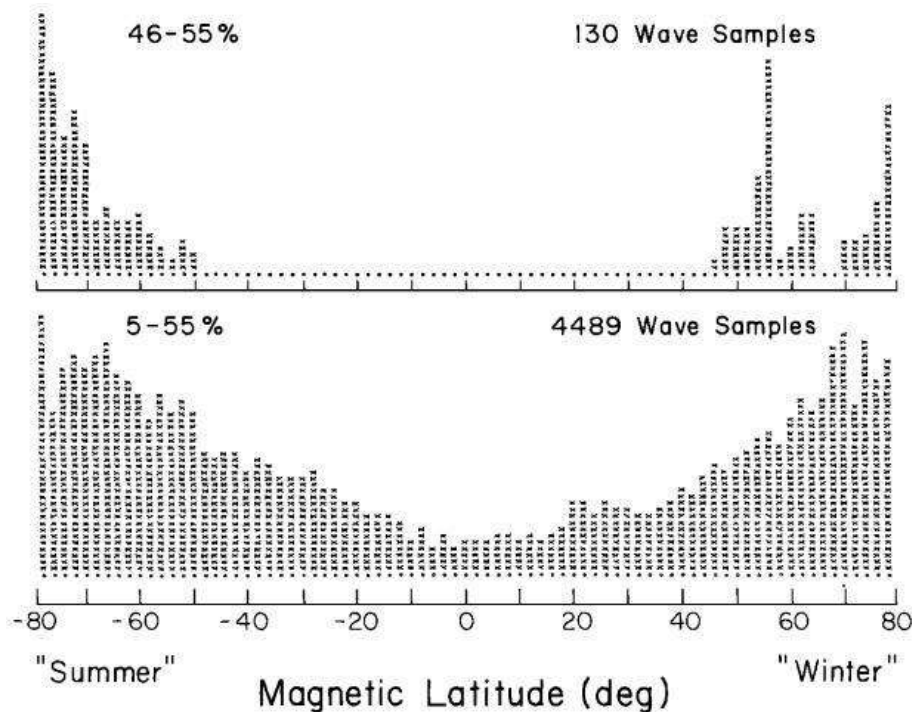


Рисунок 1.16 – Гістограми розподілу частоти виявлення ГХ по широті (Potter et al. 1976). У відсотках вказана подвоєна амплітуда ГХ. (згори) Найбільш інтенсивні збурення. (знизу) Розподіл ГХ у всьому діапазоні амплітуд.

Подальший статистичний аналіз проведений в роботі (Hedin and Mayr 1987) за даними 5000 орбітальних витків супутника DE 2, нахил орбіти якого $i = 90^\circ$ забезпечив повне широтне покриття іоносфери. У розвиток результатів роботи (Potter et al. 1976) показано, що в планетарному розподілі ГХ виділяються «штормові» високі широти, причому максимальна інтенсивність

поля ГХ досягається в полярних шапках, і «спокійні» низькі широти. У високих широтах інтенсивність ГХ корелює з магнітною активністю, що вказує на авроральні джерела генерації цих хвиль, в низьких широтах – ні.

Своєрідний підсумок дослідженням тих років підводить стаття (Gross et al. 1984). В цій роботі розроблено метод селекції ГХ на фоні низькочастотних змін атмосферних параметрів (трендів). Алгоритм селекції передбачає подвійну фільтрацію даних вимірювань: на першому кроці проводиться виключення тренда, на другому кроці залишковий ряд даних пропускається через фільтр верхніх частот (ФВЧ) з метою остаточного вилучення залишків тренда. Варіюючи частоту зрізу ФВЧ, можна пропускати або ж видаляти з хвильової форми ГХ довгохвильові складові (рис. 1.17).

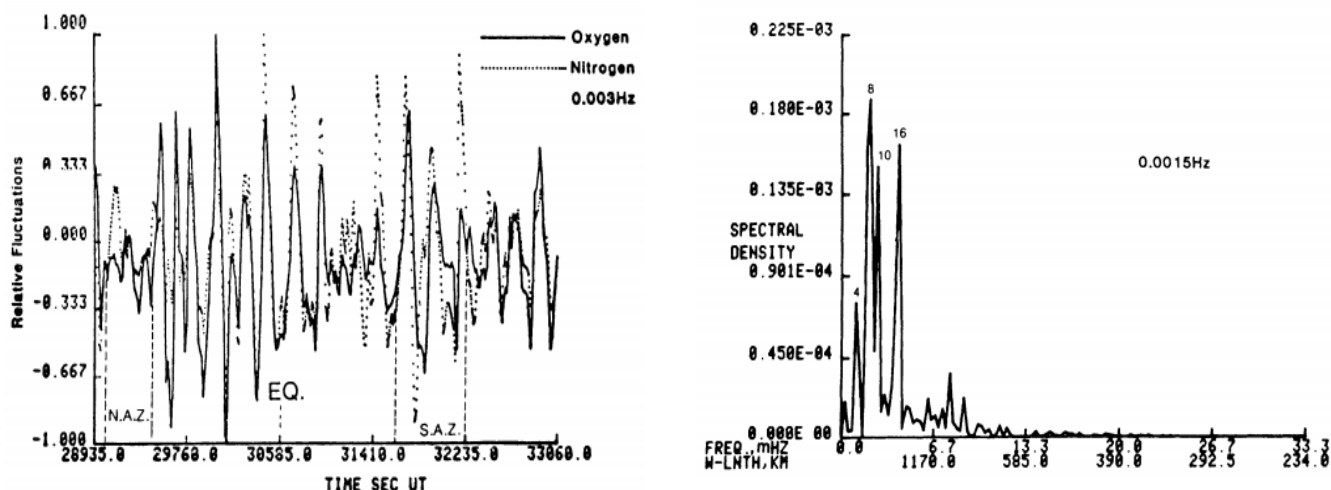


Рисунок 1.17 – З роботи (Gross et al. 1984). (зліва) Хвильові форми ГХ. (справа) Відповідний спектр ДПФ.

Ідея подвійної фільтрації виявилася ключем до обробки супутникових даних. Але, наскільки можна судити, це знання було в подальшому втрачено. (Що здається дивним, оскільки стаття (Gross et al. 1984) написана глибоко і прозоро, і тому що її автори – визнані вчені). У всякому разі, більшість подальших дослідників обмежувалася мінімальною обробкою даних (зазвичай тільки виключенням тренда) і візуальним аналізом отриманих варіацій.

В роботі (Gross et al. 1984) представлений кількісний аналіз параметрів ГХ. Встановлено, що атмосферні збурення є широкосмуговими, в діапазоні горизонтальних довжин хвиль від, принаймні, 400 км (менші довжини хвиль не

розрізнялися внаслідок низької частоти дискретизації даних АЕ-С) до 5000 км. В спектральному розподілі інтенсивності спостерігається ряд максимумів, що лежать в діапазоні як середньомасштабних, так і великомасштабних ГХ (рис. 1.17 (правий)).

Спеціальною метою роботи (Gross et al. 1984) була перевірка Хайнсівської гіпотези про зв'язок ГХ та РІЗ. Труднощі перевірки полягають в необхідності відділення плазмових варіацій, викликаних рухом нейтральної компоненти, від плазмових варіацій магнітогідродинамічної природи. Отримані наступні підтвердження зв'язку збурень нейтральних і заряджених компонент: 1) візуальна схожість хвильових форм збурень, 2) а також їх спектрів в діапазонах довжин хвиль ГХ, 3) теоретичне моделювання параметрів ГХ та РІЗ, результати якого узгоджуються з даними спостережень.

З подальших публікацій слід виділити статті (Фаткуллин и др. 1984; Федоренко 2009; Федоренко 2011; Fedorenko et al. 2015). В роботі (Mayr et al. 1990) подано детальний огляд вимірювань приладу WATS (Wind And Temperature Spectrometer) на супутнику DE 2. Наведені десятки епюр, що створюють уявлення про характер сигнатур ГХ в супутникових даних. Один з рисунків відтворено на рис. 1.18.

Спектральні оцінки. Алгоритм обчислення повного набору спектральних ГХ $\{\omega, k_x, k_y, k_z\}$ за даними багатокomпонентних супутникових спостережень належить Іннісу та Конде (Innis and Conde 2002). Ця робота містить скрупульозну інструкцію обробки даних і приклади її застосування до аналізу спостережень супутника DE 2. Усі наступні автори спираються на методику (Innis and Conde 2002), посилаючись або іноді забуваючи послатися на першоджерело, і вносять в алгоритм аналізу ГХ свої лише незначні новації.

В роботі (Innis and Conde 2002) проведено детальне порівняння теоретичних оцінок параметрів ГХ з їх спостереженими значеннями (швидкість і зміщення повітряних частинок, варіації температури і концентрації тощо). Показано, що в межах точності і роздільної здатності

супутникових вимірювань теорія та експеримент узгоджуються. З цієї точки зору, роботу (Innis and Conde 2002) можна розглядати як експериментальне підтвердження теорії Хайнса, а в більш широкому контексті, як доказ правомірності використання класичної гідродинаміки для опису атмосферних процесів на масштабах ГХ.

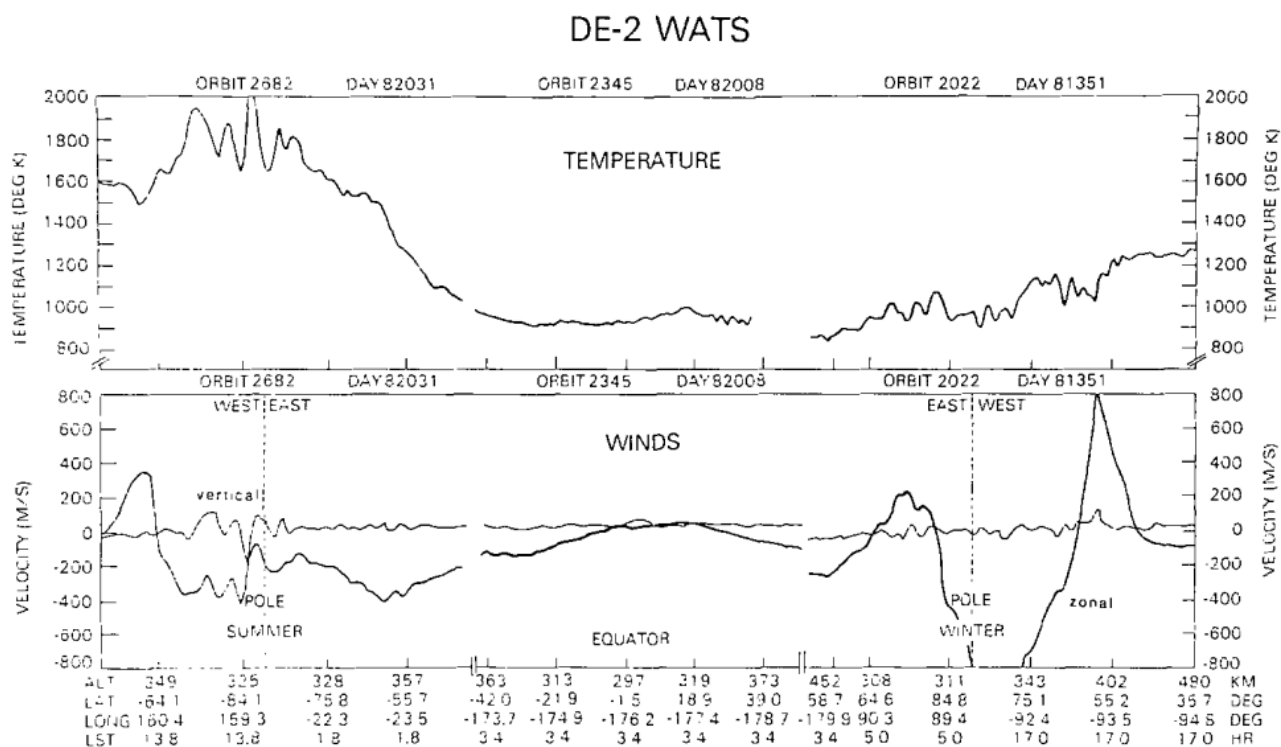


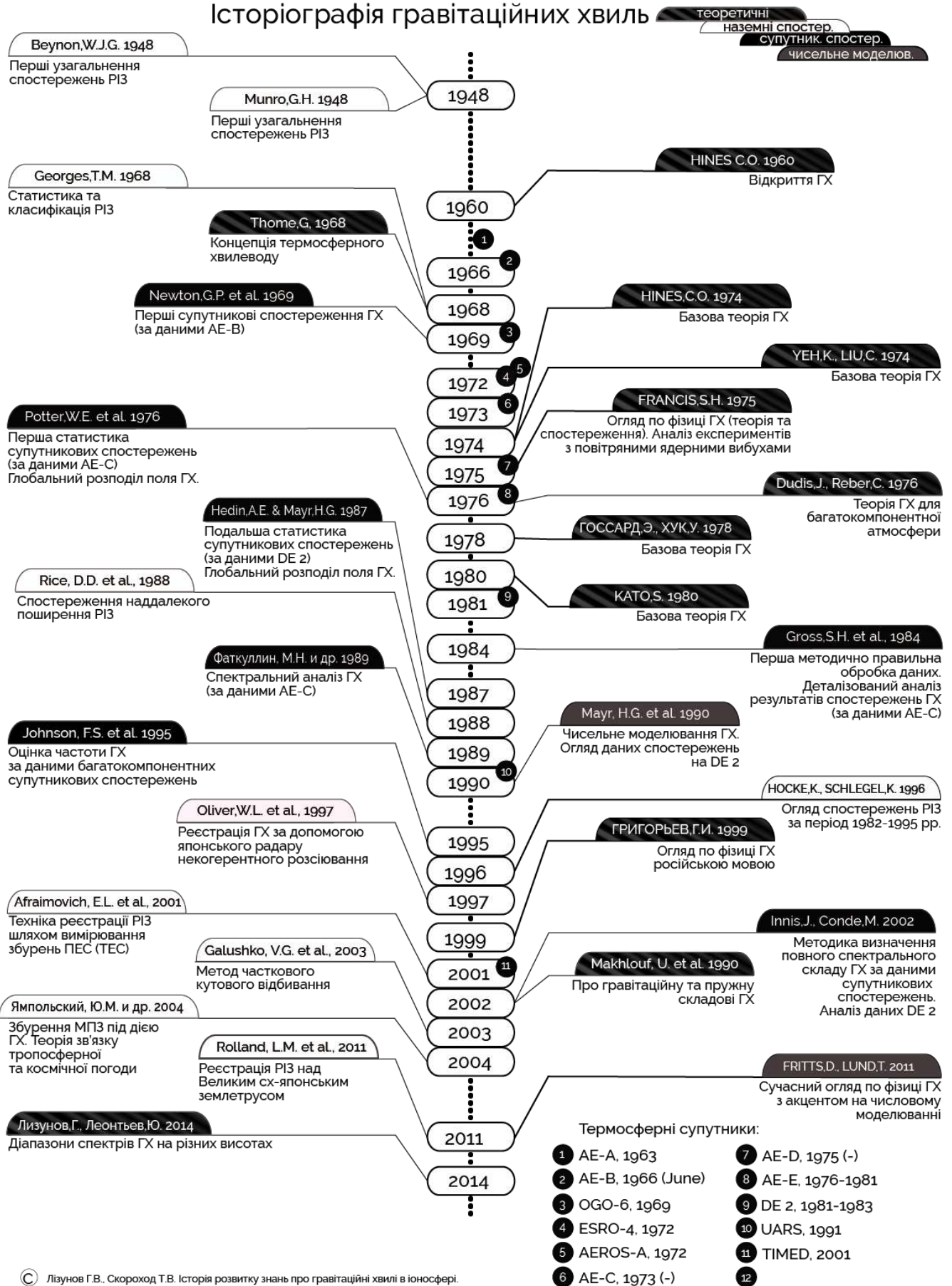
Рисунок 1.18 – Комбінована діаграма планетарного розподілу атмосферних параметрів за даними спостережень на декількох орбітальних витках супутника DE 2 (прилад WATS) (Mayr et al. 1990). Верхня панель – температура, нижня панель – вертикальна і горизонтальна швидкості вітру.

Робота (Innis and Conde 2002), в свою чергу, спирається на доробок (Johnson et al. 1995; Makhlof et al. 2002). В оригінальній частині дисертації ці джерела будуть розглянуті предметно. Зараз же обмежимося певним загальним зауваженням. Вимірювання спектральних параметрів хвильового процесу, за самою своєю природою, є «спектральним оцінюванням». Тим не менше, у всіх без винятку статтях на дану тематику, не виникає уявлення про похибки такого оцінювання, причому так відбувається не тому, що похибки малі, а тому, що автори не аналізують це питання. Розуміючи цю прогалину, дослідники, в більшості своїй, обмежуються аналізом хвильових збурень

великої амплітуди на фоні малих трендів, коли ГХ чітко виділяються на експериментальних епюрах і параметри хвиль можна оцінювати візуально, без додаткової обробки даних. Отримана таким чином якісна інформація представляється задовільною до тих пір, поки дослідник не ставить за мету вивчення ГХ малої амплітуди (а таким є більшість ГХ) і не претендує на кількісне визначення параметрів ГХ.

Для завершення бібліографічного огляду наведемо діаграму, яка ілюструє хронологію вивчення ГХ ([рис. 1.19](#)).

Історіографія гравітаційних хвиль



© Лизунов Г.В., Скороход Т.В. Історія розвитку знань про гравітаційні хвилі в іоносфері.

Рисунок 1.19 – Історична послідовність ключових публікацій по фізиці ГХ.

1.5 Висновки до розділу 1

Супутникові вимірювання атмосферних параметрів є безпосереднім джерелом інформації про процеси, що протікають у верхній атмосфері Землі. Встановлювані на супутниках приладові комплекси забезпечують вимір газодинамічних параметрів атмосферно-іоносферної середовища, і це відкриває глибину діагностики, недосяжну при використанні наземних засобів зондування іоносфери.

Однак обробка супутникових даних стикається з труднощами, які не висвітлюються, а фактично замовчуються в літературі. (Уявлення про існуючу методичну базу обробки даних створюють роботи ([Gross et al. 1984](#); [Innis and Conde 2002](#))). Так, у всіх відомих нам публікаціях з реєстрацією термосферних ГХ відсутнє уявлення про похибки вимірювання амплітудних і частотних характеристик ГХ, причому не тому, що похибки малі, а тому, що автори не досліджували це питання. Більш того, різні групи авторів використовують різні методи фільтрації ГХ, і виявляється, що застосування різних цифрових фільтрів до тих самих наборів даних породжує на виході відмінні хвильові форми. За відсутності аналізу похибок, це ставить результати обробки під сумнів. Найбільш необґрунтовано виглядає селекція ГХ малої амплітуди, хоча такими є переважна більшість спостережених збурень.

Таким чином, архіви супутникових спостережень є унікальним ресурсом інформації щодо хвильової активності верхньої атмосфери, досі мало затребуваним і досить поверхнево розробленим науковою спільнотою. Дана дисертаційна робота має на меті заповнити цю прогалину.

1.6 Постановка задачі наукового дисертаційного дослідження

Вище описані обставини окреслюють предмет даної дисертаційної роботи, задачами якої є:

1. Розробка комплексного методу селекції і кількісного аналізу параметрів ГХ за даними супутникових вимірювань. Створення необхідного математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення;

2. Проведення послідовного і систематичного аналізу даних супутникових спостережень ГХ, накопичених за космічну еру. Каталогізація виявлених хвильових подій.

3. На цьому підґрунті, дослідження властивостей ГХ в термосфері Землі (морфологічної структури і характеристик хвильового поля) і зв'язку ГХ з космічними і приземними джерелами енерговиділення.

РОЗДІЛ 2.

СЕЛЕКЦІЯ ХВИЛЬОВИХ ЗБУРЕНЬ В ДАНИХ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

2.1 Вступ

У розділах 2 і 3 розроблено комплексний метод селекції та аналізу параметрів ГХ за супутниковими даними, реалізований у вигляді набору алгоритмів, математичного і програмного забезпечення. Метод включає наступні взаємопов'язані етапи обробки даних:

1. Фільтрація хвильових збурень в даних вимірювань;
2. Візуалізація та геопросторова прив'язка спостережених 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.

Вхідними даними для обробки служать ряди вимірювань газодинамічних параметрів нейтральної атмосфери (концентрацій газових компонент, температури та потокової швидкості), зібрані в результаті реалізації проектів АЕ-С, АЕ-Д, АЕ-Е та DE 2 в період з 1973 до 1983 рік. Дані проектів АЕ-Е та DE 2 загальнодоступні на сайті НАСА «National Space Science Data Center». Технічні характеристики супутників, включно з інформацією про прилади корисного навантаження і конфігураціях орбіт, наведені в [Додатку А](#) (АЕ-А: [Reber and Nicolet 1965](#); [Newton et al. 1965](#); [Brace et al. 1965](#); [King-Hele et al. 1965](#); АЕ-В: [Newton et al. 1969](#); АЕ-С, -Д, -Е: [Champion et al. 1973](#); [Dalgarno et al. 1973](#); [Spencer et al. 1973](#); [Nier et al. 1973](#); [Pelz et al. 1973](#); [Spencer et al. 1973](#); [Rice et al. 1973](#); [Hoffman et al. 1973](#); DE 2: [Carignan et al. 1981](#); [Spencer et al. 1981](#); [Heelis 1982](#); [Kramer 2002](#)).

Розділ 2, окрім вступу та висновку, складається з 2-х основних підрозділів. У [підрозділі 2.2](#) розроблений метод фільтрації хвильових форм ГХ на фоні інших типів атмосферних неоднорідностей (тренди, шуми). З цією метою адаптовані класичні методи цифрової обробки сигналів ([Марпл-мл. 1990](#); [Сергиенко 2002](#); [Лайонс 2006](#)), а також врахований рецепт однієї з попередніх робіт в області супутникових спостережень ГХ ([Gross et al. 1984](#)). Результати обробки зберігаються в каталозі хвильових форм ГХ, який поповнюється по мірі аналізу даних. Для зручності звернення до каталогу створено спеціальний інформаційний сервіс. Опис каталогу і сервісу дано в [підрозділі 2.3](#).

Матеріали розділу 2 ґрунтуються на публікаціях здобувача ([Лизунов и др. 2008](#); [Лизунов и Скороход 2010](#); [Ferencz et al. 2014](#); [Лизунов и Скороход 2016](#); [Скороход і Лізунов 2016](#); [Скороход и Лизунов 2017](#)).

2.2 Цифрова обробка даних

2.2.1 Теоретичні основи селекції хвильових збурень у вихідних рядах даних

Серед переліку факторів, які обмежують можливості діагностики ГХ і виступають джерелами похибок такої діагностики, слід виокремити декілько основних. По-перше, це неповнота супутникових вимірювань. З позицій теоретичної гідродинаміки, вичерпну інформацію про хвильовий процес 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 $\vec{V}(t, x, y, z)$. Реалізувати в космосі належну діагностику зазначених розподілів практично неможливо, оскільки для цього довелося б створити тривимірну мережу з тисяч синхронізованих датчиків, яка би покривала область поширення ГХ впродовж хоча б декількох тисяч км. На практиці на борту супутника реєструється одновимірний розподіл частини вказаних параметрів: $s = s(x)$, де координата x відраховується вздовж орбітального витка. Відповідно, дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) повертає дослідникові просторовий спектр даних $S = S(k_x)$. Інші хвильові параметри – частота ω і компоненти хвильового вектора k_y, k_z – в супутниковому експерименті не реєструються.

Крім того в експериментальних даних змішуються часові і просторові варіації хвильового поля:

$$s(x) = s(t, x) \Big|_{t=x/V_{sc}}, \quad (2.1)$$

де V_{sc} – швидкість супутника. Рис. 2.1 схематично ілюструє експериментальну ситуацію. Епюри на рис. 2.1a зображують миттєву форму ГХ в моменти часу t_1 (початок процесу) і t_2 (кінець). В системі відліку супутника форма хвильового процесу розтягується, якщо супутник і хвиля рухаються в одному напрямку (цей варіант показаний на рис. 2.1b), і скорочується, якщо супутник і хвиля

рухаються назустріч одне одному. Оскільки швидкість низькоорбітального супутника (7,8 км/с) значно більше фазової швидкості ГХ (сотні м/с), вказане спотворення хвильової форми є незначним. Оцінимо похибку визначення параметрів ГХ, яка при цьому виникає.

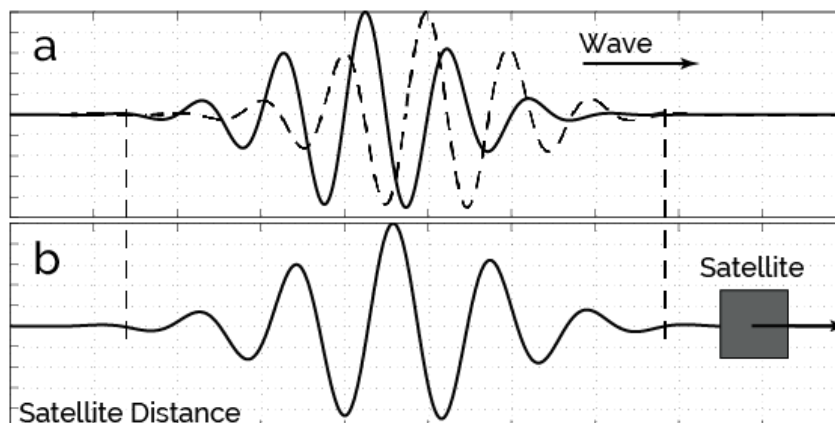


Рисунок 2.1 – Стосовно зміщення часових і просторових варіацій хвильового поля при реєстрації на борту супутника. (а) Просторовий розподіл ГХ в моменти часу t_1 (суцільна крива) та t_2 (пунктир). (б) Спостережена хвильова форма.

При реєстрації на супутнику частота хвильового процесу зазнає доплерівський зсув:

$$\omega' = \omega - k_x V_{SC} = -k_x V_{SC} \left(1 - \frac{\omega}{k_x V_{SC}} \right), \quad (2.2)$$

де ω' – частота, що реєструється, ω – частота в нерухомій системі відліку, k_x – компонента хвильового вектора уздовж орбіти супутника. Оскільки $\omega/(k_x V_{SC}) \ll 1$, супутникові дані з високою точністю відтворюють спектр хвильових чисел:

$$k_x \approx -\omega' / V_{SC}. \quad (2.3)$$

Примітка. В даному розділі, у зв'язку з використанням апарату цифрової обробки сигналів, використовується параметр просторової частоти ГХ:

$$f = 1/\lambda_x = k_x / 2\pi \approx \omega' / (2\pi V_{SC}), \quad (2.4)$$

де λ_x – довжина хвилі вздовж траєкторії супутника.

Нехтування членом $\omega/k_x V_{SC}$ у формулі (2.2) призводить до незначної похибки вимірювання параметру k_x порядку 5–10%. Як буде показано далі в Розділі 3 (підрозділ 3.2.2), ця похибка допускає корекцію.

Інша фундаментальна складність полягає в необхідності виключення з вихідних даних потужних низькочастотних змін атмосферних параметрів – трендів. Як правило цю проблему більшість авторів намагаються не афішувати, тому публікуються приклади ГХ великої амплітуди на фоні слабких трендів, коли хвильові збурення чітко виділяються на експериментальних епюрах, і параметри хвиль можна оцінювати візуально, без спеціальної обробки даних (Newton et al. 1969; Hoegy et al. 1979; Mayr et al. 1990; Johnson et al. 1995; Innis and Conde 2002; Earl et al. 2008 та ін.). Але такі випадки нетипові. Зазвичай дослідник стикається з необхідністю розпізнавання слабких збурень на фоні сильних трендів. Як приклад на рис. 2.2 наведено запис концентрації атомарного кисню [O] на одному з орбітальних витків DE 2 (рис. 2.2 а). Можна бачити, що протягом сеансу вимірювань параметр [O] змінюється більше ніж на порядок величини. Невеликі «брижі» на експериментальній кривій є ГХ.

Здавалося б, задача селекції ГХ може бути розв’язана шляхом смугової фільтрації даних вимірювань, оскільки із загальних фізичних міркувань відомо, що процеси, які обумовлюють варіації атмосферних параметрів вздовж орбіти супутника, розділені в спектральній області (рис. 2.3). Низькочастотний тренд з масштабом понад 10000 км відображає глобальну залежність температури і густини атмосфери від висоти, широти і локального часу (область 1 на рис. 2.3). ГХ зосереджені в діапазоні горизонтальних довжин хвиль 100–2500 км (область 2). У короткохвильовій області 3 домінують шуми. Отже для селекції ГХ треба застосувати до спектру даних ідеальний фільтр (лінія 4). Насправді ж вказана процедура призводить до артефактів цифрової обробки, які спотворюють вихідний сигнал. У літературі, присвяченій дослідженню ГХ, ці обставини були прокоментовані виключно в роботах автора дисертації (Ferencz et al. 2014; Скороход і Лізунов 2016; Скороход и Лизунов 2017).

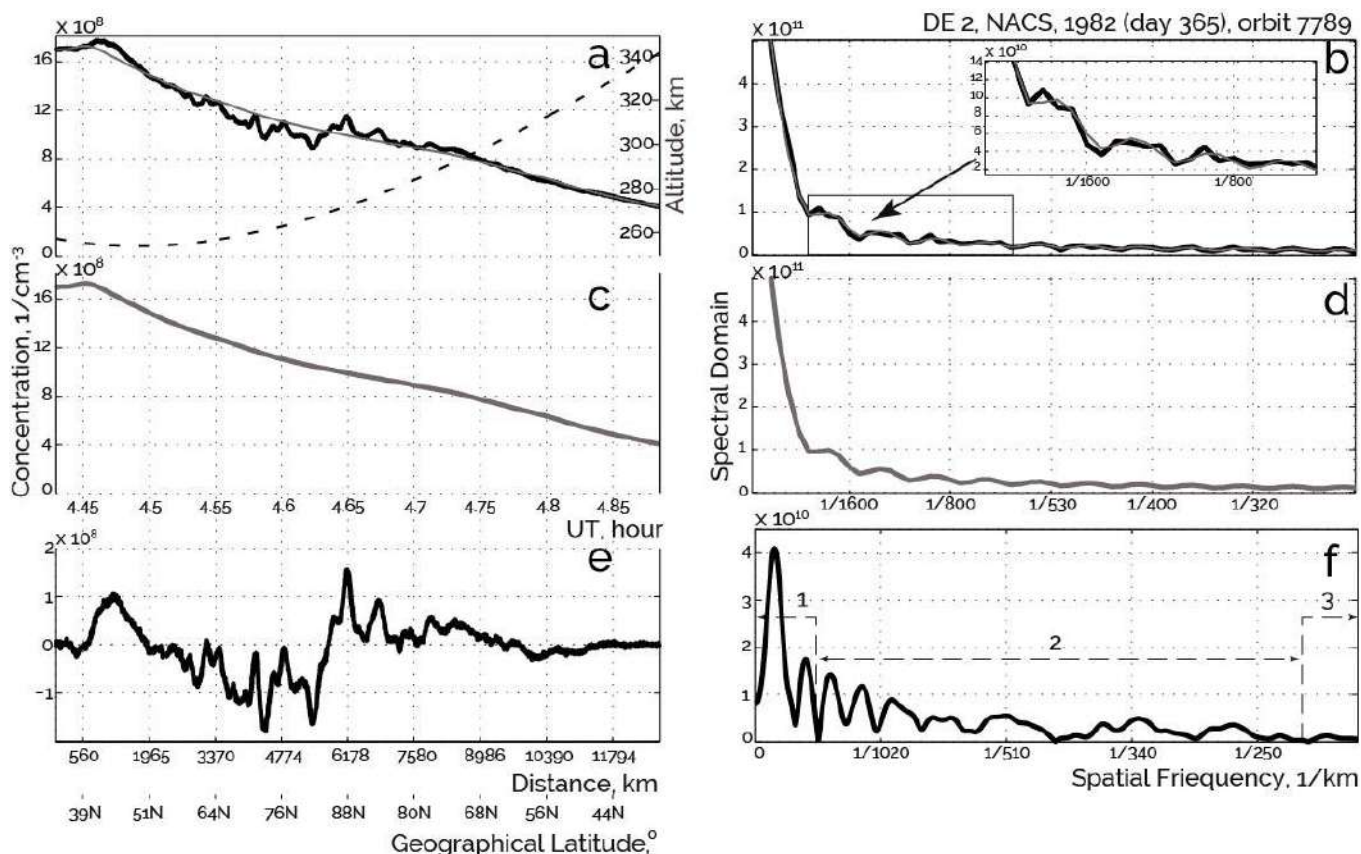


Рисунок 2.2 – Селекція хвильових збурень в розподілі концентрації атомарного кисню на орбітальному витку супутника DE 2. (а) Дані вимірювань (чорна суцільна лінія), висота супутника (пунктирна лінія). (b) Амплітудний спектр даних (чорна лінія) і тренда (сіра лінія). (c) Тренд. (d) Амплітудний спектр тренда. (e) Різницевий сигнал. (f) Амплітудний спектр різницевого сигналу (1 – залишки тренда, 2 – діапазон ГХ, 3 – шуми).

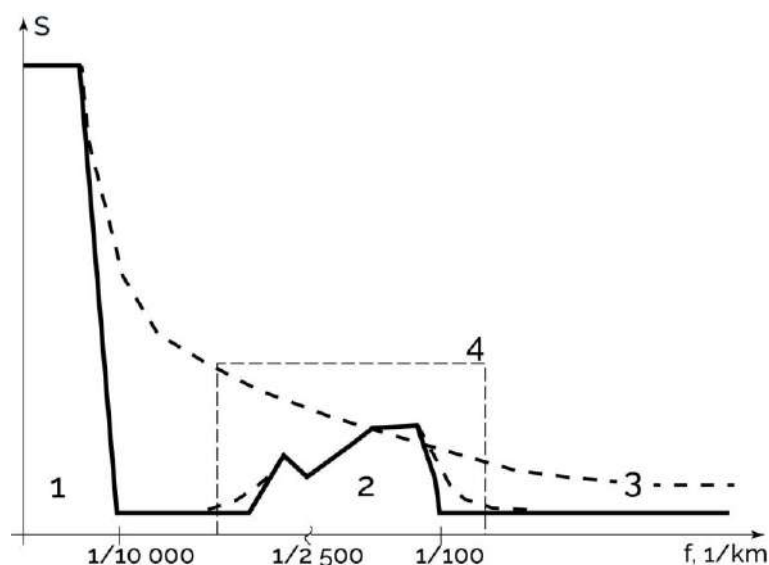


Рисунок 2.3 – Стосовно питання про фільтрацію ГХ в спектральній області. 1 – низькочастотна складова (тренд), 2 – ГХ, 3 – шуми, 4 – ідеальний смуговий фільтр, пунктирні лінії – розтікання спектру при цифровій обробці сигналу.

2.2.2 Ризик реєстрації фіктивних частот

В результаті дискретизації аналогового сигналу його спектр акумулюється в смузі частот $(0, f_s/2)$, де f_s – частота дискретизації, а компоненти сигналу з частотами $f > f_s/2$ породжують фіктивні гармоніки (Сергієнко 2002; Лайонс 2006; Марпл-мл. 1990). На супутниках АЕ-С, АЕ-D та АЕ-Е зйом даних здійснювався з періодом 15 с, на супутнику DE 2 з мінімальним періодом 1 с. Відповідні просторові частоти дискретизації складають $f_s = 1/(15 \cdot 7,8 \text{ км}) = 1/(120 \text{ км})$ і $f_s = 1/(7,8 \text{ км})$, а мінімально розрізні довжини хвиль $2/f_s = 240 \text{ км}$ і $2/f_s = 15 \text{ км}$. З теорії ГХ відомо, що під дією дисипативних ефектів (в'язкість і теплопровідність) довжини хвиль атмосферних збурень ростуть з висотою (Oliver et al. 1997; Лизунов и Леонтьев 2014). На рис. 2.4 з роботи (Лизунов и Леонтьев 2014) представлені відповідні залежності.

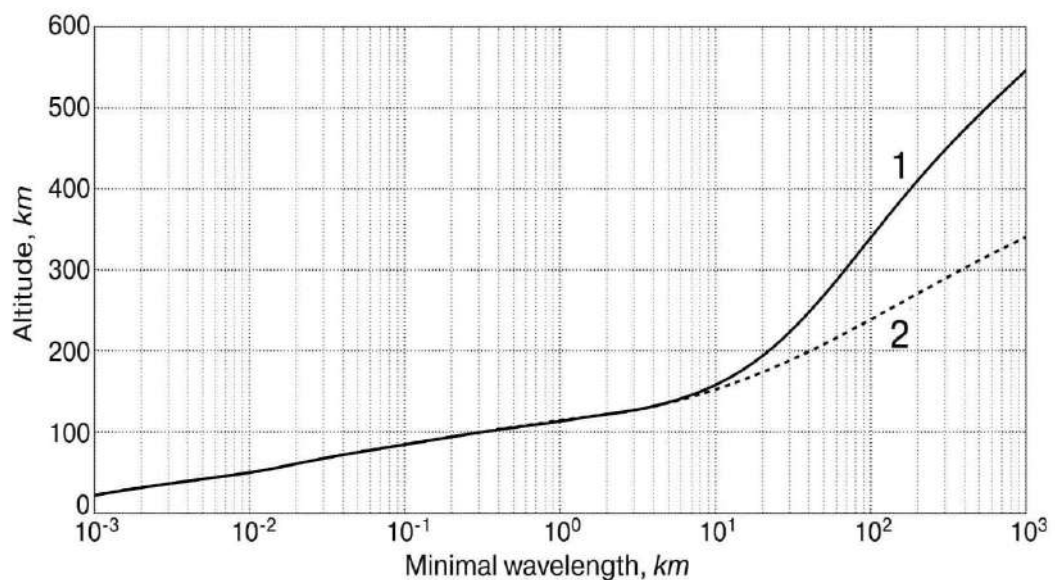


Рисунок 2.4 – Мінімальна довжина ГХ як функція висоти для умов (1) високої та (2) низької сонячної активності (Лизунов и Леонтьев 2014).

Супутникові спостереження здійснювалися на висотах 250–500 км в умовах як низької (АЕ-Е), так і високої сонячної активності (DE 2). Як видно з рис. 2.4, на таких висотах мінімальні довжини хвиль ГХ складають ~ 100 км в

умовах високої сонячної активності і ~ 400 км в умовах низької активності. Можна зробити висновок, що атмосфера грає роль «антиелайзингового фільтру», який виключає можливість появи фіктивних гармонік в даних АЕ-Е і ДЕ 2. При аналізі вимірювань на супутниках АЕ-В, АЕ-С, запущених в період середньої сонячної активності, зазначений ризик існує (Скороход і Лізунов 2016; Скороход и Лизунов 2017).

2.2.3 Явище розтікання спектру тренда

Введемо позначення:

$s(x)$ – хід вимірюваного атмосферного параметра в просторовій області (сигнал),

$\bar{s}(x)$ – його середня складова (тренд),

$S(f)$ – результат дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) функції $s(x)$,

$x(n) = n / f_s$ – дискретна координата,

f_s – просторова частота дискретизації,

$f(m) = mf_s / N$ – дискретна частота,

L – довжина області вимірювань вздовж орбітального витка супутника (інтервал накопичення даних),

$N = f_s L$ – кількість відліків на інтервалі вимірювань,

$n, m = \overline{0, N-1}$.

Тривалість сеансів вимірювань атмосферних параметрів зазвичай не перевищувала $L = 10000\text{--}15000$ км (без прогалин та розривів). Скінченність інтервалу вимірювання спричиняє «розтікання» монохроматичних компонент сигналу (рис. 2.5) згідно функції sinc (Лайонс 2006):

$$\delta(f - f_0) \rightarrow L \operatorname{sinc}(\pi(f - f_0)L), \quad (2.5)$$

де f_0 – частота монохроматичної компоненти аналогового сигналу, L – довжина області вимірювань вздовж орбітального витка, $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x) / x$.

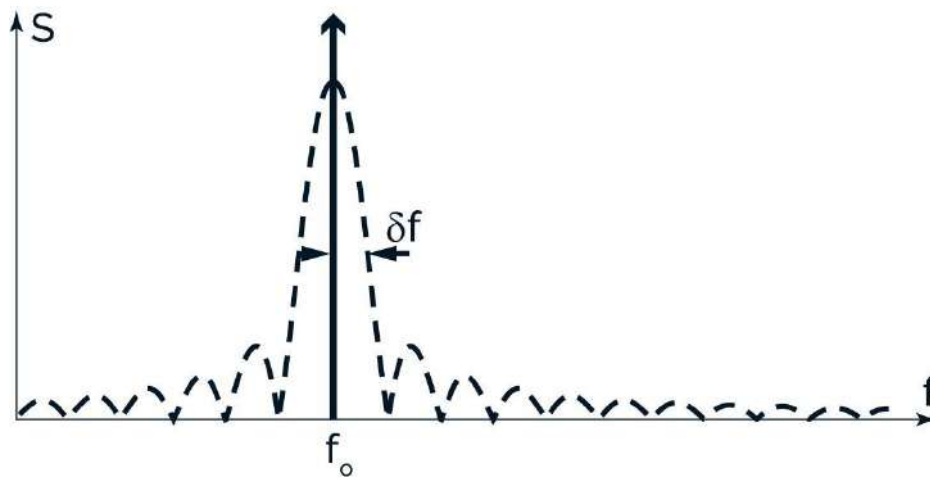


Рисунок 2.5 – Розтікання спектру монохроматичного аналогового сигналу при цифровій обробці даних.

Явище розтікання призводить до ефективного розширення спектральних ліній вимірюваного сигналу в межах головного максимуму функції sinc:

$$\delta f = 1/L \text{ або } \delta f / f = 1/m. \quad (2.6)$$

Тим самим виникає додаткова до ефекту Доплера похибка вимірювання просторової частоти ГХ (менше 5% в діапазоні спектральних чисел $m > 20$). Крім того, частина спектральної енергії розтікається вздовж бічних максимумів функції sinc, як це схематично і без дотримання пропорцій показано на [рис. 2.3](#) пунктирними лініями.

Розтікання спектру реального сигналу ілюструє [рис. 2.2](#). На [рис. 2.2 b](#) показаний амплітудний спектр ДПФ вхідної послідовності даних, на [рис. 2.2 d](#) – спектр тренда, який для порівняння наведений на [рис. 2.2 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. В таких умовах селекція ГХ за допомогою смугової фільтрації даних не має сенсу. Єдиним виходом є попереднє виключення трендової складової з вихідних даних і лише потім застосування смугової фільтрації до залишкового сигналу.

2.2.4 Процедура виключення тренда

Задача цього етапу обробки даних полягає не в тому, щоб усунути тренд якимось єдино вірним або максимально точним способом, а тільки в тому, щоб зменшити середню складову сигналу, що «розтікається». Більше того, на наступному етапі сигнал пропускається через смуговий фільтр, налаштований на частоти ГХ, внаслідок чого залишки тренда видаляються незалежно від якості його апроксимації.

Нами випробовувались різні методи апроксимації тренда: теоретичне моделювання розподілу концентрації атмосфери вздовж орбіти супутника за допомогою барометричної формули, інтерполяція даних поліномами різних ступенів, згладжування ковзаючим середнім ([Скороход і Лізунов 2016](#)). Можна зробити висновок, що всі підходи по-своєму добрі і можуть бути використані за умови, що вони не спотворюють сигнал в діапазоні частот ГХ. Так, наприклад, інтерполяція поліномом може вносити в цей діапазон непередбачувані збурення. Зрештою була обрана апроксимація тренда простим ковзаючим середнім, як універсальна та повністю контрольована процедура. Єдиним керуючим параметром в цьому випадку виступає довжина вікна згладжування $L_{ave} = K_{ave} / f_s$ (де K_{ave} – кількість відліків, по яким відбувається осереднення). Практично вибиралось $L_{ave} \sim 5000$ км.

Зняття тренда ковзаючим середнім можна розглядати як обробку даних цифровим фільтром з частотною характеристикою ([Скороход и Лизунов 2017](#)):

$$H(f) = 1 - \frac{\sin(\pi f L_{ave})}{\pi f L_{ave}}, \quad (2.7)$$

графік якої показано на [рис. 2.6](#). В робочій області частот $f > 2 / L_{ave}$ фільтр (2.7) близький до ідеального (область 3 на [рис. 2.6 b](#)). В перехідній смузі (область затримання 1 і область пульсацій 2) фільтр складним чином модифікує спектр даних. Ця область підлягає додатковому обнуленню, тим

більше, що після вилучення тренда інформація про нижні частоти сигналу все одно втрачається.

Селекція хвильових форм ГХ з використанням ковзаючого середнього широко використовувалася раніше (Hedin and Mayr 1987; Фаткуллин и др. 1990; Innis and Conde 2002; Федоренко 2009 тощо). При цьому параметри осереднення не завжди підбиралися належним чином. В ряді випадків автори задавали $L_{ave} \sim 500...600$ км, в той час як довжини хвиль корисного сигналу становили понад 600 км, тобто лежали в смузі зрізу фільтра (рис. 2.6 с). Отримані таким чином хвильові форми, очевидно, не можна вважати обґрунтованими.

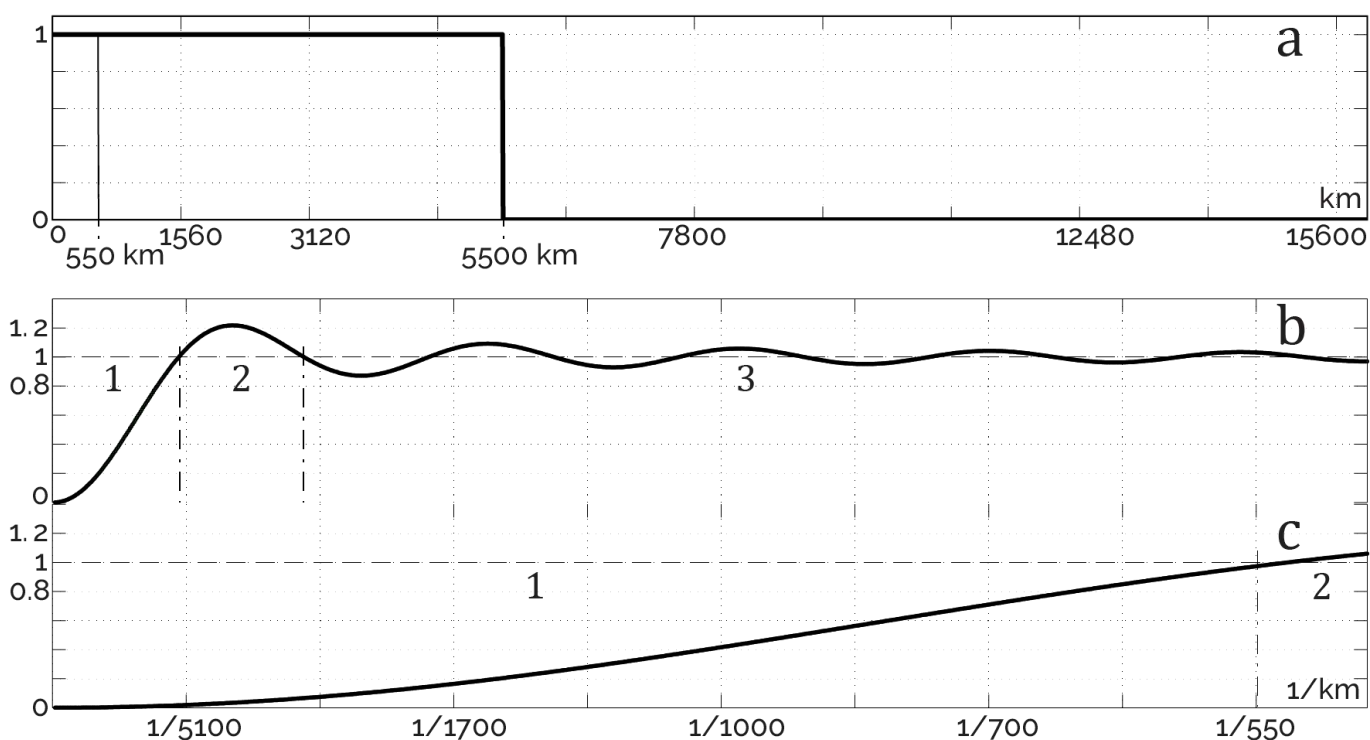


Рисунок 2.6 – Фільтр верхніх частот на основі простого ковзаючого середнього. (а) Вікно усереднення в просторовій області. Тонка лінія – довжина вікна 550 км, жирна лінія – 5500 км. (б) Частотна характеристика фільтра з вікном 5500 км. (с) Частотна характеристика фільтра з вікном 550 км. Область 1 – смуга затримання, область 2 – смуга пульсацій, область 3 – смуга пропускання.

Наведемо приклад невдалого фільтра ГХ, тим не менш, популярного на практиці (Фаткуллин и др. 1984). Зняття тренда проводиться за описаною вище процедурою методом ковзаючого середнього з масштабом усереднення $L_{ave1} \sim 700$ км. Потім, для усунення високочастотних шумів, проводиться ще

одне усереднення з масштабом $L_{ave2} \sim 70$ км. Частотна характеристика сконструйованого таким чином смугового фільтра має вигляд:

$$H(f) = \left(1 - \frac{\sin(\pi f L_{ave1})}{\pi f L_{ave1}} \right) \cdot \frac{\sin(\pi f L_{ave2})}{\pi f L_{ave2}}. \quad (2.8)$$

Графік характеристики представлений на [рис. 2.7](#). Можна бачити, що фільтр призводить до затримки сигналу в області довжин хвиль понад 1000 км, і до суттєвого спотворення спектра в області 150–1000 км.

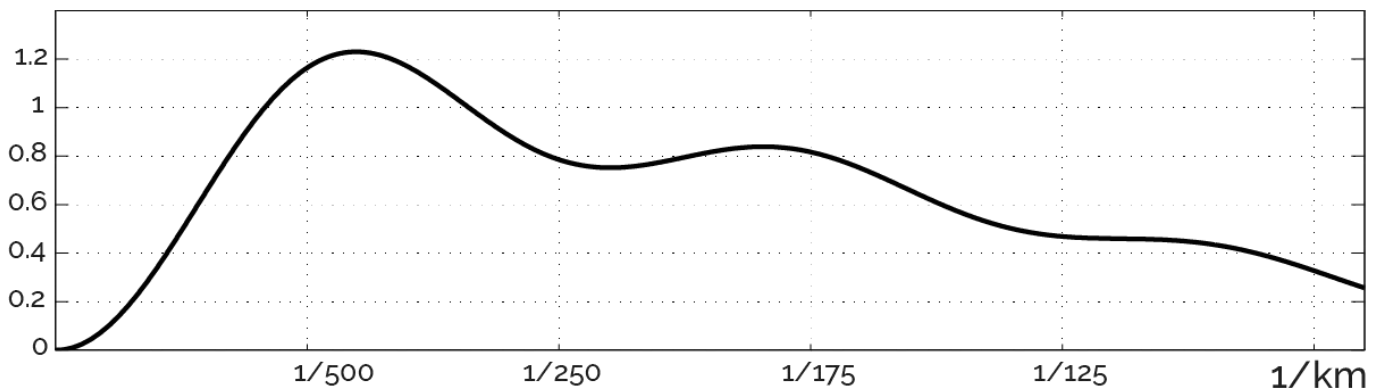


Рисунок 2.7 – Частотна характеристика смугового фільтра, сконструйованого на основі двох ковзаючих середніх.

2.2.5 Математична реалізація ковзаючого середнього

Усереднення вхідних даних проводиться за алгоритмом:

$$\bar{s}(n) = \frac{1}{2K+1} \sum_{i=-K/2}^{K/2} s(n+i), \quad (2.9)$$

де непарне число $K_{ave} = 2K + 1$ є кількість відліків, за якими обчислюється середнє арифметичне. Важливу роль відіграє вибір способу сумування відліків на краях ряду даних $n < K$ і $n > N - K$. Одна з можливостей полягає у формуванні відсутніх відліків шляхом їх періодичного продовження $s(n+N) = s(n)$. В цьому випадку справедлива теорема про кругову згортку, згідно з якою спектр ДПФ виразу (2.9) рівний:

$$\bar{S}(m) = G(m) \cdot S(m), \quad (2.10)$$

де $\bar{S}(m)$ – спектр середньої складової, $G(m)$ – частотна характеристика фільтра ковзаючого середнього (Лайонс 2006):

$$G(m) = \frac{1}{K_{ave}} \frac{\sin(\pi m K_{ave} / N)}{\sin(\pi m / N)}. \quad (2.11)$$

В робочому діапазоні частот $\left(\frac{1}{2500}, \frac{1}{100}\right)$ км⁻¹: $m \ll N$ і функція (2.11)

переходить в sinc:

$$G(m) \approx \frac{\sin(\pi m K_{ave} / N)}{\pi m K_{ave} / N} = \text{sinc}(\pi m K_{ave} / N). \quad (2.12)$$

Спектр ДПФ різницевого сигналу $\tilde{S}(n) = s(n) - \bar{s}(n)$ рівний:

$$\tilde{S}(m) = S(m) - \bar{S}(m) = (1 - G(m))S(m) = H(m)S(m), \quad (2.13)$$

де

$$H(m) = 1 - \text{sinc}(\pi m K_{ave} / N). \quad (2.14)$$

Переходячи від спектральних відліків до фізичних параметрів – частоти $f = m f_s / N$ та довжини інтервалу усереднення $L_{ave} = K_{ave} / f_s$, приводимо $H(m)$ до вигляду (2.5).

В даній роботі реалізований інший спосіб обчислення суми (2.9), що полягає у підгонці параметрів усереднення на краях ряду даних: $\bar{s}(1) = s(1)$, $\bar{s}(2) = (s(1) + s(2) + s(3)) / 3$, $s(3) = (s(1) + s(2) + s(3) + s(4) + s(5)) / 5$ і т.д. аж до $n = K$, та аналогічно при $n > N - K$. Ця процедура еквівалентна зважуванню вхідних даних вікном, яке плавно обнуляє сигнал на краях інтервалу вимірювання, що зменшує розтікання спектру сигналу. В цьому випадку, частотну характеристику фільтра (2.14) слід розглядати як наближену.

2.2.6 Селекція хвильових форм ГХ

Дослідимо різницевий сигнал, отриманий шляхом виключення тренда з вихідних даних:

$$\tilde{S}(x) = s(x) - \bar{s}(x). \quad (2.15)$$

На [рис. 2.2 е, f](#) представлені графіки хвильової форми $\tilde{z}(x)$ та її амплітудного спектра ([Ferencz et al. 2014](#); [Лизунов и Скороход 2016](#); [Скороход и Лизунов 2017](#)). В області нижніх частот спектр зашумлений залишками тренда (область 1 на [рис. 2.2 е](#)). Корисний сигнал виділяється в області 2. Поріг виявлення корисного сигналу обмежується рівнем шумів (область 3). Фільтрація ГХ проводиться шляхом обнулення відліків поза області 2 (ідеальна фільтрація) і обчисленням зворотного ДПФ, як показано на [рис. 2.8](#). Відновлена таким чином хвильова форма представлена на [рис. 2.8 а](#). Відзначимо, що в частотній області хвильовий процес візуально розділяється на декілька хвильових пакетів: великомасштабних ГХ в діапазоні довжин хвиль $\lambda_x = 800$ – 2000 км, середньомасштабних ГХ $\lambda_x = 400$ – 1000 км і $\lambda_x = 200$ – 400 км ([рис. 2.8 б](#)). Просторові форми хвильових пакетів відновлені на [рис. 2.8 с](#).

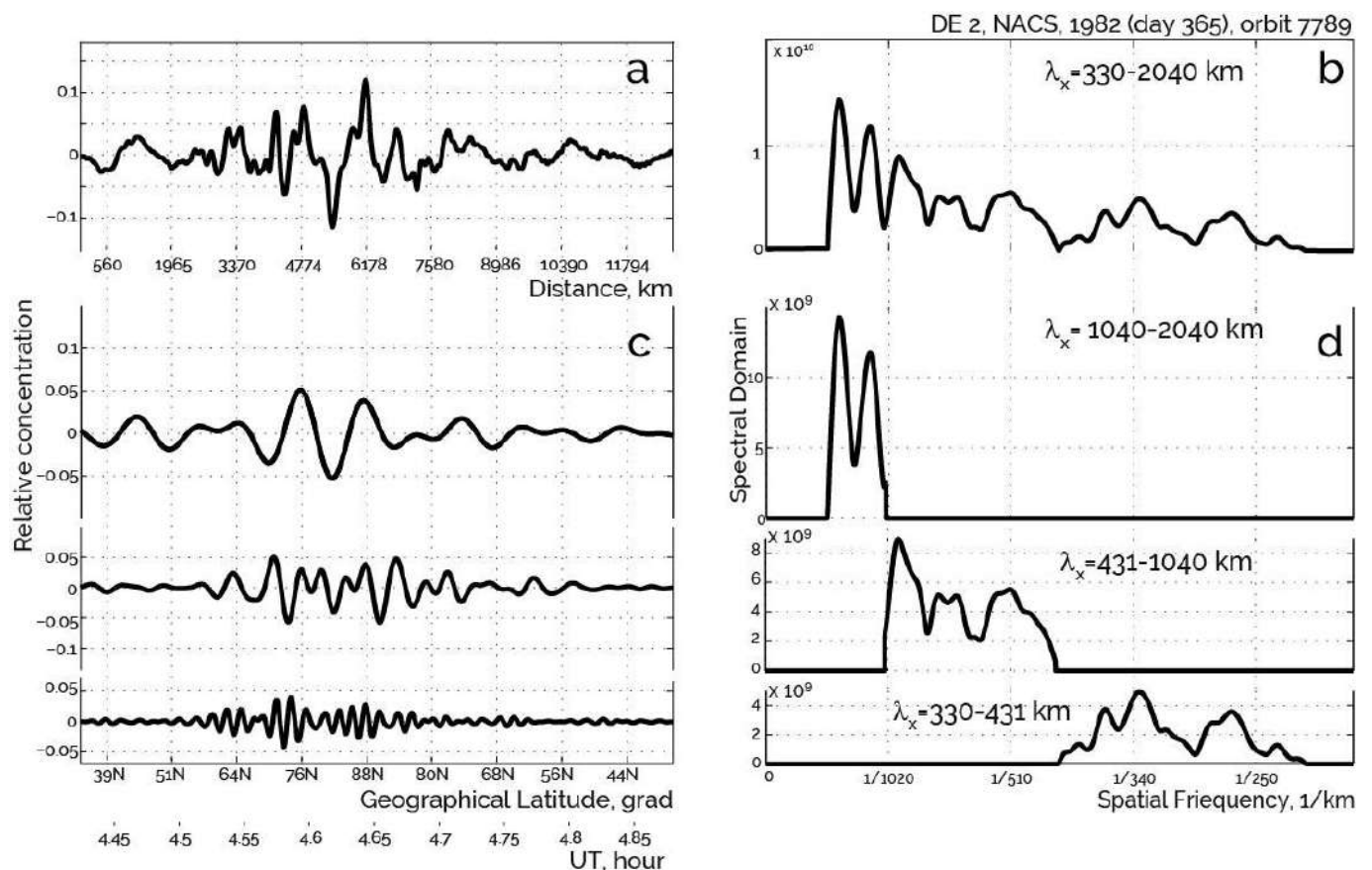


Рисунок 2.8 – Фільтрація хвильового збурення в діапазоні частот ГХ. (а) Хвильова форма ГХ, (б) Амплітудний спектр ГХ. (с) Хвильові пакети, складові ГХ. (д) Відповідні амплітудні спектри.

Приклад обробки даних, наведений на [рис. 2.8](#), є типовим, що дозволяє зробити певні висновки щодо властивостей ГХ. А саме, термосферні ГХ є широкосмуговими – в діапазоні горизонтальних довжин хвиль від приблизно 200 км до, принаймні, 2500 км (скінченність інтервалу вимірювань не дозволяє коректно виділити довші хвилі). Хвильові форми збурень візуально розпадаються на хвильові пакети різних масштабів. Півширини спектрів пакетів $(f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min})$ досягають десятків процентів.

Підсумовуючи, алгоритм фільтрації ГХ наступний:

1. Грубе видалення тренда з вихідного ряду даних з метою зменшення компоненти, що розтікається;
2. ДПФ різницевого сигналу. Ідеальна смугова фільтрація в спектральній області ГХ $(f_{\min}, f_{\max})$. Візуальна локалізація хвильових пакетів ГХ. (Процедура розбиття спектра на хвильові пакети, маючи тісний зв'язок з розрахунком часової частоти ГХ, буде додатково уточнена в [підрозділі 3.2](#));
3. Відновлення просторових форм ГХ шляхом обчислення зворотного ДПФ у виділених частотних діапазонах.

Таким чином, ключем до селекції хвильових форм ГХ є своєрідна подвійна фільтрація даних вимірювань. На першому кроці проводиться грубе виключення тренда (в даній роботі – методом простого ковзного середнього, але це не єдиний спосіб усунення тренда; тут важливо тільки, щоб процедура «детрендування» не вносила спотворень в частотний діапазон ГХ). На другому кроці залишковий ряд даних пропускається через смуговий фільтр, налаштований на частоти ГХ. Концептуально вказаний підхід був раніше реалізований в роботі ([Gross et al. 1984](#)).

Одержана форма хвильового збурення $\tilde{s} = \tilde{s}(x)$ є завершеним продуктом обробки даних. При необхідності дослідник може продовжити її обробку (наприклад, піддати розподіл $\tilde{s} = \tilde{s}(x)$ вейвлет-аналізу з метою пошуку сигнатур нелінійних ефектів і т.п.). У даній роботі, подальший аналіз вівся з метою встановлення повного спектрального складу хвиль $\{\omega, k_x, k_y, k_z\}$.

2.2.7 Верифікація методики селекції ГХ

Для верифікації методики було, по-перше, проведено порівняння з даними вейвлет-аналізу. Виходячи з розуміння, що природне хвильове поле ГХ являє собою суперпозицію хвильових пакетів, було обране вейвлет-перетворення з ядром Морле. На [рис. 2.9](#) представлено поєднане зображення скалограми вхідної послідовності даних (тобто до вилучення тренда) і хвильових форм ГХ з [рис. 2.8](#). За вертикальною віссю скалограми хвильові форми прив'язані до масштабів, рівних несучім довжинам хвиль ГХ. Відзначимо збіг багатьох структурних деталей скалограми і хвильових форм, який підтверджує, що останні дійсно присутні у даних вимірювань ([Скороход и Лизунов 2017](#)).

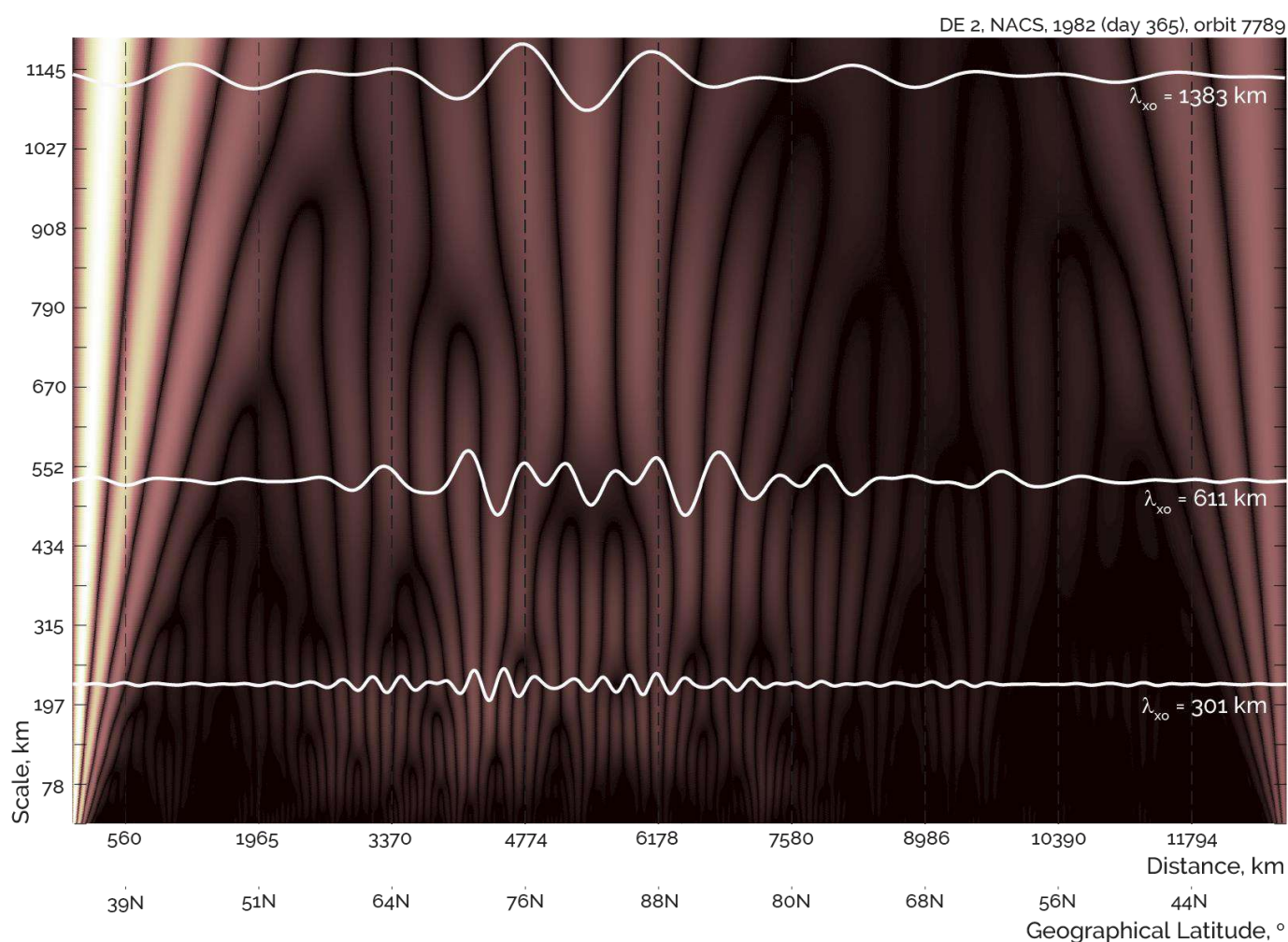


Рисунок 2.9 – Скалограма вейвлета Морле вхідного ряду даних і хвильові форми ГХ ([Скороход і Лізунов 2016](#); [Скороход и Лизунов 2017](#)).

Крім того, розвинута методика тестувалася на модельних наборах даних (селекція монохроматичного сигналу на тлі гаусового тренда і т.п.) (Ferencz et al. 2014; Скороход і Лізунов 2016; Скороход и Лизунов 2017). Один з прикладів наведено на [рис. 2.9](#). Розглянемо аналоговий сигнал:

$$\begin{aligned}
 s(x) = & 18 \cdot 10^8 \exp(10^{-6} \cdot (-(x-1000)^2)) + \\
 & + 8 \cdot 10^6 \exp(10^{-5} \cdot (-(x-1000)^2)) \cdot \\
 & \cdot \left\{ \sin\left(\frac{93\pi x}{2024}\right) + 0.5 \cdot \sin\left(\frac{97\pi x}{2024}\right) + 0.5 \cdot \sin\left(\frac{109\pi x}{2024}\right) + \right. \\
 & + 1.5 \cdot \sin\left(\frac{47\pi x}{2024}\right) + 3 \cdot \sin\left(\frac{51\pi x}{2024}\right) + 2.1 \cdot \sin\left(\frac{63\pi x}{2024}\right) + 0.9 \cdot \sin\left(\frac{70\pi x}{2024}\right) + 1.2 \cdot \sin\left(\frac{77\pi x}{2024}\right) + \\
 & \left. + 7 \cdot \sin\left(\frac{20\pi x}{2024}\right) + 3.5 \cdot \sin\left(\frac{31\pi x}{2024}\right) \right\},
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

де перша складова в правій частині імітує тренд, інші – хвильовий процес, який являє собою суперпозицію трьох хвильових пакетів, кожен з яких, в свою чергу, містить в собі декілька монохроматичних компонент. Зауважимо, що амплітуда хвильового збурення відносно тренду складає $\sim 1\%$. Форма модельного сигналу (2.16) та його компонент представлена на [рис. 2.10 а](#). Цифрова обробка проводиться на інтервалі накопичення даних $L = 15600$, що імітує умови натурального експерименту. В результаті дискретизації сигналу на інтервалі L відбувається розтікання спектра – як тренда, так і хвильового збурення, причому бокові максимуми спектра тренда цілком поглинають корисний сигнал ([рис. 2.10 b](#)). На [рис. 2.10 d](#) показана спроба смугової фільтрації даних без вилучення тренду. Як і слід очікувати, форма хвильового процесу повністю спотворюється. На [рис. 2.10 e, f, g, h](#) представлені результати обробки за методикою даної роботи. Як видно з [рис. 2.11](#), похибка, яку вносить обробка даних, має максимальне значення 0,25 %.

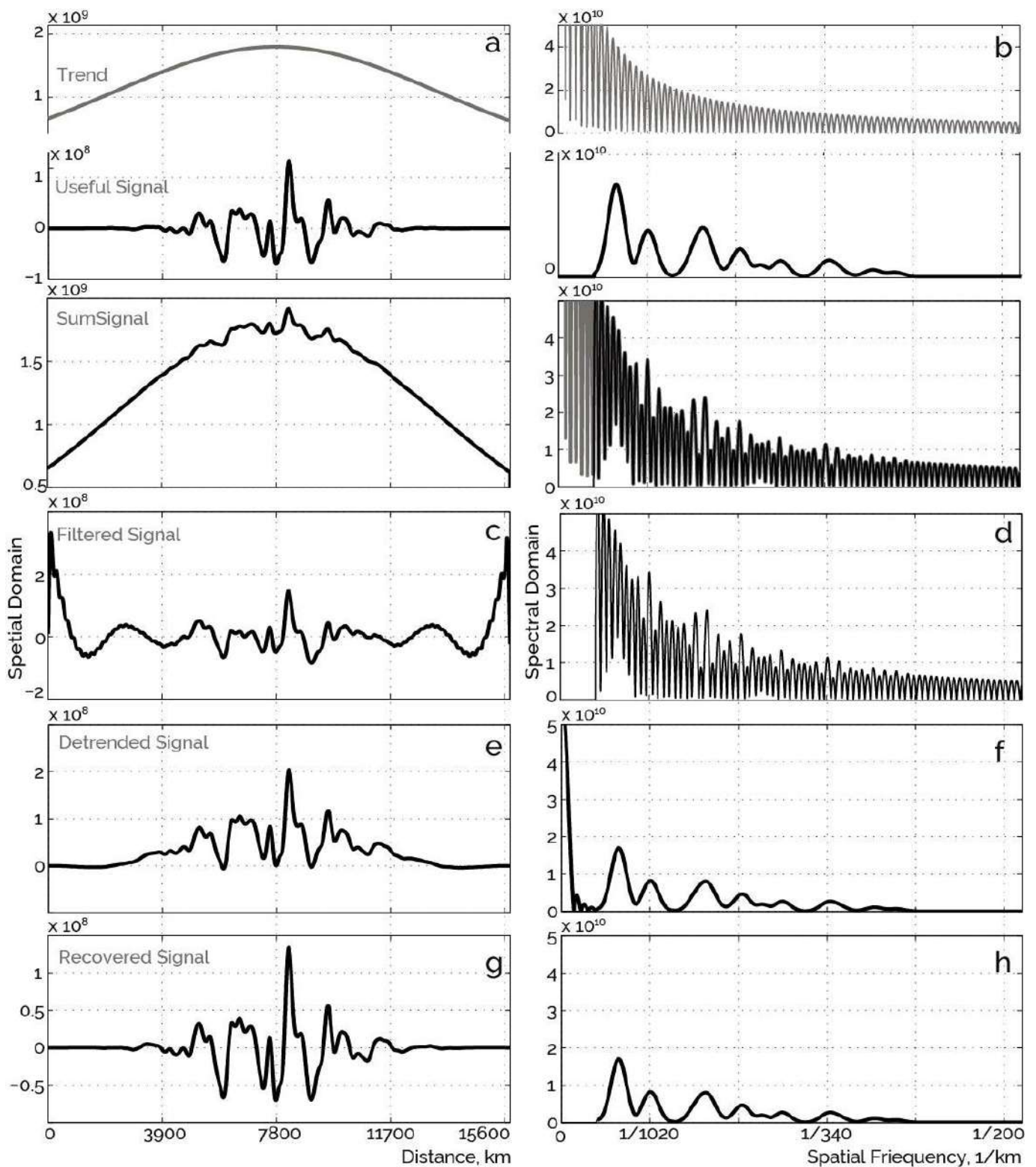


Рисунок 2.10 – Обробка змодельованого сигналу. (а) Вхідний сигнал та його складові – тренд та хвильове збурення. (b) Амплітудні спектри. (с, d) Результат смугової фільтрації вхідного сигналу без вилучення тренду. (e, f) Детрендований сигнал. (g, h) Смугова фільтрація детренованого сигналу.

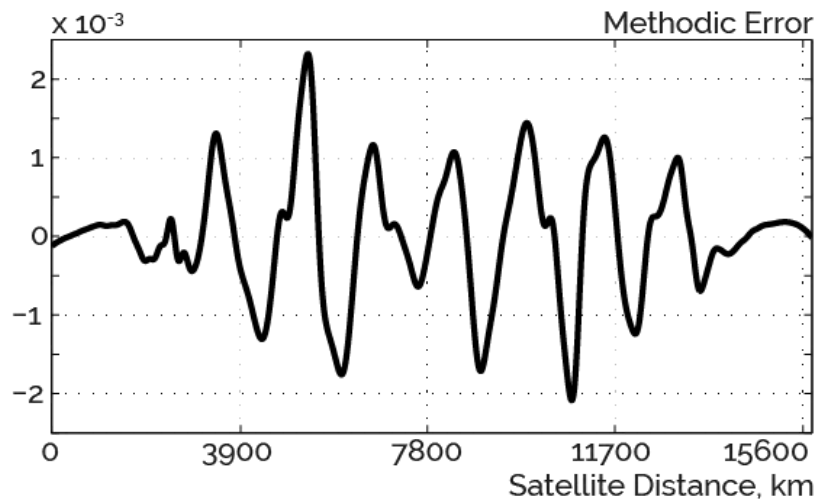


Рисунок 2.11 – Різниця між модельним хвильовим процесом і отриманим в результаті обробки за методикою даної роботи.

2.2.8 Оцінка інструментальної похибки

Вимірювання параметрів атмосфери на супутниках АЕ-С, АЕ-Д, АЕ-Е та DE 2 здійснювалося з використанням приладових комплексів WATS (швидкість і температура повітряного середовища) і NACS (концентрації газових компонент). Прилади мали значну систематичну похибку, яка сягала десятків відсотків величини атмосферних параметрів, і малу випадкову похибку, яка за оцінками розробників приладів складає $\sim 1\%$ (Newton et al. 1969; Carigan et. all. 1981). З метою визначення реальної похибки вимірювань проаналізуємо дані вказаних приладів.

На рис. 2.12 показано шумову доріжку, виділену в результаті фільтрації даних NACS в діапазоні верхніх частот від $1/(100 \text{ км})$ до частоти Найквіста $f_s/2$ (область 3 на рис. 2.2 f і на рис. 2.3). Рівень шуму складає $2\sigma \sim 0.5\%$ (по відношенню до вимірюваного параметру), що навіть краще очікувань самих виробників приладу. При характерних амплітудах хвильових процесів $\sim 5\%$, відношення сигнал/шум ~ 10 . Того ж порядку похибки були отримані при аналізі даних приладу WATS (Лизунов и Скороход 2016; Скороход и Лизунов 2017).

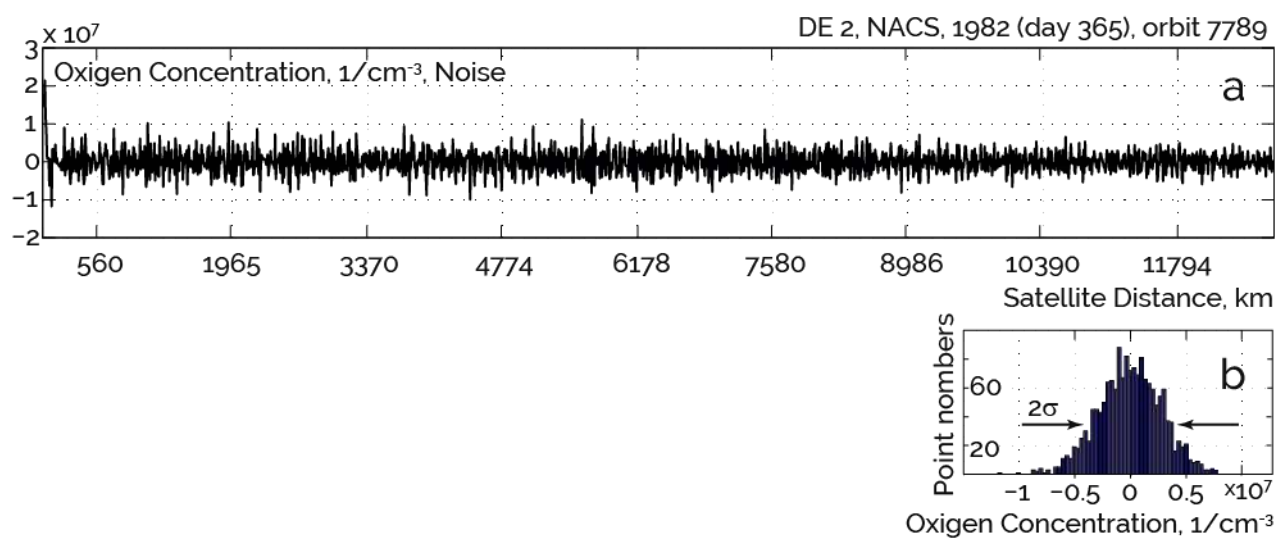


Рисунок 2.12 – До визначення дисперсії випадкової похибки приладу NACS. (a) Шумова доріжка на виході приладу. (b) Гістограма відхилення точок відліків від середнього значення. Вказаний рівень шуму 2σ .

2.3 Каталогізація ГХ

2.3.1 Концепція «хвильових каталогів»

Хвильове збурення, будучи раз зареєстроване та занесене до бази даних, стає статистичною одиницею, яка надалі може бути використана в науковому дослідженні, як авторами вихідних спостережень, так і іншими дослідниками. Звідси походить ідея створення каталогів атмосферно-іоносферних хвиль, яка розвинулась в масштабний науково-дослідний проект 7-ї рамкової програми POPDAT (від Problem Oriented Processing and Database Creation for Ionosphere Exploration, 2011–2013 pp.). Інформацію про POPDAT можна знайти на сайті www.popdat.org. Автор даного дисертаційного дослідження була членом команди проекту від Інституту космічних досліджень і відповідала за створення каталогу ГХ (разом з А.А. Кузьмичем) (Ferencz et al. 2014).

До цього часу спостереження хвильових процесів атмосфері-іоносфері не оформлялися дослідниками як інформаційний продукт. Опубліковані в літературі приклади хвиль носять, швидше, ілюстративний характер, не маючи на меті задокументувати реальну картину хвильової активності геокосмосу. Такі ілюстрації не створюють уявлення про планетарний розподіл хвиль, їх середньостатистичні параметри, мінливість залежно від геліо- і геофізичних умов тощо. Описана ситуація склалася, в першу чергу, в силу труднощі вилучення корисної інформації з даних супутникових вимірювань.

Наукова інформація, передана з космічного апарату, перш ніж стати предметом наукового дослідження, проходить кілька циклів обробки. Спочатку проводиться дешифрування вимірювань, виділення і прив'язка до часу показань окремих приладів, усунення збоїв, ряд інших необхідних, але непомітних кінцевому користувачеві (вченому), операцій. Цей етап обробки здійснюється в основному на інженерному рівні з використанням уніфікованих програмних і апаратних засобів.

На другому етапі виділені сигнали перетворюються в фізичні величини. Для цього використовуються спеціальні алгоритми тарування, що розробляються, як правило, виробниками приладів. На даному етапі формуються каталоги (або архіви) результатів експерименту.

Але отриманий таким чином матеріал (на створення якого витрачено значні людські та матеріальні ресурси) набуває цінність лише настільки, наскільки він використовується для подальших наукових досліджень. Задачею подальшої обробки, здійснюваній вже предметними фахівцями, є виявлення в експериментальних даних сигнатур певних фізичних явищ.

Сучасний рівень інформаційних технологій відкриває можливість проблемно-орієнтованої обробки даних «другого рівня» силами експертів, які не були учасниками конкретних космічних місій. В результаті, старі і, здавалося б, відпрацьовані ресурси інформації, акумульовані в архівах супутникових проектів, перетворюються в джерела наукових даних більш високого «третього рівня обробки». Останні, шляхом створення тематичних веб-ресурсів, адресуються широкому колу користувачів, які можуть їх використовувати в своїх дослідженнях або освітніх цілях, в тому числі для розв'язання задач, які не ставилися авторами космічних експериментів.

2.3.2 Структура каталогу ГХ

Ідею каталогу ГХ пояснює [рис. 2.13](#) ([Скороход и Лизунов 2012](#); [Ferencz et al. 2014](#); [Скороход и Лизунов 2014](#); [Скороход і Лізунов 2016](#)). Верхня крива на рисунку візуалізує розподіл концентрації атмосфери n , як вона була зареєстрована в супутниковому експерименті. В результаті обробки даних за описаними вище методиками до каталогу ГХ вносяться два записи: згладжений хід концентрації (тренд) $\bar{n}$ і хвильова форма ГХ $a = \delta n / \bar{n}$. При цьому абсолютна варіація концентрації рівна $a \cdot \bar{n}$.

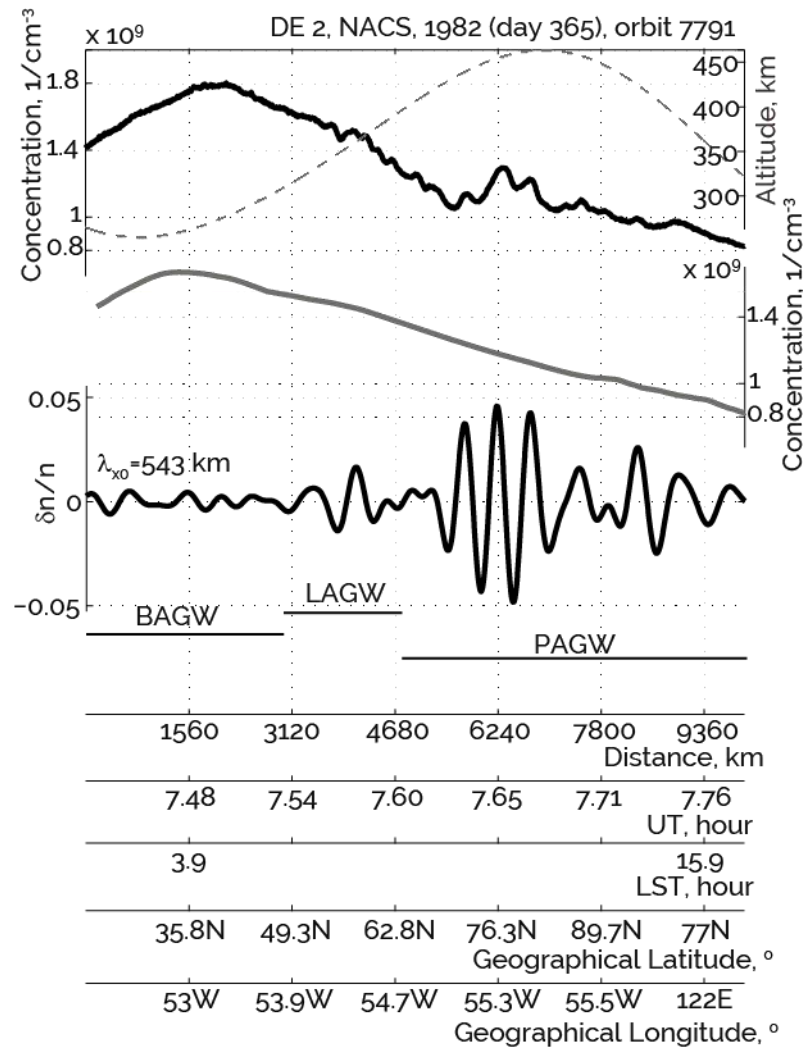


Рисунок 2.13 – До процедури каталогізації ГХ. Згори вниз: розподіл концентрації атмосфери n , зареєстрованої на орбітальному витку 7280 супутника DE 2, згладжений розподіл концентрації $\bar{n}$ та хвильова форма ГХ $a = \delta n / \bar{n}$, виділені в результаті обробки даних. Вказані мітки типів хвильових структур ГХ (Ferencz et al. 2014)

В проекті POPDAT елементарною одиницею каталогу є NetCDF-файл хвильових даних, що відноситься до одного орбітального витка супутника. Окрім власне хвильових даних до NetCDF-файлу заносяться і додаткові параметри:

1. Набір загальних параметрів, що ідентифікують тип хвильового процесу (в даному випадку – ГХ), джерело даних вимірювань (наприклад – архів місії DE 2, експеримент NACS), номер робочого орбітального витка тощо;

2. Параметри просторово-часового вікна та умов проведення вимірювань (вектора значень UT, LT, географічних та магнітних координат, висоти супутника тощо);

3. Загальні характеристики ГХ: максимальна та мінімальна амплітуда, стандартна девіація, області локалізації на орбітальному витку певних типів збурень (наприклад, PAGW – полярні ГХ, BAGW – хвильовий фон низьких та середніх широт, LAGW – локалізовані хвильові пакети ГХ) тощо.

Вказані додаткові параметри грають роль метаданих, необхідних для швидкої вибірки хвильових форм з бази даних.

2.3.3 Іоносферний хвильовий сервіс

В результаті реалізації проекту POPDAT створено Іоносферних хвильовий сервіс (<http://popdat.cbk.waw.pl>) – база даних хвильових каталогів з веб-інтерфейсом. Іоносферний хвильовий сервіс призначений як для учасників обробки даних – для автоматизації процедур поповнення та редагування записів, так і для потенційних користувачів – для отримання необхідної інформації (Ferencz et al. 2014).

Сервіс включає закриту (авторську) і відкриту (публічну) частини. Перша призначена для управління базою даних і службами проекту і адмініструється в Інституті космічних досліджень. Публічна частина сервісу призначена для зовнішніх користувачів і за їхніми запитами здійснює пошук і виведення даних в необхідному форматі. Наприклад, необхідно:

- виявити в заданому інтервалі часу і координат процес, що класифікується як ГХ,
- більш складний приклад користувацького запиту: визначити середню амплітуду ГХ над Харковом за певний період часу,
- тощо.

На рис.2.14 зображено інтерактивне вікно Іоносферного хвильового сервісу.

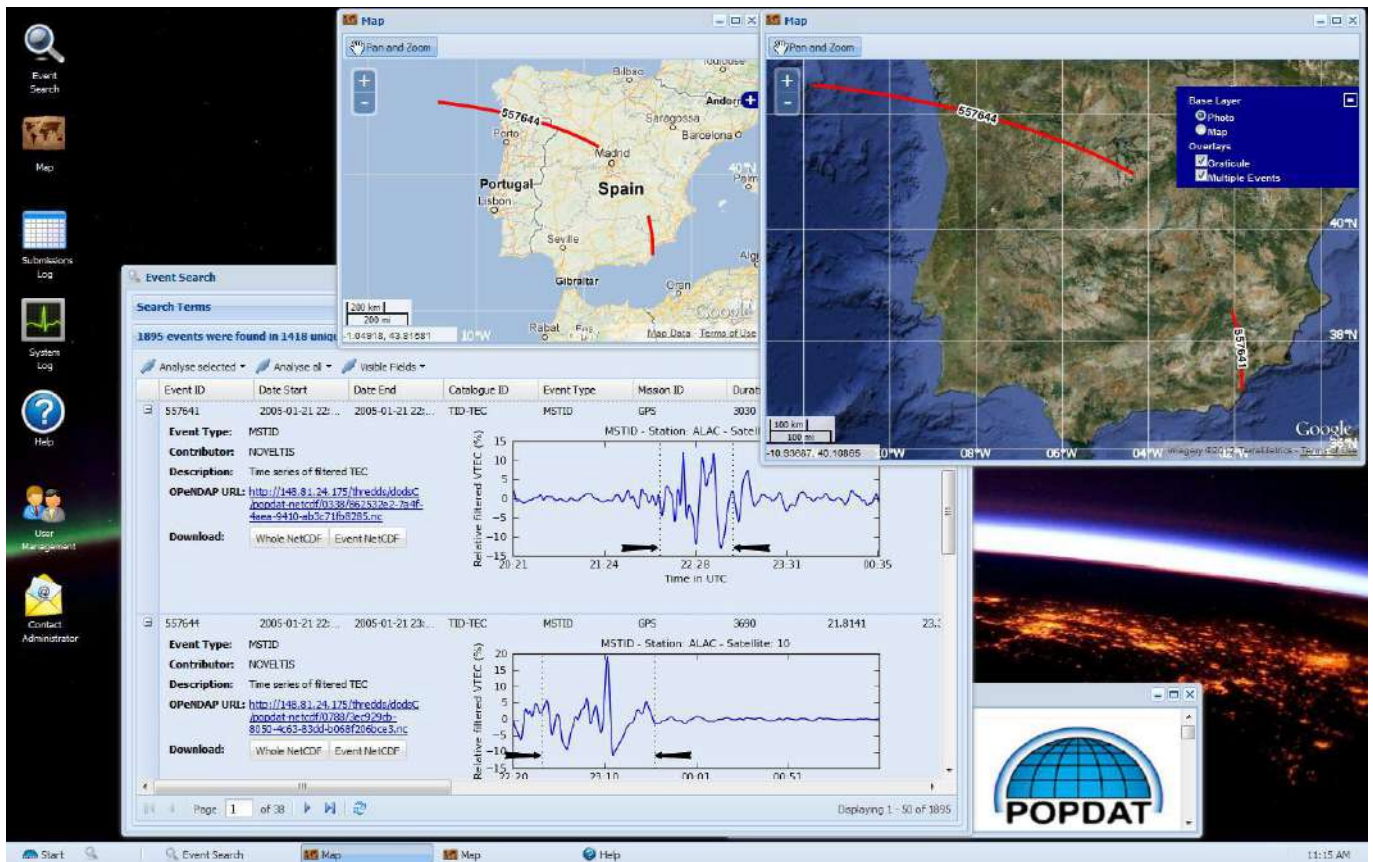


Рисунок 2.14 – Веб-сторінка іоносферного хвильового сервісу, розробленого в проекті 7-ї рамкової програми POPDAT. В інтерактивному вікні виведені квітку хвильових форм ГХ.

2.4 Висновки до розділу 2

У розділі 2 розроблений метод селекції хвильового збурення вздовж орбіти супутника. Відтворена за цим методом форма збурення $\tilde{s} = \tilde{s}(x)$ є завершеним продуктом обробки даних. При необхідності дослідник може продовжити її обробку (наприклад, піддати розподіл $\tilde{s}(x)$ вейвлет-аналізу з метою пошуку сигнатур нелінійних ефектів і т.п.). Але для багатьох дослідницьких задач інформації, отриманої на етапі встановлення хвильової форми ГХ, достатньо (геопросторова прив'язка хвильових процесів, визначення їх енергетичних характеристик, дослідження зв'язку з приземними і космічними джерелами енерговиділення тощо).

Наріжним методичним принципом проведеного дослідження є покроковий контроль змін, які обробка даних вносить в їх частотне представлення. Завдяки цьому вдалося з'ясувати природу складності відділення хвильового збурення від трендової складової: проблема полягає не в наявності тренда як такого, а в розтіканні спектра тренда – артефакті цифрової обробки сигналів, що призводить до перекриття спектра тренда і спектра ГХ. Можна сподіватися, що впровадження методів обробки, запропонованих в дисертації, дозволить ввести в науковий обіг великий масив даних старих супутників (в тому числі даних вимірювань концентрацій газових компонент приладом NACS), до сих пір мало затребуваних через складності фільтрації корисного сигналу.

Виділимо наступні основні результати:

1. Селекція хвильових форм ГХ потребує подвійної фільтрації даних. На першому кроці здійснюється грубе видалення тренда з метою зменшення компоненти, що розтікається. Спосіб апроксимації тренду не має значення за умови, що процедура «детрендування» не вносить спотворень в частотний діапазон ГХ. На наступному кроці в області хвильових чисел k_x здійснюється смугова фільтрація ГХ на фоні залишків тренда і високочастотних шумів;

2. Атмосфера як фізичне середовище грає роль «антиелайзингового фільтру», який виключає можливість появи фіктивних гармонік в даних АЕ-Е і DE 2. При аналізі вимірювань на супутниках АЕ-В, АЕ-С зазначений ризик існує;

3. Хвильове поле ГХ в термосфері є надширокопasmовим – в діапазоні горизонтальних довжин хвиль від ~ 200 км до 2500 км і більше. Хвильові форми збурень візуально розпадаються на хвильові пакети різних масштабів. Півширини спектрів пакетів $(k_{\max} - k_{\min}) / (k_{\max} + k_{\min})$ сягають десятків процентів;

4. Створено нову інформаційну сутність – каталог ГХ. Записи хвильових збурень в каталозі є статистичними одиницями, до аналізу яких застосовні відповідні методи аналізу даних.

РОЗДІЛ 3.

АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ХВИЛЬОВИХ ЗБУРЕНЬ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ГХ

3.1 Вступ

Реєстрація хвильового процесу у варіаціях відразу декількох атмосферних параметрів відкриває можливість теоретичної оцінки повного набору 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 – розрахувати хвильові числа k_y, k_z . Відповідний підхід розроблений і детально описаний в роботі (Innis and Conde 2002). Аналітичним підґрунтям для обчислень служить робота Хайнса (Hines 1960).

Критичним положенням теорії Хайнса є трактування атмосфери як ідеальної рідини, без урахування дисипації, оскільки рівняння поширення ГХ в реальній (в'язкій та теплопровідній) атмосфері не допускають аналітичних рішень. З огляду на цю обставину і в прагненні до максимальної точності оцінок параметрів ГХ, ряд авторів звертаються до чисельного моделювання ГХ (Mayr et al. 1990; Innis and Conde 2002; Vadas and Nicolls 2012). На наш погляд, такий підхід не завжди доцільний, оскільки чисельні моделі атмосфери теж не є строгими, і можливості їх застосування мають власні не завжди прозорі обмеження. Більше того, числовий експеримент реалізується тільки для певного модельного розподілу атмосферних параметрів, який завжди відрізняється від умов натурного експерименту. Крім того, і це головне, дисипативні поправки в дисперсію ГХ малі і лежать за межами точності наявних методів вимірювань.

Роль ефектів в'язкості та теплопровідності залежить не тільки від абсолютних значень їх кінетичних коефіцієнтів, але і від масштабів хвильового збурення. Фактично, для кожного висотного рівня можна виділити спектральний діапазон «дуже сильно дисипуючих» коротких хвиль і діапазон «дуже слабо дисипуючих» довгих хвиль. З ростом висоти перший діапазон розширюється, другий скорочується, і, в кінці кінців, в області екзобазисного поширення хвиль нейтральної атмосфери стає неможливим (Госсард и Хук 1978 (§39); Лизунов и Леонтьев 2014). Хвилі першого типу швидко згасають, тому в експериментальних даних домінують хвилі, властивості яких лише слабо модифіковані за рахунок в'язкості і теплопровідності. Як показують модельні розрахунки (Vadas and Fritts 2005; Walterscheid and Hickey 2011; Лизунов и Леонтьев 2014), в умовах малої дисипації частоти ГХ зміщені щодо Хайнсівських дисперсійних кривих на величину:

$$\delta\omega_{diss} \sim D/(2H)^2 \ll \omega, \quad (3.1)$$

де D – коефіцієнт кінематичної в'язкості атмосфери, H – параметр висоти однорідної атмосфери. При аналізі супутникових даних член $\delta\omega_{diss}$ виступає малою поправкою, і на цій підставі далі не враховуватиметься.

Рівняння теорії Хайнса записані для нерухомої атмосфери. При наявності вітру ці рівняння справедливі в системі відліку, яка рухається з вітром. Таким чином, застосування теорії до аналізу супутникових даних встановлює спектр хвиль в системі відліку рухомої атмосфери. Щоб знайти параметри ГХ, спостережені відносно земної поверхні, швидкість ГХ, виміряну за супутниковими даними, необхідно скласти зі швидкістю вітру. Зокрема, при реєстрації наземними методами частота хвилі дорівнює $\omega_* = \omega + \vec{k} \cdot \vec{V}_w$, де ω – частота в системі відліку вітру (intrinsic frequency), V_w – швидкість вітру.

Розділ 3, окрім вступу та висновку, складається з 2-х основних підрозділів. **Підрозділ 3.2** присвячений теоретичному обґрунтуванню розрахунків спектрального складу ГХ. З метою автоматизації процедур аналізу даних створений програмний комплекс, описаний в **підрозділі 3.3**.

Матеріали розділу 3 ґрунтуються на публікаціях автора (Лизунов и др. 2008; Ferencz et al. 2014; Лизунов и Скороход 2016; Скороход і Лізунов 2016; Скороход и Лизунов 2017).

3.2 Метод спектрального оцінювання

3.2.1 Базові теоретичні співвідношення

Введемо позначення:

ω, k_x, k_y, k_z – спектральні параметри ГХ (кругова частота і три компоненти хвильового вектора). Вісь ОХ направлена вздовж руху супутника, вісь ОZ вертикально вгору, вісь ОУ лежить в горизонтальній площині перпендикулярно руху супутника, доповнюючи праву трійку векторів;

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \text{ – хвильове число;}$$

$$k_h = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \text{ – горизонтальне хвильове число;}$$

$$\omega_g = \sqrt{(1 - \gamma^{-1})g / H} \text{ – частота Брента – Вайсяля;}$$

$$k_g = (2H)^{-1} \text{ – масштаб хвильових чисел ГХ;}$$

$$c_g = \omega_g / k_g \text{ – масштаб швидкості ГХ;}$$

$$c_s = \sqrt{\gamma RT / \mu} \text{ – швидкість звуку;}$$

$$H = RT / \mu g \text{ – висота однорідної атмосфери;}$$

T – температура;

R, g, γ, μ – газова стала, прискорення вільного падіння, показник адіабати, середня молекулярна маса.

Вихідними є дисперсійне і поляризаційні рівняння теорії (Hince 1960). Після певного переформатування, представимо ці рівняння у вигляді:

Дисперсійне рівняння:

$$\omega^4 + P \cdot \omega^2 + Q = 0, \quad (3.2)$$

де $P = -c_s^2 k^2 - \gamma^2 g^2 / (4c_s^2)$, $Q = (\gamma - 1)g^2 k_h^2$.

Поляризаційні рівняння:

$$\frac{\delta \rho}{\rho \cdot R} = \frac{\delta p}{p \cdot \Pi} = \frac{V_h}{H} = \frac{V_z}{Z} = A \exp\{+k_g z\} \cdot \exp\{i(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)\}. \quad (3.3)$$

Поляризаційні коефіцієнти:

$$\begin{aligned} R &= \omega^2(k_z - i\gamma\kappa/(2-\gamma)) + i(\gamma-1)gk_h^2, \quad \kappa = (1-\gamma/2) \cdot g/c_s^2, \\ \Pi &= \gamma\omega^2(k_z - i\kappa), \\ H &= \omega k_h c_s^2(k_z - i\kappa), \\ Z &= -\omega(k_h^2 c_s^2 - \omega^2). \end{aligned} \quad (3.4)$$

З огляду на те, що точне рішення біквдратного рівняння (3.2) надто громіздке, для аналітичних розрахунків зручно користуватися його наближеним розв'язком (Vadas and Fritts 2005; Лизунов и Леонтьев 2011):

$$\omega \approx \sqrt{-P} = \sqrt{\omega_a^2 + k^2 c_s^2}, \quad \omega > \omega_a \quad (\text{акустична дисперсійна гілка}), \quad (3.5)$$

$$\omega \approx \sqrt{-\frac{Q}{P}} = \frac{c_g k_h}{\sqrt{1 + (k/k_g)^2}} = \frac{\omega_g k_h}{\sqrt{k^2 + k_g^2}}, \quad \omega < \omega_g \quad (\text{гравітаційна гілка}). \quad (3.6)$$

Звернемо увагу на специфічні хвильові параметри, які фігурують у цих формулах: у випадку акустичних хвиль – швидкість звуку c_s і акустична частота відсічки $\omega_a = c_s/2H$; у випадку гравітаційних хвиль – масштаб хвильових чисел k_g , максимальна частота ω_g (частота Брента-Вяйсяля) і максимальна швидкість c_g (яка чисельно близька до швидкості звуку; у термосфері $c_g = 0.98c_s$).

В області коротких і довгих хвиль розв'язок (3.6) переходить в точний розв'язок вихідного рівняння (3.2):

$$\omega = \begin{cases} k_h c_g, & k \ll k_g, \\ \omega_g k_h / k, & k \gg k_g. \end{cases} \quad (3.7)$$

На фазовій площині $\{k_h, \omega\}$ (рис. 3.1) дисперсійні криві ГХ заповнюють область 1. Ця область є сусідньою до області швидко згасаючих дисипативних мод (область 2), де дисперсійне рівняння (3.2) не справедливе. Акустичні моди заповнюють область 4.

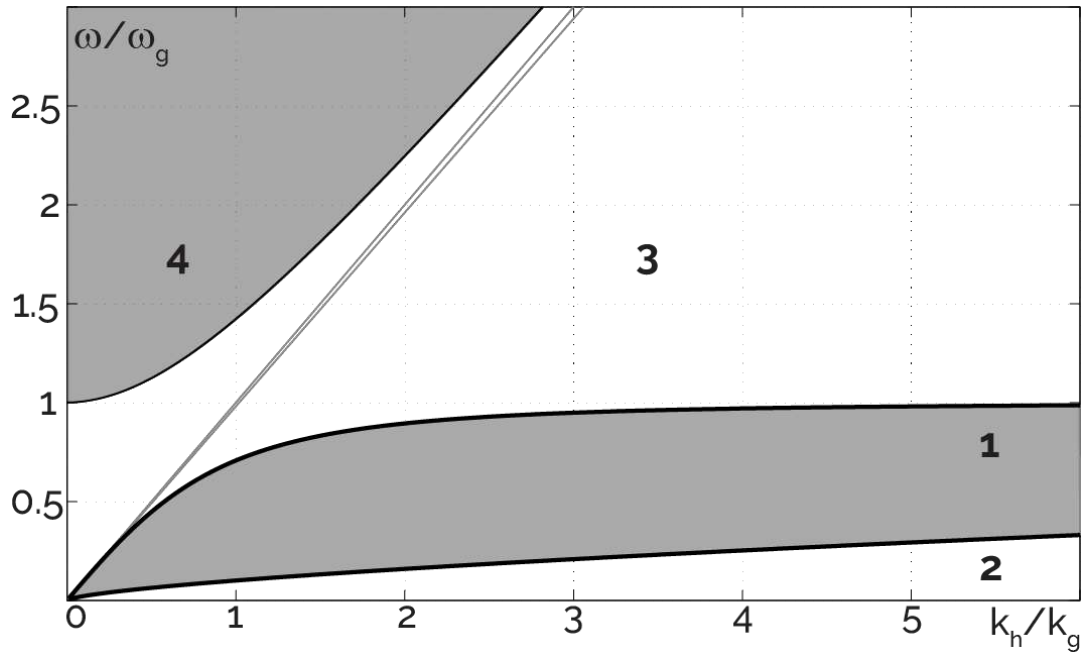


Рисунок 3.1 – Дисперсійна площа $\{k_h, \omega\}$. 1 – область ГХ; 2 – область дисипативних мод; 3 – заборонена область; 4 – область акустичних хвиль.

Формули (3.4) для поляризаційних коефіцієнтів також можна спростити. З цією метою слід знехтувати малим членом $i\kappa$ (оскільки просторовий масштаб $2\pi/\kappa \sim 2000$ км складає більше всієї висоти термосфери, отже на практиці $k_z \gg \kappa$). Також слід знехтувати незначною різницею швидкостей c_s і c_g . До коефіцієнту Z слід підставити дисперсійне співвідношення (3.6), тоді вираз у круглих скобках спрощується: $k_h^2 c_s^2 - \omega^2 \approx k_h^2 c_g^2 - \omega^2 = \omega^2 k^2 / k_g^2$. Остаточнo знаходимо:

$$\begin{aligned} R &= \omega^2 k_z + i(\gamma - 1)gk_h^2, \\ \Pi &= \gamma\omega^2 k_z, \\ H &= \omega k_h c_s^2 k_z, \\ Z &= -\omega^3 k^2 / k_g^2. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Продемонструємо застосування отриманих співвідношень до розрахунку напрямку руху атмосферних частинок в ГХ:

$$V_h = \frac{X}{Z} V_z = -\frac{k^2 + k_g^2}{k^2} \frac{k_z}{k_h} V_z. \quad (3.9)$$

В довгохвильовій області $k \ll k_g$ рух частинок відбувається квазігоризонтально: $V_z \ll V_h$ незалежно від напрямку поширення ГХ. В короткохвильовій області $k \gg k_g$ поляризація ГХ поперечна: $k_h V_h + k_z V_z = \vec{k} \cdot \vec{V} = 0$.

3.2.2 Зміщення спектральних оцінок

Точність оцінки частоти і хвильового вектора лімітується тією обставиною, що природні ГХ широкосмугові. До сьогодні цей факт цілком ігнорувався, і його нерозуміння призводило до помилок в оцінках параметрів ГХ. Покажемо це на прикладі розрахунку частоти ГХ ω . Розрахунок хвильових чисел k_y, k_z стикається з аналогічними труднощами.

Метод визначення частоти ГХ ґрунтується на наступному міркуванні (Johnson et al. 1995). Розглянемо вертикальну компоненту руху атмосферних частинок при поширенні плоскої монохроматичної хвилі. В цьому випадку зміщення частинок $\delta z(t, x) = \delta z_m \exp\{i(\omega t - k_x x)\}$, швидкість частинок $V_z(t, x) = V_{zm} \exp\{i(\omega t - k_x x)\}$, і виконується співвідношення:

$$V_z = \frac{d}{dt} \delta z = i\omega \cdot \delta z \Rightarrow \omega = \frac{|V_z|}{|\delta z|}. \quad (3.10)$$

Також можна бачити, що хвиля швидкості частинок $V_z(t, x)$ випереджає хвилю зміщення $\delta z(t, x)$ на $\pi/2$. Дана обставина дозволяє встановити сторону, в яку, по відношенню до напрямку польоту супутника, відбувається поширення хвильового процесу (Johnson et al. 1995).

В разі немонохроматичної хвилі співвідношення (3.10), очевидно, справедливе для спектральних складових $\omega = |V_z(\omega)|/|\delta z(\omega)|$, які, однак, не є спостережуваними величинами. Без урахування цього факту, буквально застосування формули (3.10) до аналізу експериментальних даних призводить

до наступних не виправданих замінів (Лизунов и Скороход 2016; Скороход и Лизунов 2017):

$$\omega = \left| \frac{V_z(\omega)}{\delta z(\omega)} \right| \rightarrow \omega = \left| \frac{V_z(k_x)}{\delta z(k_x)} \right| \text{ (необґрунтовано)} \rightarrow \omega = \frac{V_z(x)}{\delta z(x)} \text{ (не вірно)}. \quad (3.11)$$

Щоб дослідити цю ситуацію, скористаємося стандартним теоретичним підходом, який полягає в трактуванні немонохроматичної хвилі як модульованої монохроматичної (хвильового пакета):

$$\delta z(t) = A(t)e^{i\omega_0 t}, \quad (3.12)$$

де ω_0 – несуча частота хвилі, $A = A(t)$ – змінна амплітуда, що включає також і комплексну фазу. Вважається, що амплітуда змінюється достатньо повільно $|dA/dt| \ll \omega_0 |A|$, інакше втрачає сенс саме поняття несучої частоти.

Введемо характерні масштаби:

$$\tau \sim |A^{-1} \cdot dA/dt|^{-1} \text{ – тривалість хвильового пакета;}$$

$$\Delta\omega \sim \tau^{-1} \text{ – півширина спектру хвильового пакета.}$$

Диференціюючи (3.12) знаходимо:

$$V_z = \frac{d}{dt} \delta z = (i\omega_0 + A^{-1} \frac{dA}{dt}) \cdot \delta z = i(\omega_0 - i\delta\omega) \cdot \delta z, \text{ де } \delta\omega = A^{-1} \frac{dA}{dt} \sim \Delta\omega. \quad (3.13)$$

Таким чином, оцінка несучої частоти немонохроматичної хвилі за формулою (3.11) зміщена на комплексну величину $\delta\omega$, за модулем порядку ширини смуги частот хвильового пакета $\Delta\omega$. Оскільки на експерименті залежність $A(t)$ не відома і обчислення члена $\delta\omega$ не можливе, дане зміщення слід розглядати як похибку. Крім того, згідно з (3.13), в немонохроматичній хвилі зсув фаз Φ між коливаннями V_z і δz не рівний $\pi/2$. Остання обставина була виявлена в роботі (Innis and Conde 2002) експериментально, шляхом обчислення кореляції хвильових форм $V_z(x)$ і $\delta z(x)$. Було встановлено, що у всіх досліджених подіях $\Phi \neq \pi/2$, сягаючи в одному з випадків $\Phi \sim \pi/4$ (див. табл. 2 в роботі (Innis and Conde 2002)). Оскільки $\cot \Phi \sim \Delta\omega/\omega_0$, ці результати додатково вказують на широкосмуговий характер спостережених ГХ.

Для перевірки вищевикладеного розрахуємо несучу частоту модельного хвильового процесу:

$$\delta z(t) = \exp\{-t^2 / \tau^2\} e^{i\omega_0 t}. \quad (3.14)$$

Хвильова форма (3.14) та її амплітудний спектр показані на [рис. 3.2](#). Тривалість процесу за рівнем e^{-1} рівна 2τ . Півширина спектра $\Delta\omega = 2/\tau$. Знаходимо:

$$V_z(t) = \frac{d}{dt} \delta z = (i\omega_0 - \frac{2t}{\tau^2}) \cdot \delta z \Rightarrow \delta\omega = -\frac{2t}{\tau^2}. \quad (3.15)$$

На кінцях сигналу $t = \pm\tau$ зміщення оцінки частоти досягає максимуму: $|\delta\omega| = 2/\tau = \Delta\omega$, що точно узгоджується з (3.13).

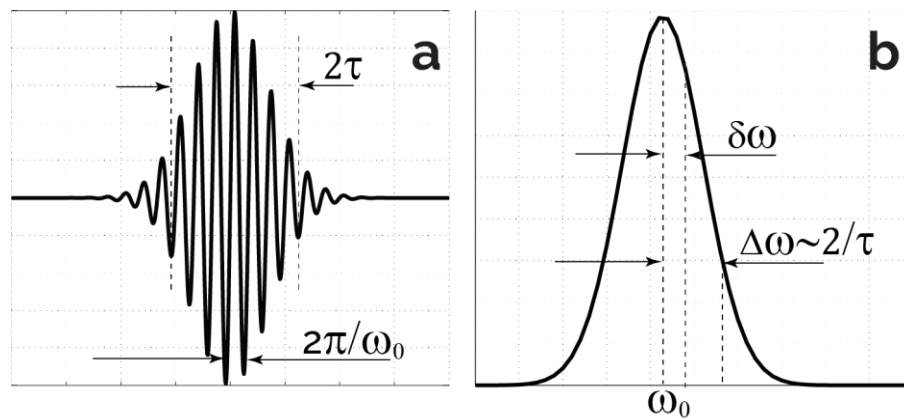


Рисунок 3.2 – До оцінки несучої частоти хвильового пакету. (а) Хвильова форма в часі (в космічному експерименті не реєструється). (б) Відповідний спектр (не реєструється). Позначені: положення несучої частоти хвильового пакету ω_0 , його півширина $\Delta\omega$, зміщення теоретичної оцінки несучої $\delta\omega$.

При аналізі експериментальних даних, похибку визначення частоти $\delta\omega$ можна оцінити за півшириною спектра хвильових чисел Δk_x ([Скориход и Лизунов 2017](#)):

$$\delta\omega = \Delta\omega = V_g \Delta k \sim V_g \Delta k_x, \quad (3.16)$$

де $V_g = \nabla_k \omega$ – групова швидкість ГХ і, оскільки напрямок руху супутника ОХ не виділений відносно можливих напрямків поширення ГХ, в якості розумної оцінки прийнято $\Delta k \sim \Delta k_x$.

Оцінка частоти ω дозволяє усунути просторово-часову невизначеність при вимірюванні хвильової форми ГХ вздовж орбіти супутника. Згідно (2.2), скореговане значення хвильового числа k_x дорівнює:

$$k_x = \frac{\omega}{V_{sc}} - 2\pi f, \quad \frac{\delta k_x}{k_x} \sim \frac{\delta \omega}{\omega} \frac{\omega}{k_x V_{sc}} + \frac{\delta f}{f}, \quad (3.17)$$

де $\delta f / f$ – похибка вимірювання просторової частоти (2.6), $\delta \omega / \omega$ – похибка теоретичної оцінки часової частоти, досліджена в даному розділі. Сумарна похибка (3.17) становить одиниці відсотків (Скороход и Лизунов 2017).

3.2.3 Оцінка частоти ГХ

Наведена нижче методика практично цілком ґрунтується на доробку (Dudis and Reber 1976; Makhlof et al. 1990; Johnson et al. 1995; Innis and Conde 2002) з тим застереженням, що оцінюванню підлягають центральні (несучі) значення спектральних параметрів: $\omega_0, k_{x0}, k_{y0}, k_{z0}$ (Лизунов и Скороход 2016; Скороход и Лизунов 2017). Питання точності оцінок розглянуто вище. Будемо розрізняти:

$\tilde{s}(x), \tilde{S}(k_x)$ – просторова хвильова форма ГХ та її ДПФ-спектр, отримані безпосередньо з експериментальних даних, як описано в підрозділі 2.2;

$\tilde{s}(t), \tilde{S}(\omega)$ – залежність від часу і частотний спектр ГХ, які не вимірюються на експерименті. Аналогічно, не вимірюються розподіли $\tilde{s}(y), \tilde{S}(k_y)$ і $\tilde{s}(z), \tilde{S}(k_z)$.

Алгоритм спектрального оцінювання наступний. Несучі частоти ω_0 і хвильові числа k_{y0}, k_{z0} обчислюються так, якби процес був монохроматичним. З цією метою хвильовий пакет ГХ замінюється еквівалентним йому гармонійним сигналом $s(n) \rightarrow A_m \sin(2\pi m \cdot n / N)$, амплітуда якого визначається з умови рівності енергій обох процесів (Скороход и Лизунов 2017):

$$\sum_{n=0}^{N-1} \tilde{s}^2(n) = \frac{1}{2} A_m^2 N \Rightarrow A_m = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{s}^2(n)} = \sqrt{2} \tilde{s}_{\text{rms}}. \quad (3.18)$$

Див. [рис. 3.3](#). В силу рівності Парсеваля $\sum_{n=0}^{N-1} \tilde{s}^2(n) = (1/N) \sum_{m=0}^{N-1} \tilde{S}^2(m)$ амплітуда монохроматичного сигналу може бути також обчислена як середньоквадратичне по спектру ([Скороход и Лизунов 2017](#)):

$$A_m = \sqrt{2} \tilde{s}_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{2}}{N} \tilde{S}_{\text{rms}}. \quad (3.19)$$

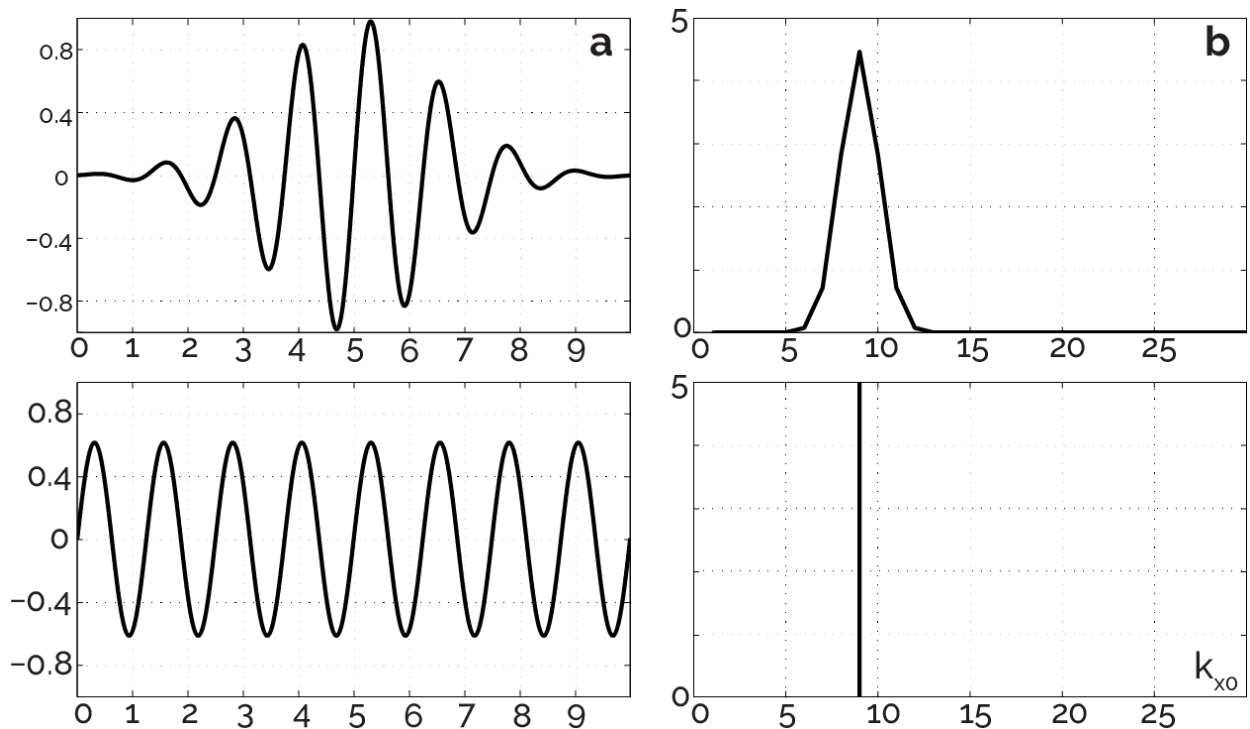


Рисунок 3.3 – заміна хвильового пакета еквівалентним монохроматичним сигналом. (а) Хвильова форма пакету (згори) та еквівалентного сигналу (знизу). (б) Амплітудні спектри пакету та еквівалентного сигналу.

Оцінка несучої частоти ГХ приймає має вигляд:

$$\omega_0 \sim V_{z_{\text{rms}}} / \delta z_{\text{rms}}, \quad (3.20)$$

де в правій частині стоять середньоквадратичні значення вертикальної швидкості і зміщення частинок. Похибка оцінки ω_0 рівна півширині частотного спектра хвильового пакету $\delta\omega = \Delta\omega$. Амплітуда швидкості V_z береться з даних вимірювань приладу WATS. Зміщення δz підлягає додатковому розрахунку за

даними приладу NACS на основі теорії (Dudis and Reber 1976; Makhlouf et al. 1990). Наведемо відомості з цих публікацій.

Вище 130 ... 150 км концентрації газових компонент розподілені з висотою за індивідуальними барометричними залежностями, внаслідок чого будь-які вертикальні зміщення атмосферних шарів призводять до зміни локального хімічного складу атмосфери. При цьому виконується співвідношення (Dudis and Reber 1976):

$$\frac{\delta \rho_{\alpha}}{\rho_{\alpha}} = \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\mu} - \frac{1}{\gamma} \right) \frac{\delta z}{H} + \frac{\delta p}{\gamma p}, \quad (3.21)$$

де ρ_{α} – густина атмосферного газу сорту α , μ_{α} – його молекулярна маса, μ і H – молекулярна маса та параметр висоти однорідної атмосфери багатокомпонентного середовища, p – атмосферний тиск. У разі однокомпонентної атмосфери ($\mu = \mu_{\alpha}$) вираз (3.21) переходить у формулу, незалежно отриману в роботі (Makhlouf et al. 1990):

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\delta z}{H} + \frac{\delta p}{\gamma p}. \quad (3.22)$$

Слідуючи (Makhlouf et al. 1990) відзначимо, що варіація густини рухомої атмосфери має дві складові різної фізичної природи. Перша складова описує «гравітаційну варіацію», обумовлену вертикальним зміщенням елементарного об'єму повітря на фоні барометричного розподілу атмосферного тиску. Ця варіація залежить від молекулярної маси газової компоненти μ_{α} . Друга складова описує однакову для всіх компонент «пружну варіацію», що виникає внаслідок зміни локального атмосферного тиску $\delta p(t)$.

З використанням поляризаційних співвідношень (3.8) дослідимо співвідношення гравітаційної та пружної складових варіації густини.

Гравітаційна варіація:

$$\left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)_g = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\delta z}{H} = 2k_g \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{V_z}{i\omega}, \quad (3.23)$$

Пружна варіація:

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_e = \frac{\delta p}{\gamma p} = \frac{\Pi}{Z} V_z = -\frac{k_z k_g^2}{\omega k^2} V_z, \quad (3.24)$$

Відношення амплітуд гравітаційної та пружної варіацій:

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_g : \left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_e = i \frac{2(\gamma-1)}{\gamma} \frac{k^2}{k_z k_g}. \quad (3.25)$$

Таким чином, в довгохвильовій області домінує пружна варіація густини, в короткохвильовій області – гравітаційна варіація.

Згідно (3.25), пружна і гравітаційна складові коливань зміщені на фазовий кут $\pi/2$, причому знак зсуву фаз залежить від знака хвильового числа k_z . Під час аналізу експериментальних даних слід враховувати ту обставину, що вертикальні компоненти групової та фазової швидкостей ГХ напрямлені протилежно: $k_z \cdot \partial\omega/\partial k_z < 0$. Оскільки орбіти супутників розташовані, у всякому разі, вище основних джерел генерації ГХ, при аналізі даних слід вибирати опцію $k_z < 0$ – енергія ГХ поширюється знизу вгору. В цьому випадку пружна варіація густини випереджає гравітаційну варіацію по фазі на $\pi/2$.

Вектори коливань (3.21) представлені на рис. 3.4. На першій з діаграм (рис. 3.4 а) показано випадок чисто гравітаційних коливань $\delta p \rightarrow 0$, що реалізується в області коротких довжин хвиль $k \gg k_g$. В цьому випадку:

$$\frac{\delta\rho_\alpha/\rho_\alpha}{\delta\rho_\beta/\rho_\beta} = \frac{\gamma \cdot \mu_\alpha - \mu}{\gamma \cdot \mu_\beta - \mu}. \quad (3.26)$$

Оскільки на висотах супутникових спостережень 250–500 км переважає атомарний кисень, середня молекулярна маса атмосфери дорівнює $\mu \approx \mu(\text{O})$. Підставляючи в (3.26) значення $\mu(\text{O}) = 16$, $\mu(\text{N}_2) = 28$, $\mu(\text{He}) = 4$, знаходимо:

$$\frac{\delta\rho(\text{N}_2)}{\rho(\text{N}_2)} : \frac{\delta\rho(\text{O})}{\rho(\text{O})} : \frac{\delta\rho(\text{He})}{\rho(\text{He})} = 2,8 : 1 : (-1,1). \quad (3.27)$$

Відзначимо, що коливання основних газових компонент $[\text{O}]$ і $[\text{N}_2]$ відбуваються в протифазі з коливаннями легкого газу $[\text{He}]$.

З ростом пружної складової (що відбувається по мірі збільшення довжини хвилі) різниця в амплітудах варіацій зменшується, а різниця фаз спочатку росте, досягаючи максимуму $\varphi(\text{O}) - \varphi(\text{N}_2) \sim 30^\circ$ при $k \sim k_g$, а потім також зменшується (рис. 3.4 b, c).

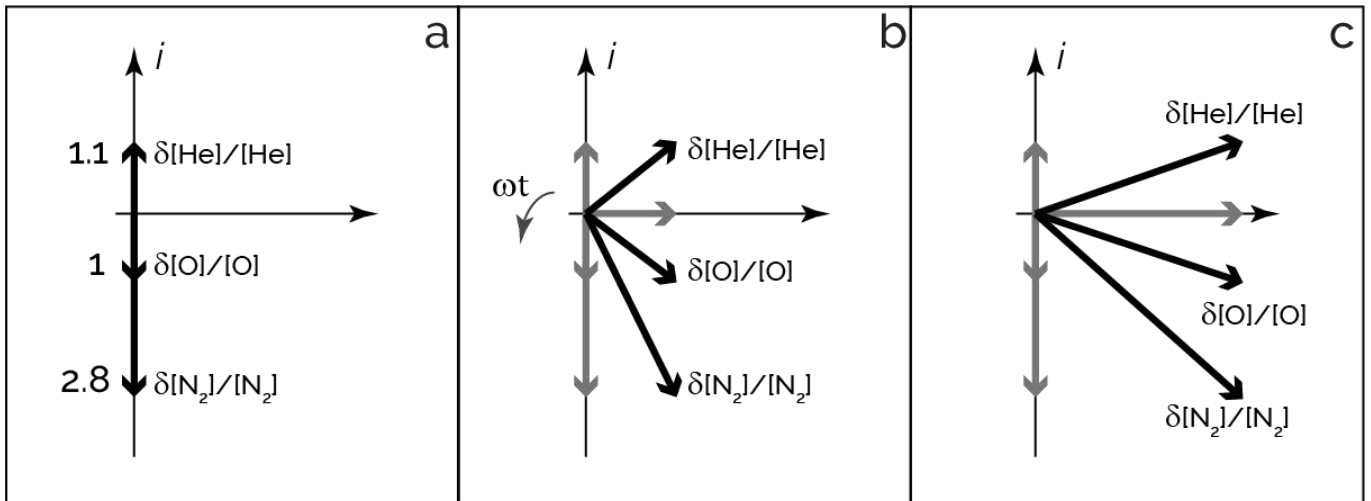


Рисунок 3.4 – Комплексні амплітуди коливань густини атмосферних компонент в разі $k_z < 0$ (енергія ГХ поширюється вгору). Гравітаційна складова коливань відкладена вздовж уявної осі, пружна складова вздовж дійсної осі. (а) Випадок з нульовою пружною складовою, (b) гравітаційна і пружна складові співрозмірні, (c) велика пружна складова.

Відзначимо удаване протиріччя. З одного боку, всі сорти атмосферних газів рухаються в ГХ спільно, як єдина рідина, і демонструють однакові варіації температури δT і швидкості $\delta \vec{V}$. З іншого боку, варіації газових концентрацій відбуваються з різними амплітудами і фазами. Причина полягає, звісно, не в тому, що різні гази рухаються один крізь одне, а в тому, що в точку спостереження переміщаються атмосферні шари з різним хімічним складом, які лежать вище і нижче від точки спостереження.

На діаграмах рис. 3.4 миттєві значення $\delta \rho_\alpha$ визначаються як проекції комплексних векторів на дійсну вісь, причому вся конфігурація обертається проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю ω_0 . Розгортку коливань в просторі дає рис. 3.5. Можна бачити, що в разі $k_z < 0$ (енергія ГХ поширюється

вгору) коливання густини легких газів випереджають коливання важких компонент. Ця обставина (вперше, вірогідно, зазначена в роботі (Федоренко 2009)) дозволяє визначити напрямок поширення ГХ вздовж траєкторії руху супутника за даними вимірювань тільки приладу NACS.

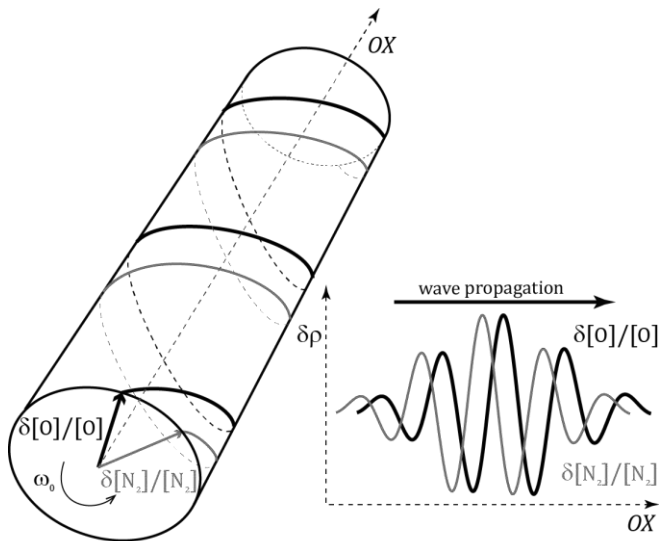


Рисунок 3.5 – Чергування коливань густини газових компонент в часі і просторі за умови $k_z < 0$. На перерізі циліндра зображена комплексна діаграма коливань. Циліндр обертається з кутовою швидкістю ω_0 проти часової стрілки. Хвилі густини поширюються в напрямку вісі OX зі швидкістю ω_0 / k_{x0} . Миттєві значення варіацій визначаються як проєкції векторів стану на дійсну вісь.

З формули Дудіса і Ребера (3.21) випливає вираз для вертикального зміщення повітряних частинок:

$$\frac{\delta\rho_\alpha}{\rho_\alpha} - \frac{\delta\rho_\beta}{\rho_\beta} = \left(\frac{1}{H_\alpha} - \frac{1}{H_\beta} \right) \delta z \Rightarrow \delta z = \frac{RT}{(\mu_\alpha - \mu_\beta)g} \left(\frac{\delta\rho_\alpha}{\rho_\alpha} - \frac{\delta\rho_\beta}{\rho_\beta} \right), \quad (3.28)$$

де $H_{\alpha,\beta}$ – висоти однорідної атмосфери газів сорту α і β . При проведенні розрахунків в якості пари газів зазвичай бралися атомарний кисень O і молекулярний азот N₂. Підстановка середньоквадратичної амплітуди δz_{rms} в формулу (3.20) розв'язує задачу оцінки несучої частоти ω_0 .

Відзначимо, що співвідношення (3.20) – (3.22) описують довільні коливання атмосфери як ідеальної рідини. Єдиним критерієм того, що такі коливання є ГХ, а не інші типи атмосферних хвиль (акустичні, приливні, високі просторові гармоніки планетарних хвиль, змушені теплові неоднорідності в дугах полярних сяїв тощо), є потрапляння частоти ω_0 в спектральний діапазон ГХ.

3.2.4 Оцінка компонент хвильового вектора

Для оцінки k_y скористаємося горизонтальною компонентою лінеаризованого рівняння руху атмосфери:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} V_y = - \frac{\partial p}{\partial y}. \quad (3.29)$$

Для монохроматичних складових знаходимо:

$$\omega V_y(\omega) = k_y \frac{p}{\rho} \frac{\delta p(k_y)}{p} = k_y \frac{c_s^2}{\gamma} \left(\frac{\delta \rho(k_y)}{\rho} + \frac{\delta T(k_y)}{T} \right), \quad (3.30)$$

звідки, за аналогією з (3.20), впливає оцінка несучого хвильового числа:

$$k_{y0} \sim \omega_0 \frac{\gamma}{c_s^2} V_{y \text{ rms}} \left(\frac{\delta \rho_{\text{rms}}}{\rho} + \frac{\delta T_{\text{rms}}}{T} \right)^{-1}. \quad (3.31)$$

Похибка оцінки k_{y0} рівна півширині просторового спектра ГХ $\delta k_y = \Delta k_y \sim \Delta k_x$.

Після того, як встановлено значення ω_0, k_{x0}, k_{y0} , компонента хвильового вектора k_{z0} обчислюється за допомогою дисперсійного рівняння ГХ (3.2) або (3.6).

3.2.5 Приклад розрахунку спектра хвильового пакета ГХ

Підсумовуючи, алгоритм аналізу спектрального складу ГХ наступний. На першому кроці будуються синхронні ряди відліків атмосферних параметрів: густини газових компонент $\rho(\text{O})$, $\rho(\text{N}_2)$, компонент швидкості V_y , V_z і температура T . Розраховується густина $\rho = \rho(\text{O}) + \rho(\text{N}_2)$ і тиск атмосфери $p = (R/\mu)\rho T$. Потім, в хвильових формах зазначених параметрів проводиться селекція хвильових пакетів ГХ.

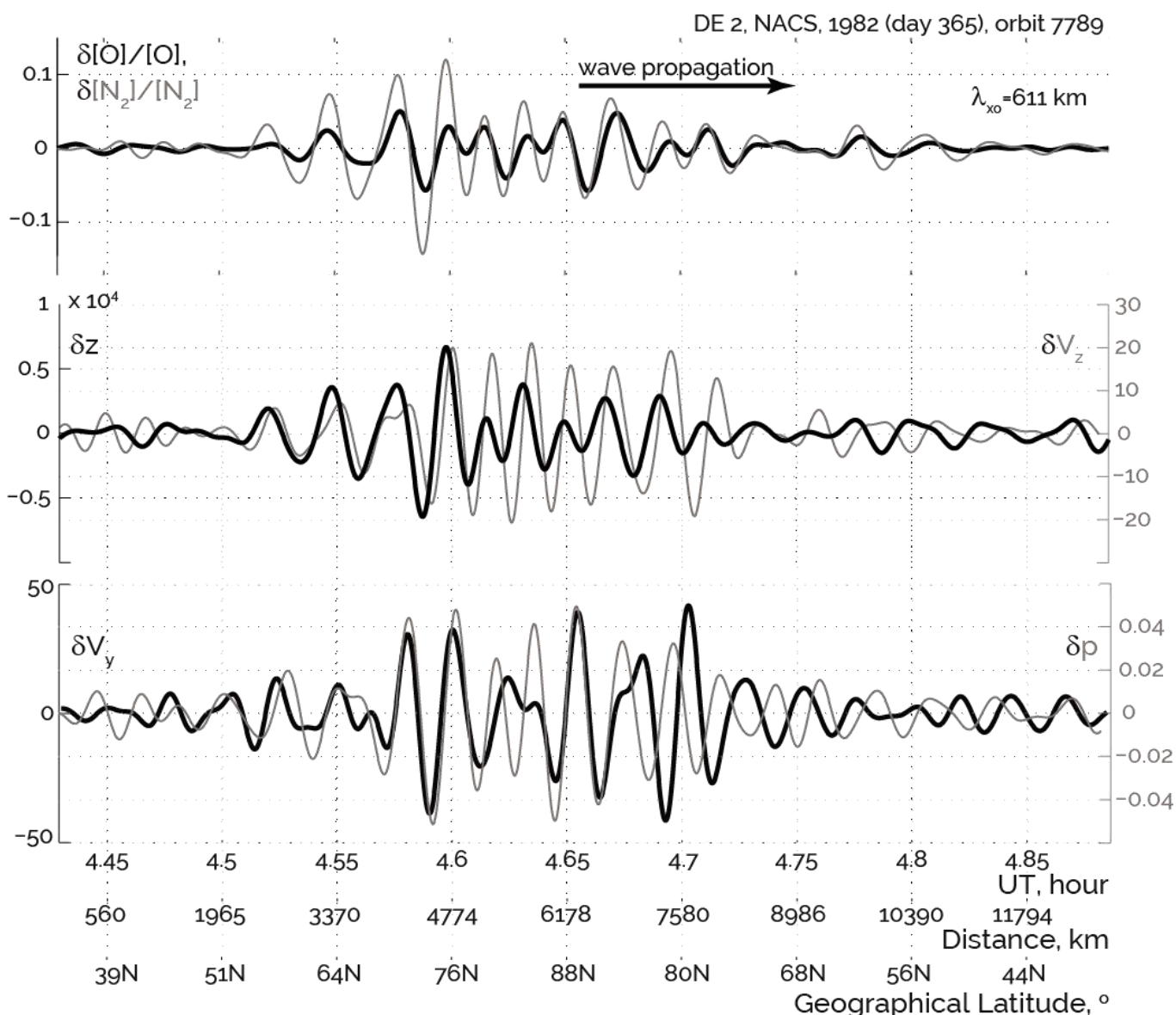


Рисунок 3.6 – Середньомасштабний хвильовий пакет ГХ, представлений у варіаціях різних фізичних параметрів. Зверху-вниз: хвильові форми в концентраціях газових компонент $\delta[O]/[O]$ і $\delta[N_2]/[N_2]$ (показано напрямок поширення ГХ вздовж орбіти супутника); хвильові форми вертикального зміщення δz і швидкості V_z ; хвильові форми швидкості V_y і тиску δp .

На [рис. 3.6](#), що є продовженням [рис. 2.2](#) і [рис. 2.6](#), представлені багатокomпонентні вимірювання одного з раніше виділених хвильових пакетів. На верхньому графіку ([рис. 3.6](#)) цей пакет відтворений в коливаннях $\delta[N_2]/[N_2]$ і $\delta[O]/[O]$. Амплітуди коливань газових компонент співвідносяться як 3:1, при цьому коливання (O) випереджують коливання (N_2) на невеликий фазовий кут. Можна бачити, що в даному випадку поширення хвилі

відбувається в бік руху супутника. На середньому графіку (рис. 3.6) показана хвиля зміщення δz , обчислена згідно (3.26), і хвиля швидкості V_z . На нижньому графіку (рис. 3.6) – хвилі швидкості V_y і тиску δp . Фінальним кроком є визначення середньоквадратичних амплітуд δz_{rms} , $V_{z\text{rms}}$, $V_{y\text{rms}}$, δp_{rms} , δT_{rms} і розрахунок спектральних параметрів ω_0, k_{y0}, k_{z0} за вказаними вище формулами. Результати обчислень заносяться в каталог (Ferencz et al. 2014).

3.2.6 Методика розбиття хвильового процесу на хвильові пакети

На рис. 3.7 відтворений фрагмент рис. 2.6 із зображенням хвильової форми ГХ $\tilde{z}(x)$ та відповідного амплітудного спектра $|\tilde{S}(k_x)|$. Можна бачити, що в спектральній області енергія ГХ розподілена по спектру хвильових чисел k_x у вигляді окремих згустків. Це особливо помітно, якщо зони концентрації енергії обмежити деяким умовним рівнем, скажімо, e^{-1} від локального максимуму енергії (або $e^{-1/2} \approx 0.6$ від амплітуди сигналу, зображеного на рисунку). Вид спектру ГХ наводить на думку про те, що ГХ, будучи номінально надширокосмуговими, поширюються у вигляді певної кількості хвильових пакетів. Щоб справдити це припущення, необхідно дослідити конфігурацію фазового об'єму, зайнятого хвильовим процесом, в просторі хвильових векторів $\{k_x, k_y, k_z\}$ або, що еквівалентно, в просторі $\{\omega, k_x, k_y\}$. З цією метою був розроблений евристичний алгоритм розрахунку 3D спектра ГХ (Скороход и Лизунов 2017). Схематична ілюстрація розрахунку приведена на рис. 3.8.

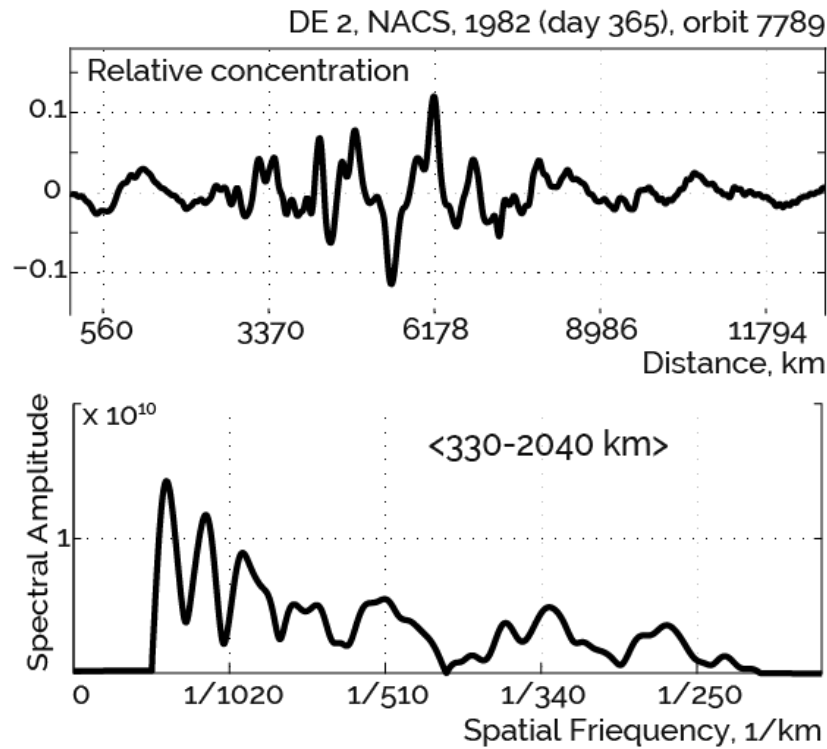


Рисунок 3.7 – Приклад хвильової форми і амплітудного спектра ГХ. Розподіл енергії в просторі хвильових чисел сильно неоднорідний.

Можливі межі хвильових пакетів по осі k_x обираємо серед мінімумів амплітудного спектру $|\tilde{S}(k_x)|$. Положення нижньої (довгохвильової) межі першого пакету встановлюємо в області відсічки смугового фільтру ГХ $k_{x\min} \sim 1/2500 \text{ км}^{-1}$. Права межа $k_{x\max}$ вибирається серед одного з наступних спектральних мінімумів. Спочатку встановимо пробне положення $k_{x\max}$ на сусідній справа мінімум. Розрахуємо несуче хвильове число окресленого таким чином пакета $k_{x0} = (k_{x\min} + k_{x\max})/2$ і, за методикою спектрального аналізу, розвиненою вище, частоту ω_0 і хвильове число k_{y0} . Таким чином, отримаємо центральну точку хвильового пакету в тривимірному фазовому просторі $\{\omega, k_x, k_y\}$. Далі зміщуємо праву межу на наступні мінімуми і повторюємо процедуру, отримуючи нові фазові точки. Звичайно, з ростом параметра $k_{x\max}$ параметри ω_0, k_{y0} спочатку незначно зміщуються, але потім, по досягненню числом $k_{x\max}$ деякого критичного значення, точка помітно стрибає в нову

область. Це означає, що остання приєднана область фазового простору належить вже до іншого хвильового пакету. Таким чином, попереднє значення $k_{x\max}$ є закінченням першого і початком другого хвильового пакету. Тим же способом послідовно локалізуємо в 3D наступні пакети ГХ.

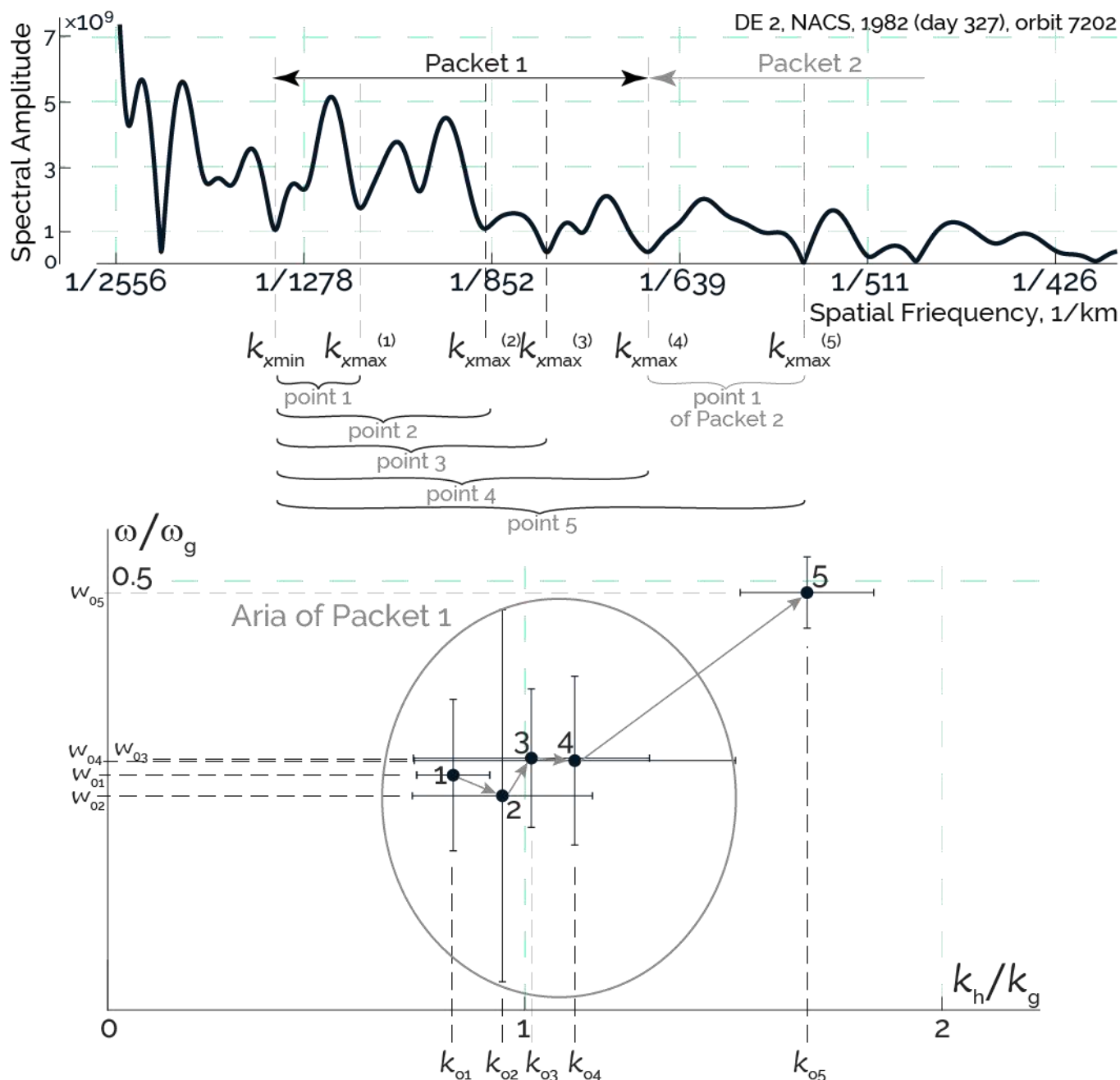


Рисунок 3.8 – До розбиття спектру ГХ на когерентні хвильові пакети на прикладі орбітального витка 7202 супутника DE 2. (вгорі) Амплітудний спектр ГХ. (внизу) Переміщення несучої частоти на дисперсійній площині при зміні меж хвильових чисел пакета ГХ.

Вищеописаній процедурі аналізу були піддані всі хвильові форми збурень. Встановлено, що енергія, як правило, концентрується в кількох фазових «краплях» (рис. 3.8). Це далекосяжний результат, який дозволяє перейти від статичної картинки хвильового процесу $\tilde{S}(x)$ до розгляду поширення хвиль. Якби хвильовий процес був би більш-менш рівномірно розподілений по спектру, оцінка його частот та хвильових чисел втратила би всякий сенс, оскільки зсув оцінок спектральних складових $\tilde{S}(\omega, k_x, k_y)$ становив би сотні відсотків величини. Саме поділ хвильового процесу на складові хвильові пакети, хоча теж широкосмугові, але компактно локалізовані в фазовому просторі, дозволяє приписати хвильовим пакетам такі фізичні характеристики як середня (несуча) частота і хвильовий вектор, напрямок поширення, групова швидкість, а також виміряти їх енергію і потік енергії.

3.2.7 Похибки

Таким чином, аналіз супутникових вимірювань дозволяє з високою точністю встановити розподіл хвильової форми ГХ уздовж орбіти супутника $\tilde{S}(x)$ і спектр $\tilde{S}(k_x)$. Інші спектральні параметри – частота ω і хвильові числа k_y, k_z – оцінюються зі значною похибкою.

Джерела похибок наступні:

випадкова приладова похибка вимірювання атмосферного параметра $\sim 0,5\%$;

розтікання спектра хвильових чисел k_x . Після корегування просторово-часової невизначеності, похибка $\sim 1-5\%$;

зміщення теоретичної оцінки параметрів ω, k_y, k_z , порядку півширини спектра хвильового пакета. Похибка сягає десятків відсотків величини.

Сказане ілюструє рис. 3.9, на якому схематично зображено об'єм, зайнятий хвильовим пакетом у фазовому просторі. Форма фазового об'єму

достеменно невідома, але відомі його габарити – півширини спектру $\Delta k, \Delta \omega$; ці розміри визначають похибку центрування об'єму на дисперсійній площині.

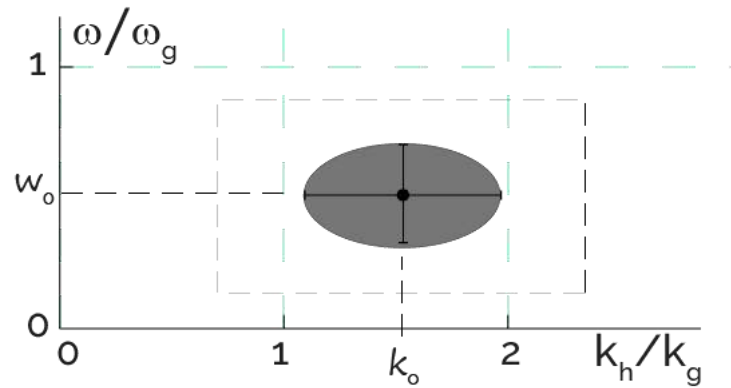


Рисунок 3.9 – Хвильовий пакет ГХ на дисперсійній площині. Вказані несучі частота і горизонтальне хвильове число, прямолінійні відрізки – похибки визначення несучих (вуса), пунктирна лінія – довірчий інтервал локалізації хвильового пакета.

3.3 Автоматизація обробки даних

Для автоматизації описаних вище процедур створено спеціальний програмний комплекс, блок-схема якого представлена на [рис. 3.10](#). Під управлінням оператора програмний комплекс забезпечує виконання наступних завдань (укрупнено):

1. Завантаження вхідних даних з веб-ресурсу космічного проекту. Побудова синхронних рядів вимірювань різних атмосферних параметрів. Попередня обробка даних (прив'язка рядів вимірювань до єдиної шкали часу, виявлення розривів даних за UT, ресемплінг даних до єдиної частоти дискретизації тощо);

2. Фільтрація хвильових збурень. Візуалізація та геопросторова прив'язка хвильових форм ГХ;

3. Розрахунок хвильових характеристик (несучі частота і компоненти хвильового вектора, ширина спектра, середньоквадратична амплітуда). Розбиття спектру ГХ на хвильові пакети. Каталогізація хвильових подій.

Вхідними даними для обробки є результати вимірювань на супутнику DE 2 (експерименти NACS та WATS). Після невеликого коригування, програмне забезпечення можна застосувати для обробки даних інших космічних проектів.

3.3.1 Вхідні дані

Можна назвати кілька вимог до організації супутникових спостережень ГХ. По-перше, необхідно забезпечити на борту супутника реєстрацію цілого набору параметрів нейтральної атмосфери (бажано концентрацій газових компонент, температури та потокової швидкості). По-друге, просторовий інтервал зйому даних (період дискретизації) має бути значно меншими за довжини хвиль ГХ. Проекти серії AE та DE 2 задовольняють вказаним вимогам.

Для обробки даних був розроблений програмний пакет в середовищі Matlab (додаток Б). Дані спостережень завантажуються з ресурсу НАСА «National Space Data Center» (описання структури вхідних даних знаходиться в текстовому файлі readme.txt за посиланням <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/de/de2>, для кожного приладу є свій такий файл).



Рисунок 3.10 – Архітектура програмного комплексу автоматичної обробки даних.

В проекті DE 2 за кожен бортовий експеримент відповідали різні команди виконавців. Так, дані приладу NACS (PI експерименту George Carignan) представлені у вигляді зручних таблиць параметрів (кожен параметр поміщався до окремого стовпчика) та відповідних метаданих, представлених у вигляді текстових ASCII файлів (рис. 3.11). За добу створювалось від 4 до 11 файлів, які, по можливості, відповідали окремими орбітальним виткам (біля 40 % файлів містять частини двох орбітальних витків). На сайті НАСА дані приладу NACS представлені з періодом дискретизації 1 секунда (в просторі –

7.8 км). При цьому мінімальні довжини хвиль ГХ складають біля сотні км, отже, дані цього експерименту цілком прийнятні для дослідження.

Після більш детального вивчення даних експерименту виявилось, що попри зручність подання інформації майже в кожному файлі присутні збої, що ускладнює автоматизацію процесу роботи з файлами. Біля 70 % файлів містять збої дискретизації (лакуни запису даних сягають до 50 секунд). Біля 10 % файлів містять дані з двох непослідовних орбітальних витків.

UT (ms)	O density (1/cm ³)	% err.	N2 density (1/cm ³)	% err.	He density (1/cm ³)	% err.	λ	Orbit No.	Alt. (km)	Lat. (deg)	Long. (deg)	LST (h)	LMT (h)	L Sh.	Inv. Lat. (deg)	St (d)
15947226	1.690633E+09	2.00	2.195948E+08	3.00	2.027111E+07	1.50	0.0	7789	257.36	34.38	-7.15	3.90	4.43	1.36	31.10	121
15948226	1.692730E+09	2.00	2.207745E+08	2.50	1.984308E+07	1.50	3.4E	7789	257.33	34.45	-7.15	3.90	4.44	1.37	31.18	121
15949226	1.702429E+09	2.00	2.225644E+08	2.50	2.000333E+07	1.50	3.45	7789	257.30	34.52	-7.16	3.90	4.44	1.37	31.26	121
15950226	1.696793E+09	2.00	2.199553E+08	2.50	1.974989E+07	1.50	3.44	7789	257.27	34.59	-7.16	3.90	4.44	1.37	31.35	121
15951226	1.697711E+09	2.00	2.184193E+08	3.00	1.990247E+07	1.50	3.4	7789	257.24	34.65	-7.16	3.90	4.44	1.37	31.43	121
15952226	1.696695E+09	2.00	2.192385E+08	3.00	2.030081E+07	1.50	3.4	7789	257.21	34.72	-7.17	3.90	4.44	1.38	31.51	121
15953226	1.701020E+09	2.00	2.176492E+08	3.00	2.014106E+07	1.50	3	7789	257.18	34.79	-7.17	3.90	4.44	1.38	31.59	121
15954226	1.704821E+09	2.00	2.188780E+08	3.00	2.025985E+07	1.50	3	7789	257.15	34.86	-7.18	3.90	4.44	1.38	31.67	121
15955226	1.700037E+09	2.00	2.197996E+08	3.00	2.022657E+07	1.50	3	7789	257.12	34.93	-7.18	3.90	4.44	1.38	31.76	121
15956226	1.708164E+09	2.00	2.173953E+08	3.00	2.063617E+07	1.50	3	7789	257.09	34.99	-7.18	3.90	4.45	1.39	31.84	121
15957226	1.705739E+09	2.00	2.166785E+08	3.00	2.055066E+07	1.50	3	7789	257.06	35.06	-7.19	3.90	4.45	1.39	31.92	121
15958226	1.695220E+09	2.00	2.184193E+08	3.00	2.034177E+07	1.50	3	7789	257.03	35.13	-7.19	3.90	4.45	1.39	32.00	121
15959226	1.709147E+09	2.00	2.175468E+08	3.00	2.065460E+07	1.50	3	7789	257.00	35.20	-7.20	3.90	4.45	1.39	32.09	121
15960226	1.707836E+09	2.00	2.166785E+08	3.00	2.005505E+07	1.50	3	7789	256.97	35.27	-7.20	3.90	4.45	1.40	32.17	121
15961226	1.703576E+09	2.00	2.151916E+08	3.00	2.061005E+07	1.50	3	7789	256.95	35.33	-7.21	3.90	4.45	1.40	32.25	121
15962226	1.703576E+09	2.00	2.176001E+08	3.00	2.083738E+07	1.50	3.3	7789	256.92	35.40	-7.21	3.90	4.45	1.40	32.33	121
15963226	1.706755E+09	2.00	2.152940E+08	3.00	2.047235E+07	1.50	3.3	7789	256.89	35.47	-7.21	3.90	4.45	1.40	32.42	121
15964226	1.702495E+09	2.00	2.160641E+08	3.00	2.111642E+07	1.50	3.38	7789	256.86	35.54	-7.22	3.90	4.46	1.41	32.50	121
15965226	1.704821E+09	2.00	2.164204E+08	3.00	2.050970E+07	1.50	3.39	7789	256.83	35.60	-7.22	3.90	4.46	1.41	32.58	121
15966226	1.704756E+09	2.00	2.135532E+08	3.00	2.080001E+07	1.50	3.370	7789	256.80	35.67	-7.23	3.90	4.46	1.41	32.66	121
15967226	1.706492E+09	2.00	2.169857E+08	3.00	2.096026E+07	1.50	3.351	7789	256.77	35.74	-7.23	3.90	4.46	1.41	32.75	121
15968226	1.707410E+09	2.00	2.145772E+08	3.00	2.136577E+07	1.50	3.34f	7789	256.75	35.81	-7.23	3.90	4.46	1.42	32.83	121
15969226	1.708164E+09	2.00	2.113004E+08	3.00	2.071450E+07	1.50	3.34	7789	256.72	35.88	-7.24	3.90	4.46	1.42	32.91	121
15970226	1.709736E+09	2.00	2.118124E+08	3.00	2.123213E+07	1.50	3.33	7789	256.69	35.94	-7.24	3.90	4.46	1.42	33.00	121
15971226	1.707475E+09	2.00	2.113537E+08	3.00	2.080769E+07	1.50	3.3	7789	256.66	36.01	-7.25	3.90	4.46	1.42	33.08	121
15972226	1.708721E+09	2.00	2.123460E+08	3.00	2.109031E+07	1.50	3.3	7789	256.64	36.08	-7.25	3.90	4.47	1.43	33.16	121
15973226	1.708819E+09	2.00	2.119681E+08	3.00	2.104577E+07	1.50	3.3	7789	256.61	36.15	-7.26	3.90	4.47	1.43	33.24	121
15974226	1.704264E+09	2.00	2.109932E+08	3.00	2.107188E+07	1.50	3.3	7789	256.58	36.22	-7.26	3.90	4.47	1.43	33.33	121
15975226	1.714390E+09	2.00	2.120172E+08	3.00	2.091162E+07	1.50	3.3	7789	256.55	36.28	-7.26	3.90	4.47	1.44	33.41	121
15976226	1.700856E+09	2.00	2.114028E+08	3.00	2.094900E+07	1.50	3.3	7789	256.53	36.35	-7.27	3.90	4.47	1.44	33.49	121
15977226	1.704002E+09	2.00	2.102273E+08	3.00	2.120602E+07	1.50	3.3	7789	256.50	36.42	-7.27	3.90	4.47	1.44	33.58	121
15978226	1.701676E+09	2.00	2.106369E+08	3.00	2.077748E+07	1.50	3.3	7789	256.47	36.49	-7.28	3.90	4.47	1.44	33.66	121
15979226	1.706492E+09	2.00	2.090026E+08	3.00	2.123930E+07	1.50	3.3	7789	256.45	36.56	-7.28	3.90	4.47	1.45	33.74	121
15980226	1.704428E+09	2.00	2.086872E+08	3.00	2.129921E+07	1.50	3.29	7789	256.42	36.62	-7.28	3.90	4.48	1.45	33.83	121
15981226	1.707639E+09	2.00	2.085111E+08	3.00	2.115380E+07	1.50	3.301	7789	256.40	36.69	-7.29	3.90	4.48	1.45	33.91	121
15982226	1.702167E+09	2.00	2.098177E+08	3.00	2.132481E+07	1.50	3.274	7789	256.37	36.76	-7.29	3.90	4.48	1.45	33.99	121
15983226	1.699447E+09	2.00	2.064672E+08	3.00	2.138471E+07	1.50	3.2F	7789	256.34	36.83	-7.30	3.90	4.48	1.46	34.08	121
15984226	1.702167E+09	2.00	2.077287E+08	3.00	2.105703E+07	1.50	3.2	7789	256.32	36.90	-7.30	3.90	4.48	1.46	34.16	121
15985226	1.708164E+09	2.00	2.080892E+08	3.00	2.151117E+07	1.50	3	7789	256.29	36.96	-7.31	3.90	4.48	1.46	34.24	121

Рисунок 3.11 – Фрагмент представлення даних експерименту NACS (супутник DE 2).

Дані приладу WATS були представлені в іншому вигляді (PI експерименту – Nelson Spencer). Параметри плазми, температури та швидкості вітру і супроводжуючих метаданих записувались до двох рядочків послідовно (рис. 3.12). Період дискретизації даних дорівнює 2, 4 і 8 секунд (причому зміна семплінгу відбувалася навіть в межах одного файлу). Кожен окремий день вимірювань записувався до окремого ASCII файлу. Для роботи з параметрами необхідно не тільки вишикувати кожен параметр до окремого стовпчика, але й розбити таблицю на дві частини, оскільки через рядочок послідовно записувались дані горизонтальної та вертикальної швидкості вітру.

82365	15878663	311	28	0.23376E+09	940.3	949.7	310.6	1048911039	118161
9999.0	9999.0	7789	259.8	29.7	-6.9	3.90	4.35	1.57	25.7
82365	15880663	320	28	0.23124E+09	908.8	917.9	359.2	1037610972	77120
9999.0	9999.0	7789	259.7	29.9	-6.9	3.90	4.35	1.23	25.8
82365	15884663	541	28	0.24397E+09	1010.1	-9.0	143.6	1094711130	99142
9999.0	9999.0	7789	259.6	30.1	-6.9	3.90	4.36	1.23	26.1
82365	15886663	311	28	0.22662E+09	938.3	947.7	301.1	1016910742	118161
9999.0	9999.0	7789	259.5	30.3	-6.9	3.90	4.36	1.24	26.3
82365	15888663	320	28	0.22480E+09	911.3	920.4	353.3	1008710653	77120
9999.0	9999.0	7789	259.4	30.4	-6.9	3.90	4.36	1.24	26.4
82365	15892663	541	28	0.23468E+09	1001.2	-9.0	140.9	1053110741	99142
9999.0	9999.0	7789	259.3	30.7	-6.9	3.90	4.37	1.25	26.7
82365	15894663	311	28	0.22031E+09	960.2	969.8	296.4	988610391	118161
9999.0	9999.0	7789	259.2	30.8	-6.9	3.90	4.37	1.25	26.9
82365	15896663	320	28	0.21732E+09	913.1	922.3	345.5	975210315	77120
9999.0	9999.0	7789	259.1	30.9	-6.9	3.90	4.37	1.26	27.1
82365	15900663	541	28	0.22847E+09	1003.8	-9.0	130.7	1025310465	99142
9999.0	9999.0	7789	259.0	31.2	-7.0	3.90	4.38	1.26	27.4
82365	15902663	311	28	0.21445E+09	950.4	959.9	293.2	962410141	118161
9999.0	9999.0	7789	258.9	31.4	-7.0	3.90	4.38	1.27	27.5
82365	15904663	320	28	0.21300E+09	917.7	926.8	344.4	955010085	77120

Рисунок 3.12 – Фрагмент представлення даних експерименту WATS (супутник DE 2).

Є ще одна особливість даних WATS, на яку необхідно зважати. Було умовлено, що додатній знак параметру швидкості V_y (горизонтальна поперечна до ходу супутника компонента швидкості) відповідає напрямку на схід. Тому при перетині областей географічних полюсів знак відліків швидкості штучно змінювався на протилежний. В зв'язку з цим, нами створено відповідну функцію, яка повертає значення V_y до напрямку вісі координат ОУ у просторі (вліво по ходу супутника), незалежно від географічного положення супутника (Скороход і Лізунов 2016).

3.2.2 Узгодження даних приладів NACS і WATS

Щоб комбінувати дані різних приладів, необхідно їх узгодити за деяким спільним параметром. Таким параметром обрано універсальний час UT.

Алгоритм синхронізації даних наступний. На першому кроці досліджується вибірка даних приладу NACS, адже їх роздільна здатність краща. Як зазначалось вище, відліки мають розриви. Вибірка «неперервного» ряду відліків бралась до або після певної точки розриву з урахуванням того, що інтервал накопичення даних має містити не менше ніж 1500 відліків (ця обставина виникає із-за ряду обставин: техніки селекції ГХ, формату даних, масштабів самого процесу тощо).

Вибірка даних приладу WATS створюється таким чином, щоб потрапити до інтервалу накопичення даних приладу NACS. Оскільки семплінг даних WATS змінювався (2, 4 або 8 секунд), то наступним кроком було виділення «неперервного» інтервалу даних вже приладу WATS з певним періодом дискретизації. Далі вибраний інтервал піддавався ресемплінгу до періоду дискретизації 1 с, щоб спектри всіх виміряних параметрів можна було досліджувати в єдиному спектральному просторі.

Описане вище ґрунтується на роботах за участю автора дисертації (Лизунов и др. 2008; Ferencz et al. 2014; Скороход і Лізунов 2016; Скороход и Лизунов 2017).

3.2.3 Детрендування та фільтрація атмосферних параметрів

Кожен атмосферний параметр проходив однакові процедури детрендування та фільтрації. Зазначимо, що процес детрендування являє собою неявну фільтрацію, внаслідок чого втрачається певна частина потужності сигналу, незалежно від того, чи був тренд візуально помітний у вхідних даних (O , N_2 , He , Ar , V_y) чи ні (T , V_z). Так як в процесі спектрального оцінювання комбінуються параметри, що мали сильний тренд з параметрами, що майже його не мали, як перші, так і другі мають бути піддані спільній процедурі детрендування (Скороход и Лизунов 2017).

Далі в частотній області кожен параметр окремо фільтрується в межах, встановлених з теоретичних та експериментальних міркувань (підрозділ 2.2). Типово нижня межа встановлювалась на значенні спектрального відліку $k_{x\min} = 1/2500 \text{ км}^{-1}$, верхня – на $k_{x\max} = 1/100 \text{ км}^{-1}$.

3.2.4 Розрахунок δz та p

Для розрахунку вертикального зміщення атмосферних частинок δz та тиску p , необхідно використовувати синхронізовані ряди даних з обох приладів

NACS і WATS. Для цього створено окремі програмні функції, на вхід яких подаються ряди відліків $\delta(O)/(O)$, $\delta(N_2)/(N_2)$ (обчислені з експерименту NACS) та температури (виділеної з експерименту WATS), а на виході отримуються ряди δz та p .

Параметр вертикального зміщення δz обчислюється за виразом (3.10).

Параметр тиску p обчислюється за виразом (3.3).

По завершенню формується таблиці даних, в яку заносяться всі виміряні та обчислені атмосферні параметри та супроводжуючі їх метадані (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Дані повного набору атмосферних параметрів, необхідних для дослідження спектрального складу ГХ

UT, сек	$\delta(O)$	$\delta(N_2)$	δz	δV_y	δV_z	δT
26743	3.59e+6	5.80e+5	-4.62e+2	0,13	-0,32	8,25
26744	2.03e+6	8.29e+5	-4.82e+2	0,41	-0,90	23,65
26745	-6.12e+6	7.27e+5	-5.16e+2	0,80	-1,54	41,13
26746	-2.93e+6	-2.78e+5	-5.69e+2	1,17	-1,98	53,72
26747	4.03e+6	8.04e+5	-6.37e+2	1,37	-2,00	55,33
	...	...	...	...	...	...

3.2.5 Розрахунок повного спектрального складу ГХ

Аналіз параметрів, занесених у табл. 3.1, здійснюється в єдиному спектральному просторі (а саме, в просторі де частота нормована на частоту Брента-Вайсяля ω_g , а хвильовий вектор нормований на масштаб хвильових чисел k_g). Створено окрему функцію для визначення мінімумів амплітудного спектру, за допомогою якої окремо визначаються мінімуми спектральної потужності кожного параметру, а далі визначаються крос-мінімуми всіх параметрів разом (тобто близькі в певному інтервалі точки).

Спектри окремих параметрів виявились трішки різними, хоча з подальших обчислень видно, що вони представляють спільний процес. Ця різниця, імовірно виникає із-за того, що різні параметри оцифровувалися з різним періодом дискретизації, а отже, в процесі ресемплінгу, їх розподіли

інтерполуються по різному (ресемплінг не дає істинних значень параметру між відліками, а тільки деякий середній хід).

Процес розбиття хвильових форм на хвильові пакети описаний в [підрозділі 3.2.6](#). Тут задіяний оператор, який вручну підставляє набір крос-мінімумів і запускає процес, спостерігаючи за переміщенням точки на дисперсійній площині ([Лизунов и Скороход 2016](#); [Скороход и Лизунов 2017](#)).

Процес обчислення частоти (періоду) та хвильових чисел описаний в [підрозділах 3.2.3 та 3.2.4](#). Спектральні параметри розраховуються для індивідуального хвильового пакету окремо, таким чином, після обробки кожного орбітального витка на дисперсійній площині отримуємо від 2-х до 4-х фазових крапель ГХ, що показують наявність одночасно декількох різномасштабних хвильових процесів.

Останнім кроком є оцінка ширини спектрів та похибок хвильових параметрів ([підрозділ 3.2.7](#)).

На виході цього етапу робіт формується каталог хвильових подій ([Ferencz et al. 2014](#); [Скороход и Лизунов 2017](#)).

3.4 Висновки до розділу 3

Розділ 3 присвячений теоретичному розрахунку неспостережуваних параметрів ГХ – частоти ω та хвильових чисел k_y, k_z . Показано, що досі існуючий підхід до цієї задачі містить протиріччя, яке полягає в тому, що широкосмугові хвильові процеси трактуються як монохроматичні. До сьогодні цей факт цілком ігнорувався, і його нерозуміння призводило дослідників до помилок в оцінках параметрів ГХ.

Виділимо наступні отримані в цьому розділі результати:

1. Поставлено та розв'язано задачу визначення похибок вимірювання ГХ. Для цього аналіз похибок перенесений з просторово-часової в спектральну область. Встановлено, що реєстрація спектру k_x здійснюється з високим ступенем точності. Оцінка параметрів ω, k_y, k_z носить наближений характер з похибкою порядку півширини спектра хвильового процесу. Таким чином, дослідник має можливість отримати досить точну інформацію про розподіл інтенсивності хвильового поля вздовж орбіти супутника, і лише наближену інформацію про частоти, довжину хвилі, напрямки поширення, фазові і групові швидкості хвиль. Зазначені обмеження виникають з перших принципів і не можуть бути усунені завдяки «більш ретельній» обробці даних;

2. Розроблено евристичний алгоритм локалізації хвильового процесу у тривимірному фазовому просторі $\{k_x, k_y, k_z\}$ (або в еквівалентному просторі $\{\omega, k_x, k_y\}$). Встановлено, що енергія, як правило, концентрується в кількох фазових «краплях» – хвильових пакетах. Поділ хвильового процесу на складові хвильові пакети дозволяє приписати останнім такі фізичні характеристики як середня (несуча) частота і хвильовий вектор, напрямок поширення, групова швидкість, а також виміряти їх енергію і потік енергії.

3. Вирішено задачу розділення часових і просторових варіацій хвильового поля вздовж орбіти супутника шляхом належного коригування спектру спостережених хвильових чисел k_x .

4. Розроблено архітектуру, алгоритмічне і програмне забезпечення комплексу автоматичної обробки супутникових вимірів. Програмний комплекс реалізований в середовищі Matlab.

РОЗДІЛ 4.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЯ ГХ У ВЕРХНІЙ ТЕРМОСФЕРІ

4.1 Вступ

Дані спостережень і теоретичні оцінки свідчать про те, що ГХ відіграють важливу роль у формуванні енергетичного балансу і картини циркуляції термосфери, а також виступають агентом динамічного зв'язку іоносфери з нижче розташованими шарами нейтральної атмосфери. Постійно діючими джерелами ГХ в космосі є процеси нагрівання і руху газу в полярних сійвах і різноманітні приземні джерела, такі як грозова конвекція, виверження вулканів, землетруси і цунамі, старти важких ракет, інші природні і техногенні чинники.

Оригінальний комплексний підхід до обробки супутникових вимірювань, що був розвинений в даному дисертаційному дослідженні (розділи 2 і 3), відкриває можливість кількісної діагностики хвильової активності термосфери. Нижченаведений матеріал є продуктом застосування зазначеного комплексного методу до аналізу даних супутника DE 2.

Розділ 4 окрім вступу і висновку складається з чотирьох основних підрозділів. У [підрозділі 4.2](#) досліджено повний спектральний склад ГХ. В цій частині дисертаційне дослідження є цілком оригінальним і не має аналогів в роботах інших авторів. [Підрозділ 4.3](#) присвячений дослідженню геопросторової структури поля ГХ, до сих пір задокументованої узагальнено в загальнопланетарному масштабі ([Potter et al. 1976](#); [Hedin and Mayr 1987](#)). В [підрозділі 4.4](#) представлений аналіз зв'язку термосферних ГХ з приземними джерелами енерговиділення. В [підрозділі 4.5](#) проведено кількісне вимірювання енергетичних характеристик ГХ. Показано, що у підтвердження існуючих непрямих оцінок ([Маров и Колисниченко 1987](#)) ГХ є одним з основних факторів формування енергетичного бюджету термосфери.

Матеріали розділу 4 ґрунтуються на публікаціях (Лизунов и Скороход 2010; Скороход 2011; Скороход и Лизунов 2012; Лизунов и др. 2013; Ferencz et al. 2014, Скороход и Лизунов 2015, Лизунов и Скороход 2016, Скороход и Лизунов 2016, Скороход и Лизунов 2017).

4.2 Спектр хвильового поля

Результати обробки супутникових спостережень зберігаються у каталозі ГХ (додаток В), який поповнюється по мірі обробки нових порцій даних. Витяг з каталогу представлений в табл. 4.1. Щоб уможливити зіставлення хвильових подій, зафіксованих при різних атмосферних умовах, наведено нормовані спектральні параметри подій: $w = \omega / \omega_g$, $q = k / k_g$. Розташування хвиль на дисперсійній площині показано на рис. 4.1. Ця вибірка даних є типовою; аналогічні спектри спостерігаються на інших орбітальних витках DE 2 і на інших супутниках.

Таблиця 4.1 – Параметри хвильових подій, виділених за даними п'яти орбітальних витків вимірювань на супутнику DE 2. У стовпчиках вказані: номер події, дата реєстрації (рік – день в році), номер орбітального витка, частота Брента – Вайсяля ω_g (с⁻¹), хвильовий масштаб k_g (км⁻¹), несуча довжина хвилі вздовж орбіти супутника λ_{x0} (км), нормовані хвильові числа $q_{x0} = k_{x0} / k_g$, $q_{y0} = k_{y0} / k_g$, $q_{z0} = k_{z0} / k_g$, півширина спектра хвильових чисел $\Delta q_x = \Delta k_x / k_g$, несуча частота $w_0 = \omega_0 / \omega_g$, півширина спектра частот $\Delta w = \Delta \omega / \omega_g$.

№	Year – Day	Orbit	ω_g	k_g	λ_{x0}	q_{x0}	q_{y0}	q_{z0}	Δq_x	w_0	Δw
1-1	1982 – 327	7202	0.0070	0.0063	1063	0.94	0.19	2.70	0.22	0.31	0.22
1-2					473	2.11	0.33	4.15	0.95	0.45	0.18
1-3					217	4.59	0.43	9.82	1.52	0.42	0.13
2-1	1982 – 364	7771	0.0085	0.0093	980	0.69	2.41	4.27	0.31	0.49	0.07
2-2					391	1.73	1.86	1.31	0.72	0.84	0.13
2-3					202	3.34	3.91	3.9i	0.89	1.49	0.02
3-1	1982 – 365	7789	0.0086	0.0094	1383	0.48	0.44	2.98	0.16	0.20	0.16
3-2					611	1.10	0.34	1.67	0.45	0.51	0.19
3-3					301	2.21	0.39	0.95i	0.67	0.99	0.05
4-1	1982 – 365	7791	0.0086	0.0095	1168	0.57	0.21	3.46	0.18	0.16	0.18
4-2					542	1.22	0.46	2.25	0.47	0.47	0.16
4-3					287	2.31	0.39	1.85	0.61	0.74	0.13
5-1	1983 – 005	7874	0.0085	0.0093	1324	0.51	0.32	1.8	0.16	0.29	0.16
5-2					544	1.24	0.78	0.6	0.58	0.78	0.14
5-3					275	2.46	0.68	1.7i	0.65	1.21	0.03

Як слідує з [табл. 4.1](#), 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 в каталозі вказана подвійна нумерація подій: перша цифра показує приналежність хвильового пакета до певної групи, друга – нумерує пакети в ній. В даному прикладі хвильові процеси містять по три хвильових пакета. В дійсності складових пакетів може бути більше, але метод аналізу, що застосовується, дозволяє виділити лише декілька найбільш інтенсивних з них.

На [рис. 4.1](#) експериментальні точки заповнюють фазовий простір згідно теорії атмосферних хвиль ([Hines 1960](#)), що слід розглядати як пряме підтвердження теорії і, більш широко, як доказ застосовності класичного гідродинамічного підходу до опису динаміки термосфери на масштабах ГХ.

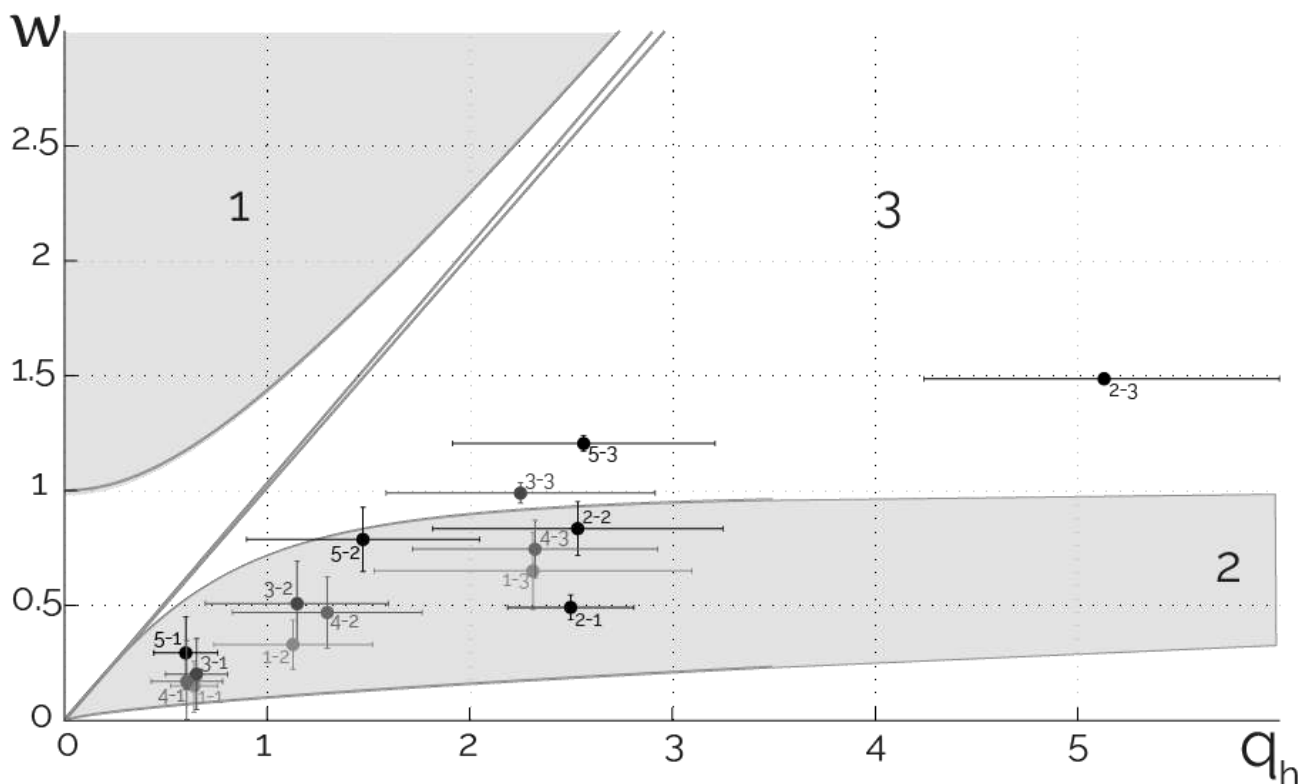


Рисунок 4.1 – Розташування хвильових пакетів ГХ на дисперсійній площині. 1 – область акустичних мод, 2 – область гравітаційних мод, 3 – заборонена область. По осям відкладені нормоване горизонтальне хвильове число $q_h = k_h / k_g$ і нормована частота $w = \omega / \omega_g$. Вказані несучі значення параметрів q_{h0}, w_0 і похибки визначення несучих (вуса). Вперше опубліковано в роботі автора ([Скороход и Лизунов 2017](#)).

У фрагменті даних, виведених на [рис. 4.1](#), 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 забороненій області. Математично це означає, що їх вертикальні хвильові числа уявні: $q_z^2 < 0$. Ми трактуємо зазначені точки як сигнатури дактованих (поверхневих) термосферних мод, відомих з теоретичних робіт ([Thome 1968](#); [Francis 1975](#); [Mayr et al. 1990](#)). Більше того, параметри цих хвиль близькі до теоретичних характеристик мод G_0, G_1 з роботи ([Francis 1975](#)) (див. [рис. 4.2](#)).

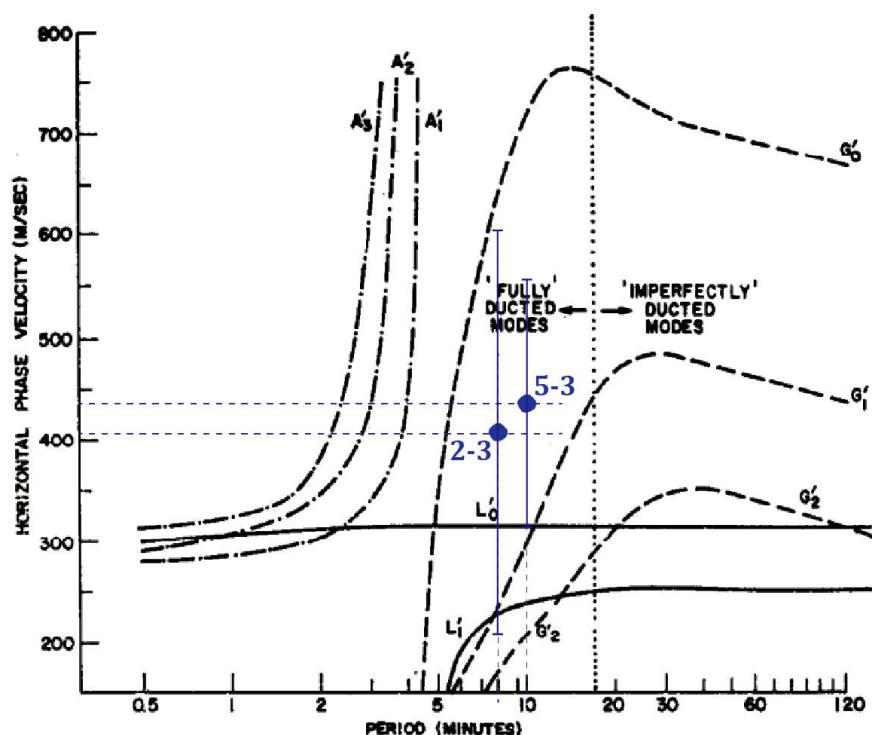


Рисунок 4.2 – Порівняння спостережених параметрів хвильових збурень з теорією. Показана дисперсійна картинка дактованих термосферних мод з роботи ([Francis 1975](#)) і розташування на ній хвильових пакетів 2-3, 5-3.

Згідно даним, наведеним у [табл. 4.1](#), абсолютні довжини хвиль у хвильових пакетах становлять $2\pi/k = 200...400$ км. Це далекосяжний результат, який свідчить про те, що класичний поділ ГХ на середньо- і великомасштабні ГХ виникає не тому, що відрізняються довжини хвиль збурень, а тому що хвильові пакети ГХ поширюються під різними кутами до вертикалі, демонструючи спостерігачеві різні горизонтальні проекції хвильового вектора k_h . Більше того, з теоретичної точки зору всі події зареєстровані у [табл. 4.1](#) відносяться до короткохвильової області $k > k_g$, коли справедливе наближене дисперсійне рівняння ГХ $\omega = \omega_g k_h / k$, введене Хайнсом для опису РІЗ ([Hines 1960](#)).

Отримані результати дозволяють спростувати ряд тверджень про властивості ГХ, які висловлюються в дискусіях та зустрічаються в публікаціях ([Фаткуллин и др. 1984](#); [Johnson et al. 1995](#) тощо):

1. Твердження, що поширення ГХ відбувається з виділеною горизонтальною довжиною хвилі $\lambda_h = 500...600$ км, що невірно відразу з двох причин. По-перше, ГХ є широкосмуговими, з масштабами горизонтальних довжин хвиль від декількох сотень до декількох тисяч кілометрів. По-друге, розташування максимумів в просторових спектрах хвиль варіюється від спостереження до спостереження, без прив'язки до виділеного значення k_h ;

2. Твердження, що «внутрішньою» частотою ГХ є частота Брента – Вайсяля (тобто частотою в системі відліку вітру). Такі ж заперечення.

В цілому поле ГХ не демонструє певної резонансної структури просторових і часових спектрів. Спостерігається мінлива картина хвильової активності, що виникає як суперпозиція хвильових пакетів, які поширюються в різних напрямках і можливо генеруються різними джерелами. У верхній термосфері ГХ вірогідно є лінійними або слабонелінійними. На користь останнього твердження свідчать як малі амплітуди хвиль (див. далі), так і відсутність ознак нелінійності в їх спектрах і скалограмах.

4.3 Геопросторовий розподіл хвильового поля

4.3.1 Глобальна структура ГХ

Планетарний розподіл ГХ досліджувався раніше в роботах (Potter et al. 1976; Hedin and Mayr 1987) за даними супутників АЕ-С та DE 2. Застосовувалась відносно проста, але ефективна методика оцінки амплітуди хвильових збурень. Спочатку за допомогою фільтру ковзаючого середнього проводилось грубе відокремлення трендової та збуреної складових густини атмосфери: $\bar{\rho}$ і $\delta\rho$. Потім на масштабі порядку 1000 км обчислювалась стандартна девіація $(\delta\rho(x)/\bar{\rho}(x))_{\text{rms}}$. На наступному кроці формувався розподіл параметру девіації вздовж орбіти супутника і вивчався геопросторовий розподіл цього параметру.

Було встановлено, що в глобальному масштабі виділяються сильно збурені високоширотні зони, де відносні амплітуди збурень сягають $\delta\rho/\bar{\rho} \sim 0.1...0.3$, і спокійна низькоширотна зона, де амплітуди падають нижче порога виявлення. Метою даного дисертаційного дослідження є детальне кількісне вивчення геопросторової структури хвильового поля.

На рис. 4.3 показана географічна прив'язка хвилі 1 з табл. 4.1. Зображено сумарну хвильову форму (до розбиття на складові пакети), відкладену вздовж орбіти супутника та нанесену на географічну мапу. Показані положення аврорального овалу і сонячного термінатора. В даному прикладі супутник рухається в поясі місцевого часу 4 години ранку – 4 години ночі.

Примітка. Тут і далі конфігурація аврорального овалу в період проведення вимірювань визначається ретроспективно, виходячи з уявлень про зв'язок форми овалу з рівнем геомагнітної активності (Feldstein and Starkov 1967; Bond and Thomas 1971). У теперішній час авроральні овали Землі спостерігаються з високоорбітальних супутників в моніторинговому режимі, але в 1983 р. такої можливості не було.

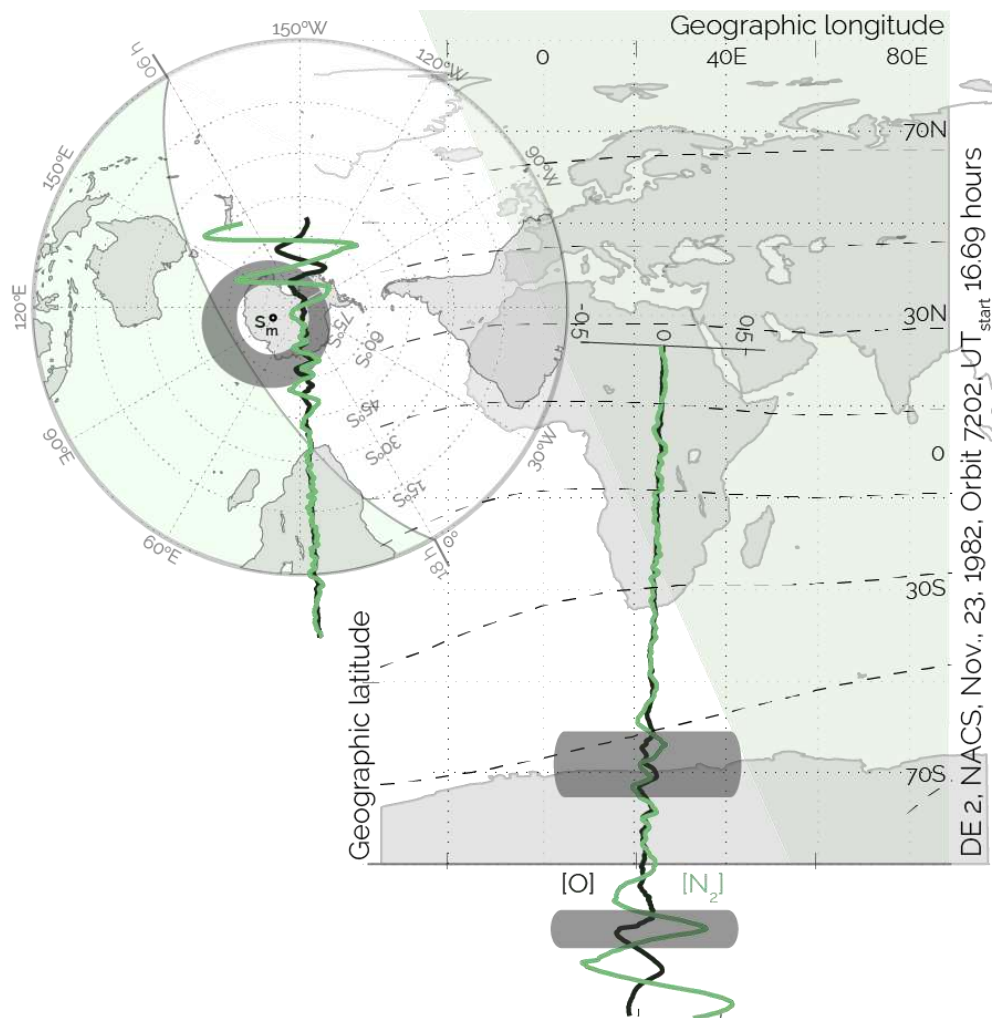


Рисунок 4.3 – Геопросторова прив'язка [хвилі 1](#) з каталогу ГХ. Хвильові форми коливань густини основних газових компонент [O] і [N₂] нанесені вздовж орбіти супутника, який рухається приблизно в меридіональному напрямку. Темно-сіра область відображає поточне положення аврорального овалу, світло-сіра – нічну сторону Землі. Пунктирною лінією відмічено геомагнітні широти. Точка S_m – північний магнітний полюс.

Хвильову форму на [рис. 4.3](#) слід розглядати як практично миттєвий меридіональний зріз (широтний розподіл) поля ГХ. Подібні хвильові епюри реєструються при інших значеннях довгот та місцевого часу ([рис. 4.4](#)). Можна бачити, що в планетарному розподілі ГХ виділяються активні високоширотні області, де термосфера сильно збурена, та відносно спокійна низькоширотна область. Умовна межа спокійної та активної області проходить на геомагнітних широтах $\varphi \sim 40...50^\circ$ (для південної півсфери – $\varphi \sim -40...50^\circ$). Дана картина не є стаціонарною. Розподіл сплесків хвиль в активних областях та в спокійній області, умовні лінії меж цих областей «дихають», змінюючись від

спостереження до спостереження. На денній стороні межі областей проходять дещо вище по широті, ніж на нічній. Параметри активних областей виявляють кореляцію з індексами AE та Kp: з ростом геомагнітної активності активні зони розростаються вниз по широті, а інтенсивність хвильового поля в них збільшується (Richmond and Matsushita 1975; Prolss 1993; Fuller-Rowell et al. 1994; Sauli and Boska 2001; Лизунов и Скороход 2010). Оскільки меркаторівська проекція спотворює пропорції між високо- та низькоширотними регіонами, слід зазначити, що область спокійної термосфери займає $\sim 70\%$, а обох активних областей $\sim 30\%$ поверхні планети. Представлені в цій частині результати загалом узгоджуються з даними зазначених вище піонерських робіт з аналізом супутникових спостережень ГХ (Potter et al. 1976; Hedin and Mayr 1987).

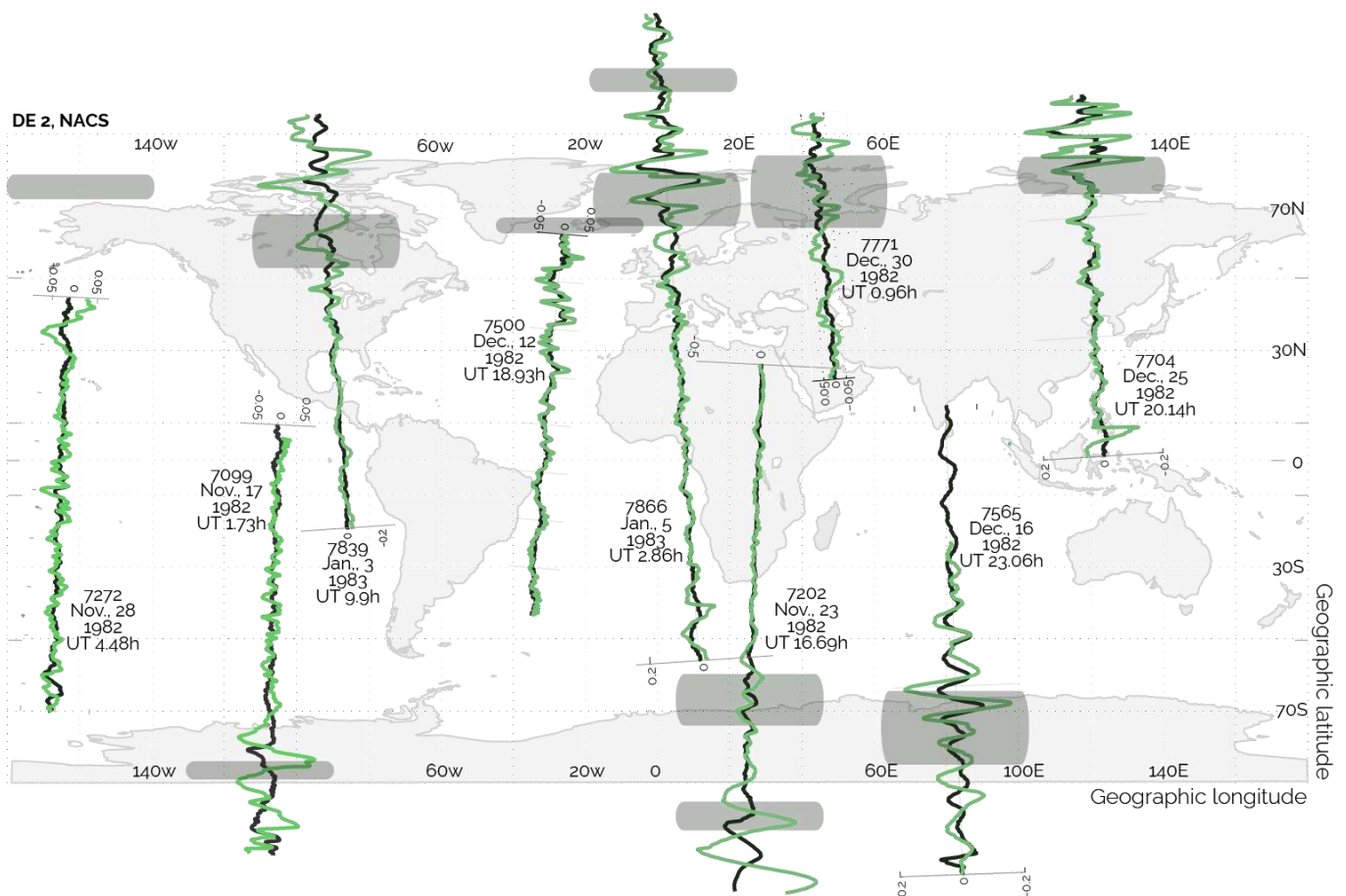


Рисунок 4.4 – Візуалізація набору хвильових форм з каталогу ГХ. Темно-сірими областями показано поточні положення авроральних зон. Перша аналогічна візуалізація опублікована в роботі автора (Лизунов и Скороход 2010)

Коментар. Інтерпретацію [рис. 4.4](#) слід проводити з певною обережністю. Наведені на рисунку експериментальні епюри отримані в різні періоди часу, в різних геліофізичних та геомагнітних умовах. Тобто, картина хвиль на [рис. 4.4](#) не є одномоментним розподілом хвильового поля термосфери, хоча і створює про нього загальне уявлення.

Фізика формування активних областей цілком очевидна. В планетарному масштабі найпотужніші джерела генерації ГХ зосереджені в зонах авроральних овалів, включаючи області проекції магнітосферних каспів на атмосферу. Такими джерелами є:

- Пучки енергетичних заряджених частинок, які викликають нагрівання стовпів атмосфери на висотах $\sim 100\text{--}150$ км. Внаслідок нестационарного та плямоподібного розподілу висипань частинок, утворюються різкі перепади тиску, що призводить до генерації широкого спектра атмосферних коливань;
- Магнітосферно-іоносферні струмові системи, які так само носять нерегулярний пульсуючий характер. Замикання поздовжніх магнітосферних струмів здійснюється горизонтальними струмами, локалізованими в динамо-області іоносфери на висотах $\sim 100\text{--}150$ км, приблизно там же, де відбувається поглинання пучків енергійних частинок. Генерація ГХ за цим механізмом обумовлена джоулевим нагріванням атмосфери, а також одночасною дією сили Ампера на атмосферно-іоносферне середовище.

Від зон генерації в авроральних овалах ГХ поширюються вгору по широті, цілком заповнюючи полярні шапки, і в екваторіальному напрямі аж до середніх широт, де ці хвилі остаточно дисипують. Таким чином формується активна зона, збурення якої настільки велике, що вкрай ускладнює, або робить в цій зоні неможливою реєстрацію ГХ від приземних джерел. Хвильові збурення в спокійній зоні, навпроти, слід в першу чергу пов'язувати з приземними джерелами.

4.3.2 Просторова локалізація хвильових пакетів

Перейдемо до аналізу хвильових пакетів, що складають хвильову форму ГХ. В якості параметра, який характеризуватиме хвилю, виберемо відносну варіацію густини атмосфери $\delta\rho/\rho$.

На [рис. 4.5](#) представлено розкладання хвилі [1](#) з [табл. 4.1](#) на складові різних частот. Наведене розкладання є точним в тому сенсі, що хвильова форма [1](#) є сумою хвильових форм [1-1](#), [1-2](#) і [1-3](#). Слідуючи загальному теоретичному підходу даного дисертаційного дослідження, виділимо в хвильовому пакеті обвідну та осцилюючу компоненти:

$$\frac{\delta\rho(x)}{\rho(x)} = a(x) \cdot \cos(-ik_{x0}x + \varphi(x)), \quad (4.1)$$

де a – амплітуда хвилі «по відносному збуренню густини», k_{x0} – несуча, φ – фаза.

Селекцію обвідної $a = a(x)$ здійснюємо автоматизовано, з використанням перетворення Гільберта. Перетворення Гільберта ставить сигналу [\(4.1\)](#) у відповідність комплексний сигнал виду $a(x)\exp(i\varphi) \cdot \exp(-ik_{x0}x)$, після чого параметр амплітуди обчислюється як модуль комплексного сигналу ([Сергиенко 2006; Лайонс 2006](#)). В середовищі MATLAB перетворення Гільберта реалізоване у вигляді стандартної функції.

[Рис. 4.5](#) показує, що пакети ГХ сильно модульовані в просторі. Фактично, кожен пакет розпадається на кілька ізольованих імпульсів або сплесків хвиль, які, в свою чергу, складаються з трьох – шести періодів коливань загальною тривалістю близько кількох тисяч кілометрів. Можна припустити, що орбіта супутника послідовно перетинає промені поширення ГХ від різних джерел (скажімо тих, що приходять від різних сегментів аврорального овалу). На користь останнього припущення говорить і той факт, що на різних ділянках орбітального витка хвильові збурення демонструють різний порядок

чергування коливань газових компонент, а значить і різні напрямки поширення ГХ по відношенню до напрямку руху супутника.

Щоб детальніше вивчити ці питання, проаналізуємо спектр кожного хвильового імпульсу ГХ окремо. З цією метою зменшимо інтервал накопичення даних L до розмірів одного імпульсу (від мінімуму до мінімуму обвідної) і заново перерахуємо спектр даних.

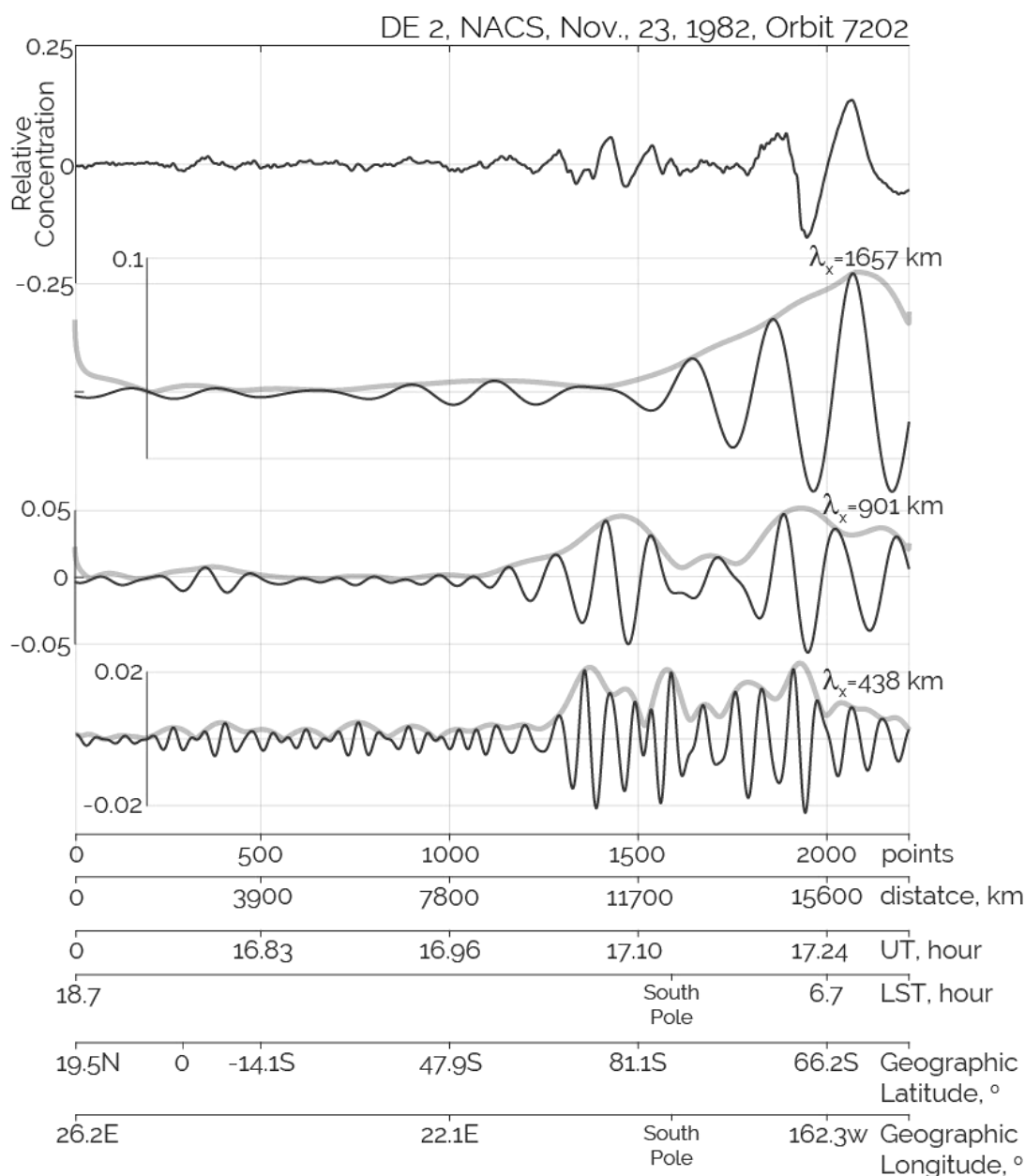


Рисунок 4.5 – Розбиття хвилі 1 з каталогу ГХ на хвильові пакети 1-1, 1-2 і 1-3. Обвідні хвильових пакетів побудовані з використанням перетворення Гільберта.

Звуження інтервалу L призводить до додаткового розтікання спектра даних і пов'язаного з цим зменшення точності спектральних оцінок. Рис. 4.6 ілюструє розрахунок спектрального складу імпульсів пакета 1-2. Показані хвильові форми окремих імпульсів ГХ (I, II і III), їх просторові спектри і розташування в фазовому просторі. Можна побачити, що ціною певного розтікання в порівнянні зі спектром вихідного сигналу 1-2 (розрахованого на всій довжині сеансу вимірювань) ми досягли розділення спектрів індивідуальних імпульсів.

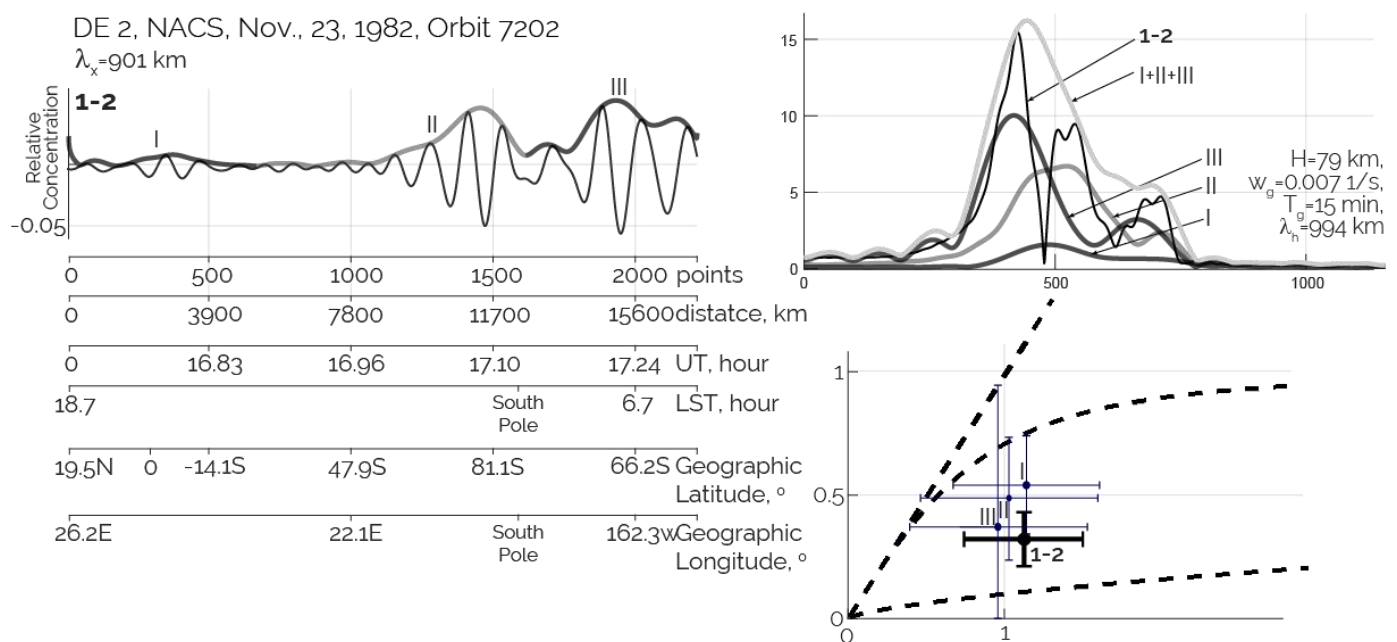


Рисунок 4.6 – До розрахунку спектра імпульсів ГХ. Зліва: хвильова форма пакета 1-2 з каталогу ГХ. Виділені послідовні імпульси I, II, III. Справа вгорі: амплітудні спектри імпульсів (криві I, II, III), їх сума (I+II+III), і спектр хвильового пакета в цілому (крива 1-2). Справа внизу: розташування хвильових збурень на дисперсійній площині.

Рис. 4.7 демонструє геопросторову прив'язку хвильових пакетів 1-1, 1-2, 1-3. Зображено розподіл обвідних хвильових пакетів $a = a(x)$ (без несучої) і розраховані напрямки руху імпульсів ГХ. В порівнянні з вихідним рис. 4.3, рис. 4.7 розкриває динаміку хвильового поля.

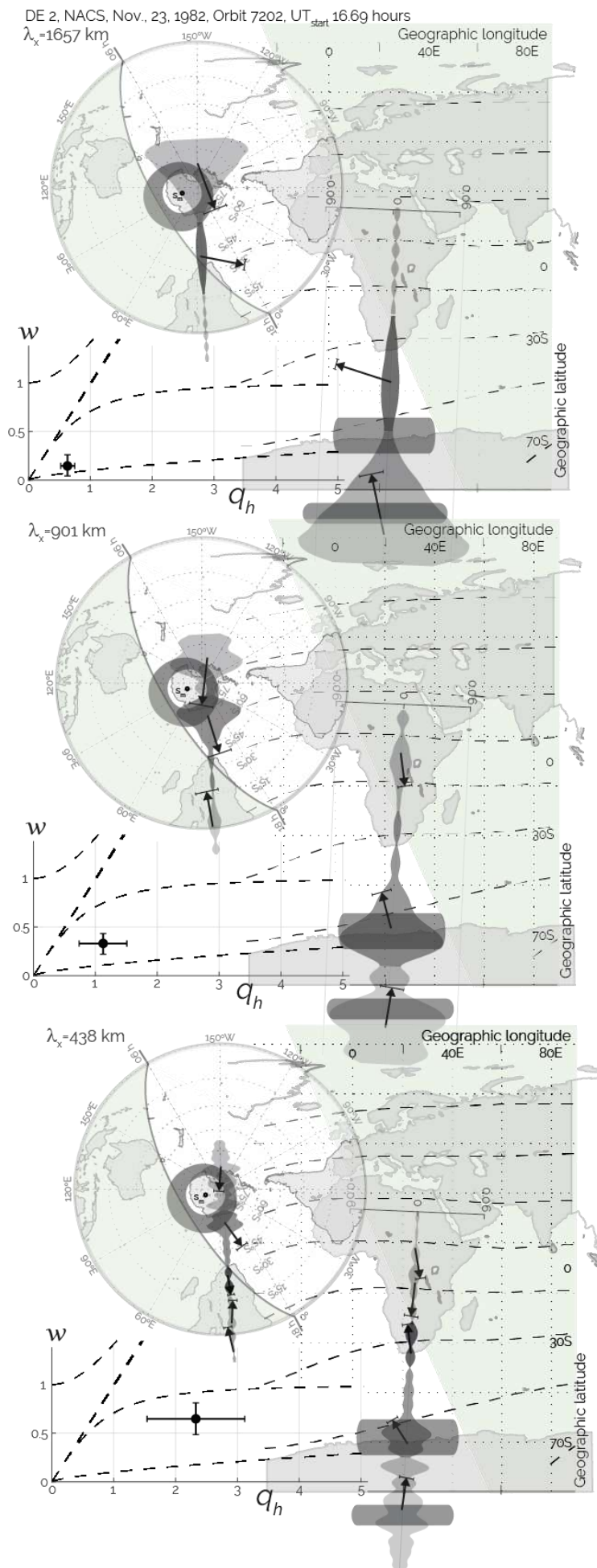


Рисунок 4.7 – Геопросторовий розподіл хвильових пакетів 1-1 (вгорі), 1-2 (в центрі) і 1-3 (знизу). Вздовж орбіти супутника відкладені форми обвідних хвильових пакетів без високочастотного наповнення. Окремі імпульси (сплески) ГХ залиті різними відтінками сірого кольору. Вказані напрямки горизонтального поширення імпульсів (стрілки) і похибки визначення напрямків поширення (вуса). На карту Землі нанесені зони авроральних овалів і ізолінії нахилу геомагнітного поля.

Підкреслимо наступні характерні риси поля ГХ:

1. Переважає меридіональна компонента поширення ГХ, що узгоджується з уявленням про те, що основна генерація ГХ відбувається в зонах авроральних овалів;

2. В активних областях має місце невелике неспівпадіння локалізації сплесків інтенсивності ГХ з положеннями аврорального овалу. На наш погляд, це пояснюється неточністю позиціонування зон полярних сьйв, яке в даній роботі здійснюється приблизно, виходячи з модельних міркувань;

3. Авроральні джерела випромінюють всі типи атмосферних хвиль: коротко- та середньомасштабні ГХ і дактовані моди (в ряді випадків також були ідентифіковані акустичні хвилі);

4. Від магнітного екватора в напрямку середніх широт поширюються ГХ малих та середніх масштабів. Їх генерація може бути обумовлена як динамікою екваторіальної іоносфери, так і приземними джерелами ГХ. В цілому картина, наведена на [рис. 4.7](#), створює простір для подальших інтерпретацій.

Можна зробити висновок про те, що «цеглинкою» структури поля ГХ є хвильові пакети, локалізовані як в спектральній області (навколо несучих значень частоти і хвильового вектора), так і в просторово-часовій області (три – п'ять – вісім періодів коливань). З порівняння [рис. 4.3](#) і [рис. 4.7](#) видно, що хвильові пакети різних частот накладаються один на одного, роблячи неможливою їх безпосередню селекцію у вихідній хвильовій формі ГХ.

4.3.3 Залежність від геомагнітної активності

В даному підрозділі представлено результати дослідження реакції термосфери на варіації геомагнітного поля ([Лизунов и Скороход 2010](#)).

Для спостереження обрано варіації K_p -індексу, як показника геомагнітної активності, та варіації амплітуди ГХ. Хвильові пакети ГХ розділено за географічною приналежністю на такі, що знаходяться в активній зоні та такі,

що знаходяться в спокійній зоні. Всього було опрацьовано чотири місяці спостережень супутника DE 2 (листопад 1982 р. – лютий 1983 р.). Результати представлені на [рис. 4.8](#). За вказаний період геомагнітна активність не перевищила значення $K_p = 6+$.

Згідно [рис. 4.8](#) зі збільшенням K_p -індексу амплітуда ГХ в полярних шапках зростає від кількох процентів збурення густини за умов малої геомагнітної активності до більше десяти процентів за умов високої геомагнітної активності. Середнє значення амплітуди ГХ спокійної зони складає біля 0,5% (незважаючи на мале значення параметру, це надійна оцінка, що лежить в межах динамічного діапазону вимірювальних приладів), і зі збільшенням геомагнітної активності лише трохи підвищується (окремі спорадичні структурні утворення спокійної зони розглядались як незалежний випадок і залежність від K_p -індексу не була виявлена).

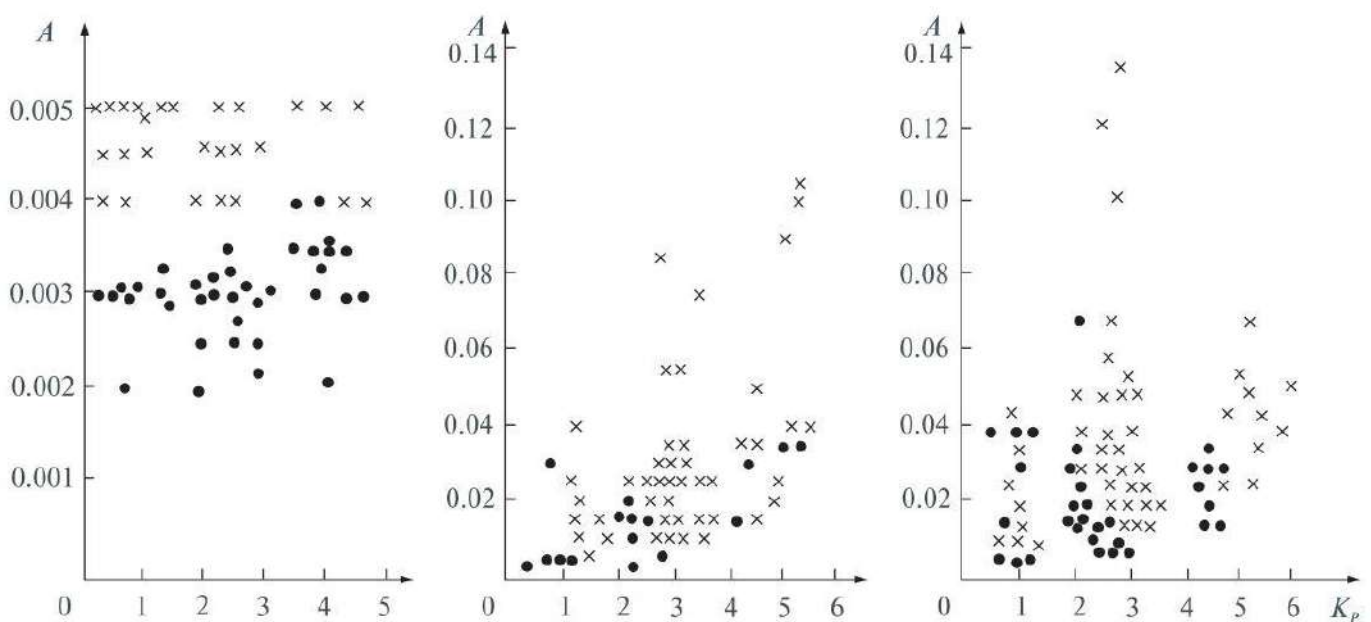


Рисунок 4.8 – Амплітуда обвідної хвильового пакета ГХ $A = \delta[O]/[O]$ в залежності від геомагнітної активності: зліва – в спокійній області; в середині – в південній активній області; справа – в північній активній області. Крапки – вимірювання на денній півкулі Землі, хрестики – нічний

4.4 Зв'язок термосферних ГХ з приземними джерелами енерговиділення

4.4.1 Загальні зауваження

Новим ключовим напрямком фізики іоносфери обіцяє стати вивчення відгуків іоносфери на впливи знизу. Гігантський масив даних свідчить про те, що в стані іоносфери локально відображаються приземні джерела енерговиділення: погодні явища (циклони, погодні фронти, грозова конвекція), техногенні чинники (запуски важких ракет-носіїв, ядерні та промислові вибухи тощо), тектонічні процеси (виверження вулканів, цунамі, землетруси і процеси підготовки землетрусів) (Francis 1975; Galperin and Hayakawa 1996; Черногор 1999; Ямпольский и др. 2004; Федоренко и др. 2005; Черногор 2009; Vadas et al. 2009; Rolland et al. 2011; Скороход 2011; Черногор 2012; Hayakawa 2012 тощо).

Природним агентом переносу збурень від приземних джерел на іоносферні висоти служать хвилі нейтральної атмосфери. В іоносфері коливання нейтрального газу генерують плазмові неоднорідності (рухомі іоносферні збурення) та магнітогідродинамічні збурення, що поширюються далі в магнітосферу. Реєстрація ГХ від приземних джерел, як фактора, який ініціює ансамбль наступних іоносферно-магнітосферних взаємодій, представляє значний науковий інтерес.

Необхідно зауважити, що низькоорбітальні супутники, вірогідно, є не найкращим майданчиком для проведення зазначених спостережень. Теорія поширення і дисипації ГХ вказує на важливу відмінність ефектів від космічних і приземних джерел ГХ (Лизунов и Леонтьев 2014 а; Лизунов и Леонтьев 2014 b). Джерела, розташовані в термосфері (наприклад, процеси, які супроводжують полярні саява), генерують ГХ, що заповнюють весь діапазон висот від поверхні землі до екзобазису. ГХ від джерел, що знаходяться на/біля поверхні землі, дисипують нижче 250 км. У цитованих роботах також встановлено, що при

перетині вітрових зсувів заломлення ГХ відбувається таким чином, що на зустрічному вітрі довжина хвилі збільшується, а затухання, будучи обернено пропорційним квадрату довжини хвилі, зменшується. Відповідно, висота проникнення хвиль в термосферу на зустрічному вітрі збільшується порівняно з наведеною оцінкою. На попутному вітрі відбувається навпаки. В силу цих причин ГХ від приземних джерел можуть досягати висот супутникових спостережень, але епізодично, в залежності від напрямку поширення ГХ по відношенню до напрямку циркуляції термосфери і від швидкості циркуляції.

В даному підрозділі представлено дослідження сплесків ГХ в спокійної області термосфери, спостережених на DE 2 в період листопад 1982 р. – лютий 1983 р. Всього виявлено 53 локалізованих інтенсивних сплески ГХ (додаток Г). На цій вибірці проведено дослідження вірогідних джерел ГХ.

4.4.2 Зв'язок із землетрусами і процесами підготовки землетрусів

На можливість зв'язку ГХ із потужними землетрусами вказано в роботах (Бучаченко и др.. 1996; Гайворонская 1996; Сорокин и Чмырев 2002 тощо) (за даними супутників AE-E і DE 2). Основну увагу приділено виявленню до-сейсмічних подій з метою їх використання в якості провісників землетрусів. Спостереження після-сейсмічних ГХ описані в роботі (Федоренко та ін. 2005) (за даними AE-E). Обґрунтування причинно-наслідкового зв'язків у вказаних роботах не наводилося. Єдиною ознакою виступала близькість сейсмічних та термосферних подій в просторі і часі.

Перейдемо до аналізу оригінальних результатів, отриманих автором дисертаційного дослідження (Скороход 2011; Лизунов и Скороход 2012; Ferencz et al. 2014). На рис. 4.9 показано географічне розташування сплесків ГХ з каталогу ГХ за період листопад 1982 р. – лютий 1983 р. і розташування епіцентрів землетрусів, які відбулись за цей час. Можна бачити, що області локалізації сплесків ГХ в основному близькі до сейсмоактивних районів. А якщо

врахувати, що в процесі поширення ГХ зміщуються по горизонталі на тисячі кілометрів від джерела, можна припустити, що ці сплески викликані саме землетрусами. Для перевірки даного припущення було застосовано метод накладення епох – потужний статистичний інструмент, що дозволяє розпізнавати причинно-наслідкові зв'язки на фоні сильних завад. Множину землетрусів, які могли бути джерелами ГХ, обмежимо умовами:

магнітуда $M > 5$,

глибина гіпоцентру $D < 100$ км

(що в галузі сейсмо-іоносферних досліджень є загальноприйнятими припущеннями). Всього за досліджуваний період відбулося більше сотні таких землетрусів. Параметри землетрусів бралися з бази даних «U.S. Geological Survey».

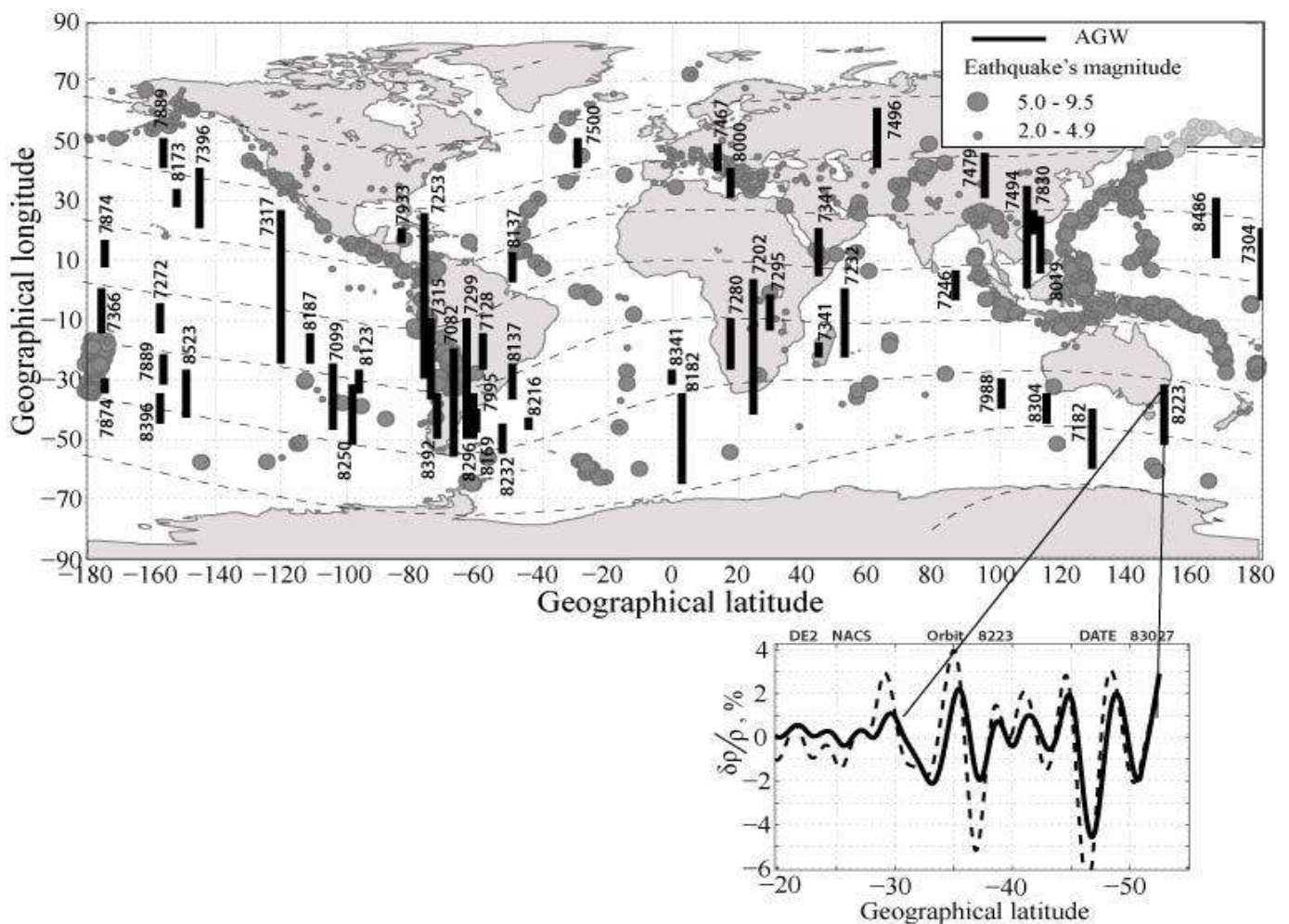


Рисунок 4.9 – Географічне розташування сплесків ГХ (суцільні риси) і землетрусів (кружечки) за період листопад 1982 р. – лютий 1983 р.

На [рис. 4.10](#) представлена причинно-наслідкова діаграма, на якій всі землетруси поміщені в початок відліку діаграми, а сплески ГХ зображені по відношенню до них в системі координат «час – відстань». Досліджено просторово-часове вікно до 4500 км від епіцентрів землетрусів, ± 12 год. від головного поштовху. В області від'ємних часів ГХ виступають провісниками землетрусів, в області додатних часів – відгуками. Також на [рис. 4.10](#) показано надзвуковий конус, усередині якого причинно-наслідковий зв'язок приземних і термосферних збурень фізично неможливий.

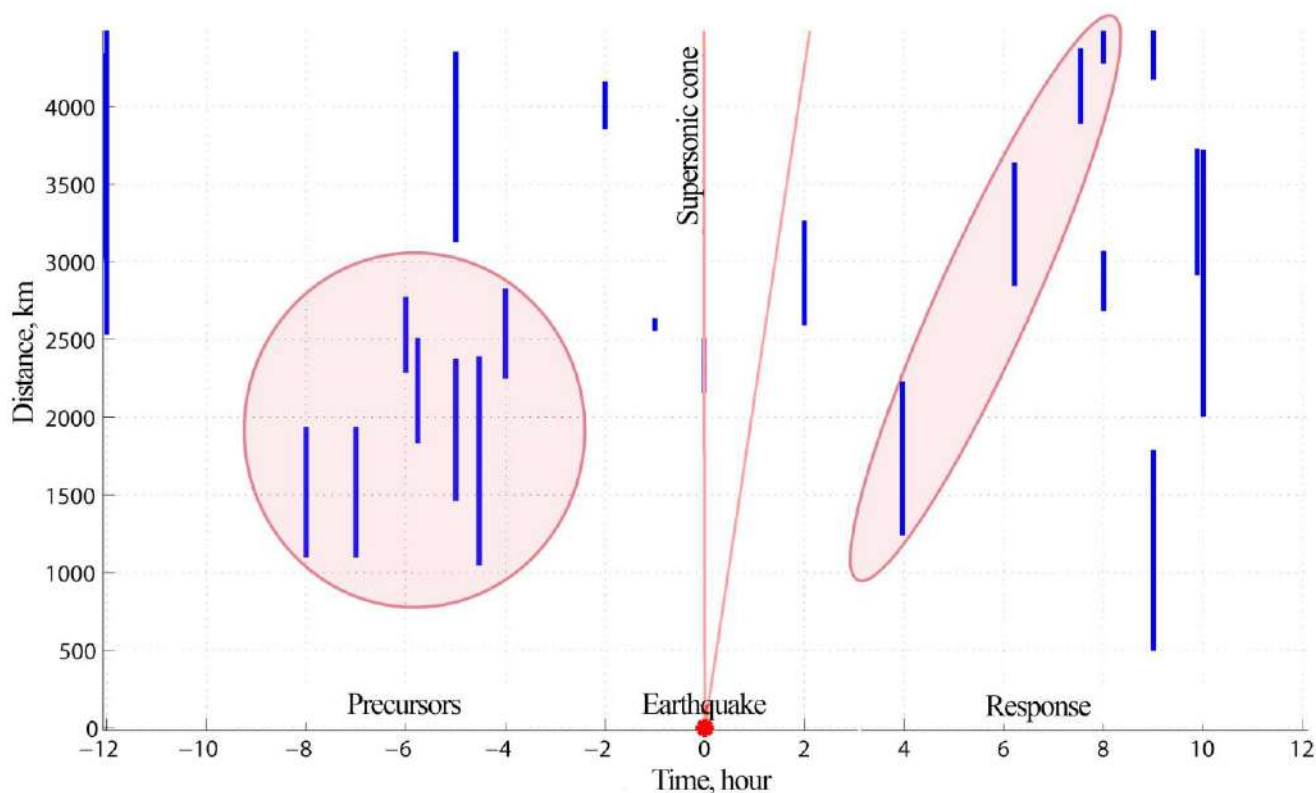


Рисунок 4.10 – Діаграма причинно-наслідкових зв'язків між землетрусами і хвильовими пакетами ГХ

Можна бачити, що в області провісників виділилася група сплесків ГХ (–8...–4 годин). Уточнення цього результату на більшій статистиці є предметом подальших досліджень. В області відгуків можна виділити серію сплесків, що утворюють послідовність з певною швидкістю поширення. В іншому ж розташування хвильових пакетів на діаграмі не виявляє закономірності.

Очевидно, що вплив землетрусів на іоносферу занадто складне явище, щоб аналізувати його з використанням лише таких загальних параметрів таких як магнітуда і глибина гіпоцентру землетрусу. Фізика генерації і поширення ГХ від землетрусу (а в разі його провісника – від процесу підготовки землетрусу в літосфері), яка досі не відома, виступає як би фільтром, що локалізує область подій на діаграмі. Нарощуючи далі статистику спостережень і перебираючи критерії відбору землетрусів як джерел генерації ГХ, можна сподіватися візуалізувати область подій, і це стало б підказкою для подальшої розробки теорії сейсмо-іоносферних зв'язків.

3.4.3 Інші джерела ГХ

Тропічні циклони. Багато робіт опубліковано на тему вивчення зв'язку тропосферних та іоносферних збурень (Дробязко и Красильников 1985; Гивишвили 1990; Черногор 2006; Бондур и др. 2008 тощо). Розглянемо тут можливий зв'язок локалізованих сплесків ГХ з каталогу ГХ (додаток Г) з тропічними циклонами (ТЦ), що досягли фази урагану (тайфуну, циклону), тобто зі швидкостями вітру більше 120 км/год. Зв'язок ГХ і ТЦ вже досліджувався в роботах (Saul and Boska 2001; Бурмака и др. 2006) тощо. На рис. 4.11 зображені траєкторії ходу всіх потужних ТЦ за період з 1 листопада 1982 до 15 лютого 1983 року (табл. 4.2). Кожен із зазначених ТЦ був вивчений окремо.

Підхід до пошуку зв'язку ГХ та ТЦ наступний. На карту наносилися траєкторії ТЦ, коли вони проходили фазу урагану і всі локалізовані сплески ГХ, які були виявлені не пізніше ніж через добу після ослаблення фази урагану ТЦ. Такий підхід показано на прикладі тайфуну № 27 (таблиця 4.2), траєкторія якого представлена на рис. 4.12. Можна помітити, що ГХ не пов'язані з тайфуном навіть візуально. За час життя тайфуну траса супутника покрила майже всю його траєкторію з інтервалом в 3°–5° географічної довготи

(приблизно 300–550 км). Орбітальні витки над тайфуном показані на [рис. 4.12](#) тонкими вертикальними лініями. Схожу ситуацію отримано з іншими ТЦ. Таким чином, зв'язок ТЦ і ГХ в даних супутникових спостережень не було підтверджено.

Таблиця 4.2. Тропічні циклони, які досягли ураганної сили в період з 1 листопада 1982 р. до 15 лютого 1983 р. (дані отримані з [Unisys Weather Data Center](#))

ТЦ	Геолокація ТЦ	Час життя ТЦ як урагану	Макс. швидкість вітру, км/год	Категорія
Тайфун №27	8°-13°N, 168°-158°E	26-29. 11.1982	185	3
Циклон №7	17°-21°S, 118°-121°E	8-9.01.1983	148	1
Циклон №8	15°-16°S, 41°-40°E	12.01.1983	120	1
Циклон №10	15°-18°S, 174°-173°E	25-26.01.1983	148	1

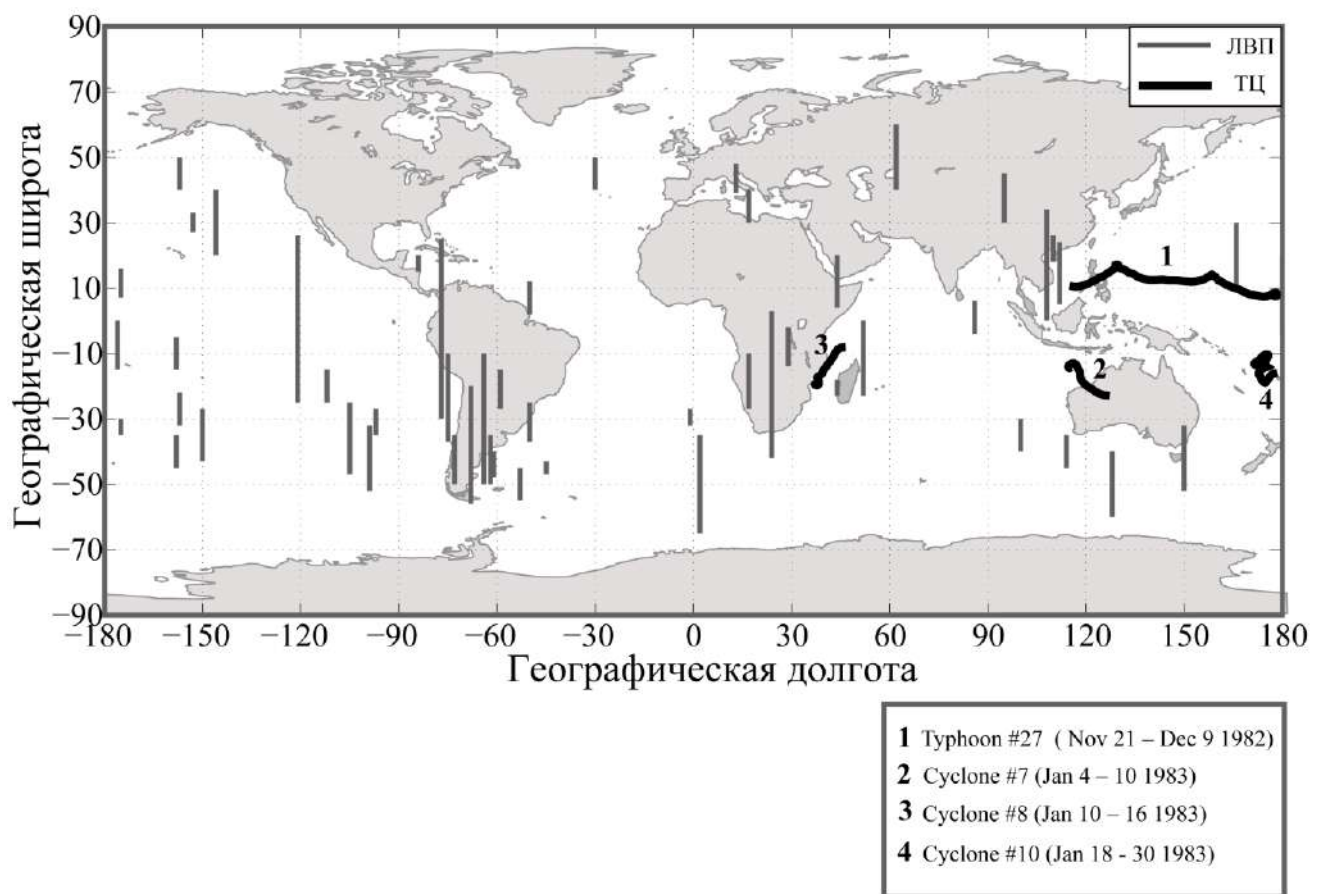


Рисунок 4.11 – Траєкторії руху ТЦ на фоні планетарного розподілу сплесків ГХ

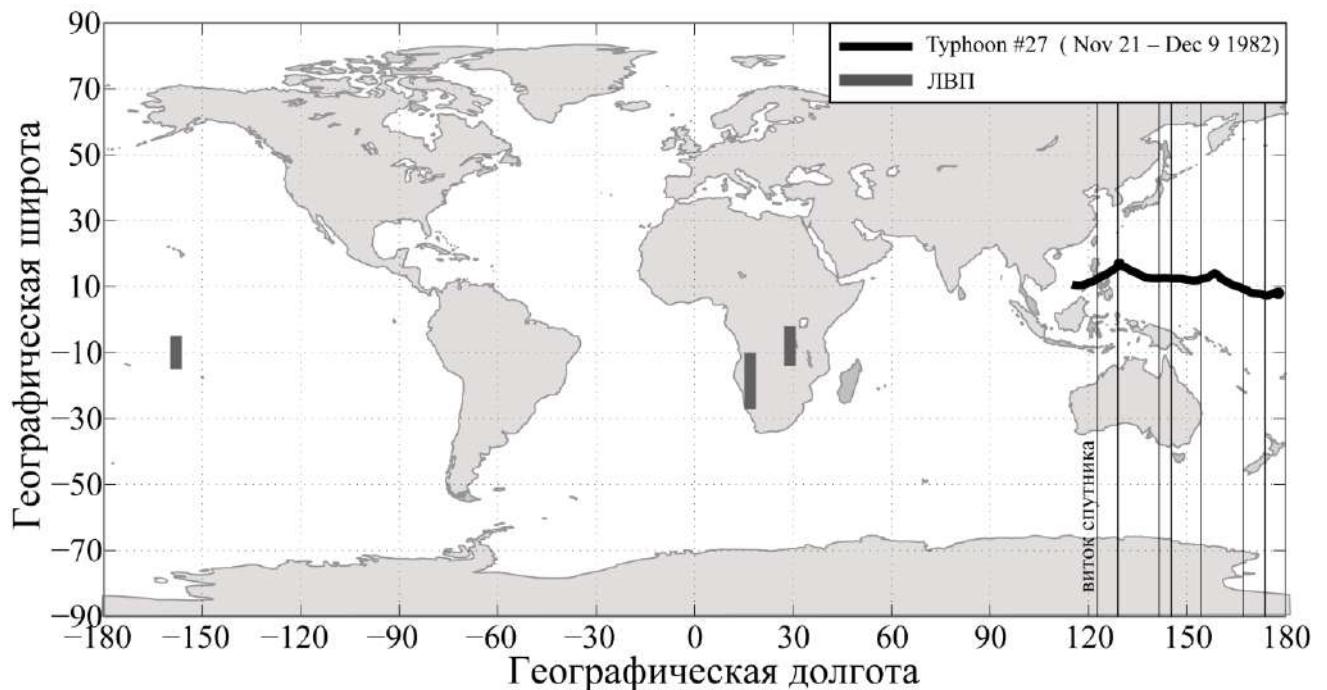


Рисунок 4.12 – Траєкторія руху тайфуну третьої категорії, орбітальні витки супутника DE 2 над тайфуном та сплески ГХ, виділені в ці дні

Запуски ракет. Мотивацією для дослідження зв'язку ГХ із запусками ракет стала велика кількість опублікованих на цю тему досліджень, де розглядаються одиночні події іоносферних збурень, як можливих відгуків на запуски ракет (Горелый и др. 1994; Бурмака и др. 2006; Черногор 2009).

На карту були нанесені місця розташування всіх космодромів, діючих в період 1982–1983 рр. (рис. 4.13 а). У відкритому доступі знайдені календарі запусків з трьох космодромів: Плесецьк, Байконур і Капустин Яр. За період листопад 1982 р. – лютий 1983 р. на вказаних космодромах було проведено 21 запуск. На рис. 4.13 б показані локалізовані сплески ГХ, що відбулись в інтервали часу від моменту запуску ракети до часу, не пізніше, ніж 12 годин після моменту запуску. Можна бачити, що і в цьому випадку навіть візуальний зв'язок відсутній.

Наведені в цьому підрозділі результати вперше опубліковані в роботах автора (Скореход і Лізунов 2011; Скореход 2011; Скореход и Лизунов 2012).

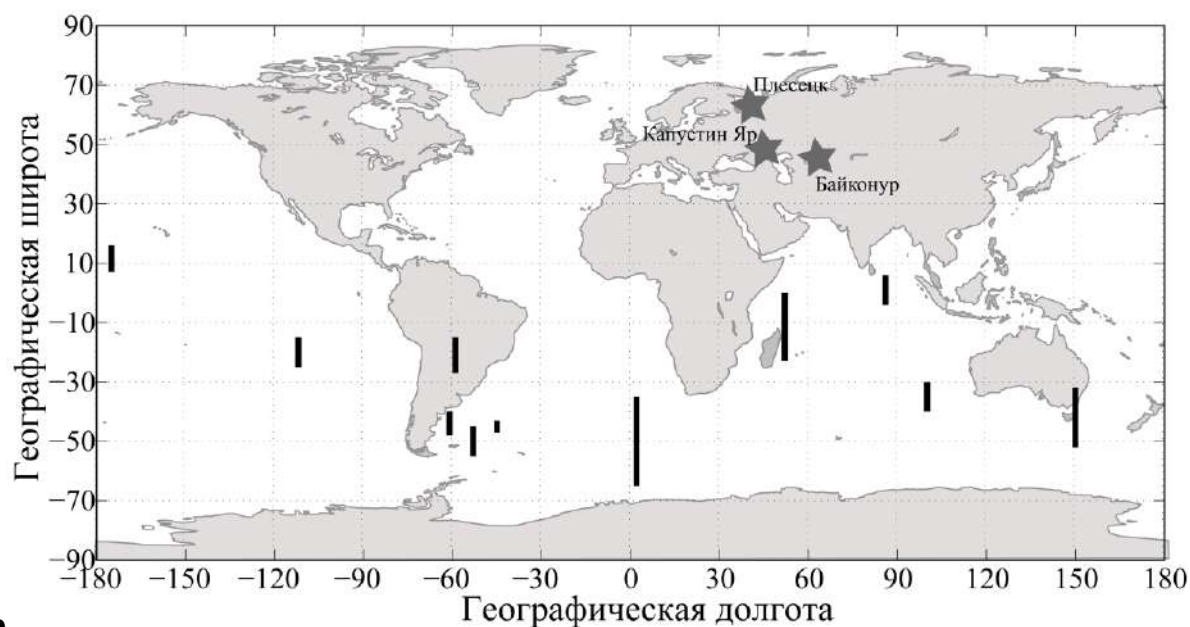
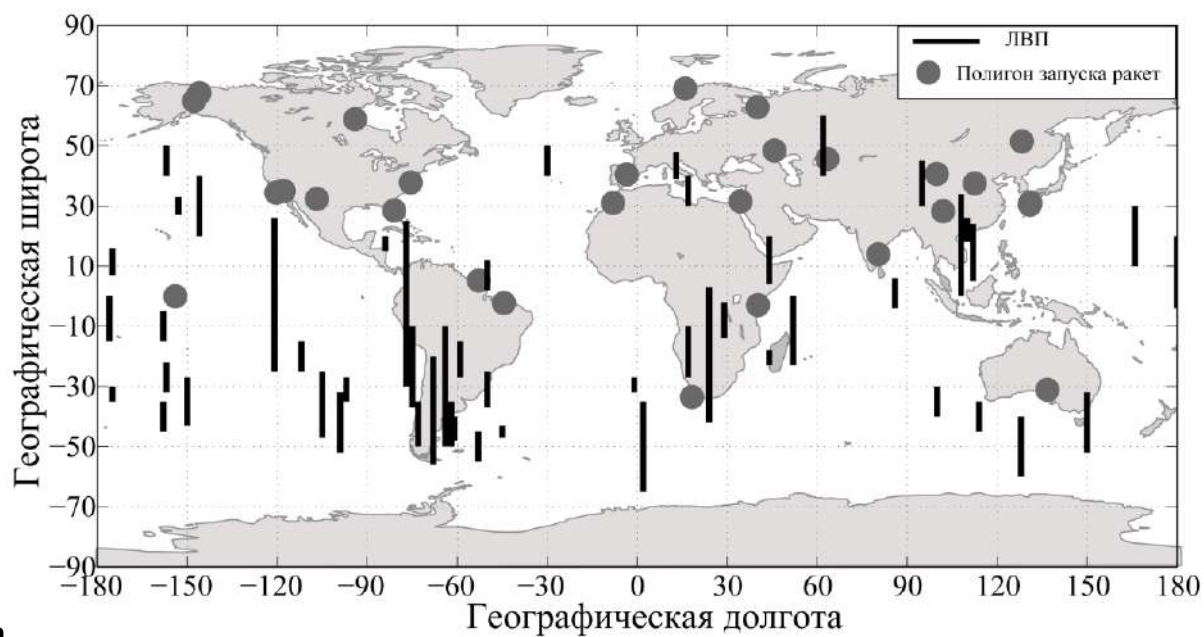


Рисунок 4.13 – а. Місцезнаходження діючих космодромів на період листопад 1982 р. – лютий 1983 р. і всі локалізовані сплески ГХ цього періоду; б. Тільки космодроми СРСР і ГХ, виявлені протягом 12 годин від моментів конкретних запусків.

4.5 Енергія ГХ

Об'ємна густина енергії ГХ складається з трьох складових, що мають різну фізичну природу (Yeh and Liu 1974):

$$E = E_k + E_g + E_e. \quad (4.2)$$

Першою складовою є кінетична енергія:

$$E_k = \rho \frac{V^2}{2}. \quad (4.3)$$

Другою – потенціальна гравітаційна енергія, обумовлена вертикальним зміщенням повітряних частинок в гравітаційному полі Землі:

$$E_g = \frac{(\delta p - c_s^2 \delta \rho)^2}{2 \rho c_s^2 (\gamma - 1)} = \frac{\rho c_s^2}{2(\gamma - 1)} \left(\frac{\delta \rho_g}{\rho} \right)^2. \quad (4.4)$$

Третя складова – потенціальна пружна енергія, обумовлена збуренням тиску атмосфери (інша назва – термобарична енергія):

$$E_e = \frac{\delta p}{2 \rho c_s^2} = \frac{\rho c_s^2}{2} \left(\frac{\delta \rho_e}{\rho} \right)^2. \quad (4.5)$$

В цих формулах фігурують:

ρ і p – густина і тиск атмосфери;

$\delta p = c_s^2 \delta \rho_e$ – варіація тиску;

$\delta \rho = \delta \rho_g + \delta \rho_e$ – варіація густини, де $\delta \rho_g$ і $\delta \rho_e$ – гравітаційна та пружна складові. Співвідношення $\delta \rho_g$ і $\delta \rho_e$ визначається формулою (3.25);

$c_s = \sqrt{\gamma R T / \mu}$ – швидкість звуку;

R, T, γ, μ – універсальна газова стала, температура, показник адіабати і молекулярна маса.

Об'ємні густини кінетичної і потенціальної енергії ГХ в середньому рівні між собою (віріальна теорема), тому:

$$\langle E \rangle_\lambda = 2 \langle E_g + E_e \rangle_\lambda, \quad (4.6)$$

де $\langle \dots \rangle_\lambda$ позначає операцію усереднення по довжині хвилі λ_x , що еквівалентно усередненню по періоду коливань. З використанням співвідношення (3.25) цей вираз, після певних перетворень, приводиться до вигляду:

$$\langle E \rangle_\lambda = f \frac{\rho c_s^2}{(\gamma - 1)} \left\langle \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 \right\rangle_\lambda = \gamma f U \left\langle \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 \right\rangle_\lambda. \quad (4.7)$$

де $U = R(\rho / \mu) T / (\gamma - 1)$ – густина внутрішньої термічної енергії атмосфери, f – близький до одиниці коефіцієнт, який визначається формулою:

$$f = \frac{1 + (\gamma - 1)r^2}{1 + r^2}, \text{ де } r = \frac{\gamma}{2(\gamma - 1)} \frac{q_z}{q^2}. \quad (4.8)$$

Для подальших числових оцінок важливо, що область значень коефіцієнта f обмежена діапазоном $f = (1, 2/3)$, причому у випадку $q^2 \gg 1$ $f \rightarrow 1$.

Слідуючи загальному підходу даної роботи, перейдемо до розгляду окремого хвильового пакета ГХ: $\delta \rho(x) / \rho(x) = a(x) \cdot \cos(-ik_{x0}x + \varphi(x))$. Тоді усереднення в правій частині (4.7) проводиться за правилом $\langle (\delta \rho / \rho)^2 \rangle_\lambda = a^2 / 2$, після чого вираз для енергії ГХ приймає просту і фізично змістовну форму:

$$\langle E \rangle_\lambda = \frac{\gamma f}{2} \cdot a^2 \cdot U, \quad (4.9)$$

де a – амплітуда ГХ «за відносним збуренню густини», множник $\gamma f / 2 \sim 1$. Таким чином, квадрат амплітуди a^2 виступає мірою енергії хвильового процесу по відношенню до внутрішньої енергії середовища U .

Густина потоку енергії ГХ дається загальним гідродинамічним виразом (Ландау, Лифшиц 1986):

$$\vec{S} = \delta \vec{V} \cdot \delta p, \quad (4.10)$$

з якого випливає:

$$\langle S_z \rangle_\lambda = \langle \delta V_z \cdot \delta p \rangle_\lambda = \frac{1}{2} \delta V_{zm}(x) \delta p_m(x) \cos \Delta \varphi, \quad (4.11)$$

де δV_m і δp_m – амплітуди обвідних хвиль швидкості та тиску, $\Delta \varphi$ – фазовий зсув між ними. Вирази (4.9) і (4.10) містять параметри, прямо вимірювані в

експерименті, що дозволяє з високою точністю визначити енергетичні характеристики ГХ. Отримані таким чином кількісні значення наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Енергетичні характеристики хвильових пакетів ГХ (продовження таблиці 4.1). В стовпчиках вказані: номер події, дата реєстрації (рік – день в році), номер орбітального витка, масштаб швидкості c_g (м/с), несуча довжина хвилі λ_{x0} (км), максимальна амплітуда обвідної $a_{\max}$, максимальний вертикальний потік енергії $S_z = S_{z\max}$ (ерг/см²с), сумарний об'ємний темп нагрівання атмосфери ΣQ (ерг/см³с).

№	Year – Day	Orbit	c_g , м/с	λ_{x0}	$a_{\max}$	S_z	ΣQ
1-1	1982 – 327	7202	1140	1657	0.077	0.0883	2.0e-9
1-2				901	0.054	0.0538	
1-3				438	0.022	0.0195	
						$\Sigma S_z=0.16$ ерг/см ² с	
2-1	1982 – 364	7771	936	980	0.028	0.0150	3.7e-9
2-2				391	0.028	0.0188	
2-3				202	0.012	0.0068	
						$\Sigma S_z=0.04$ ерг/см ² с	
3-1	1982 – 365	7789	932	1383	0.046	0.0186	1.2e-8
3-2				611	0.076	0.0477	
3-3				301	0.058	0.0616	
						$\Sigma S_z=0.14$ ерг/см ² с	
4-1	1982 – 365	7791	925	1168	0.074	0.0263	6.7e-9
4-2				542	0.060	0.0318	
4-3				287	0.023	0.0122	
						$\Sigma S_z=0.07$ ерг/см ² с	
5-1	1983 – 005	7874	939	1324	0.081	0.0502	1.3e-8
5-2				544	0.061	0.0846	
5-3				275	0.020	0.0108	
						$\Sigma S_z=0.15$ ерг/см ² с	

На рис. 4.14 наведено приклад хвильових форм швидкості і тиску атмосфери $\delta V_z(x)$ і $\delta p(x)$. У випадку 1-1 і 1-2 коливання обох параметрів переважно синфазні $\Delta\varphi \approx 0$, отже $\langle \delta V_z \cdot \delta p \rangle > 0$. Це означає, що ГХ переносять енергію знизу-вгору.

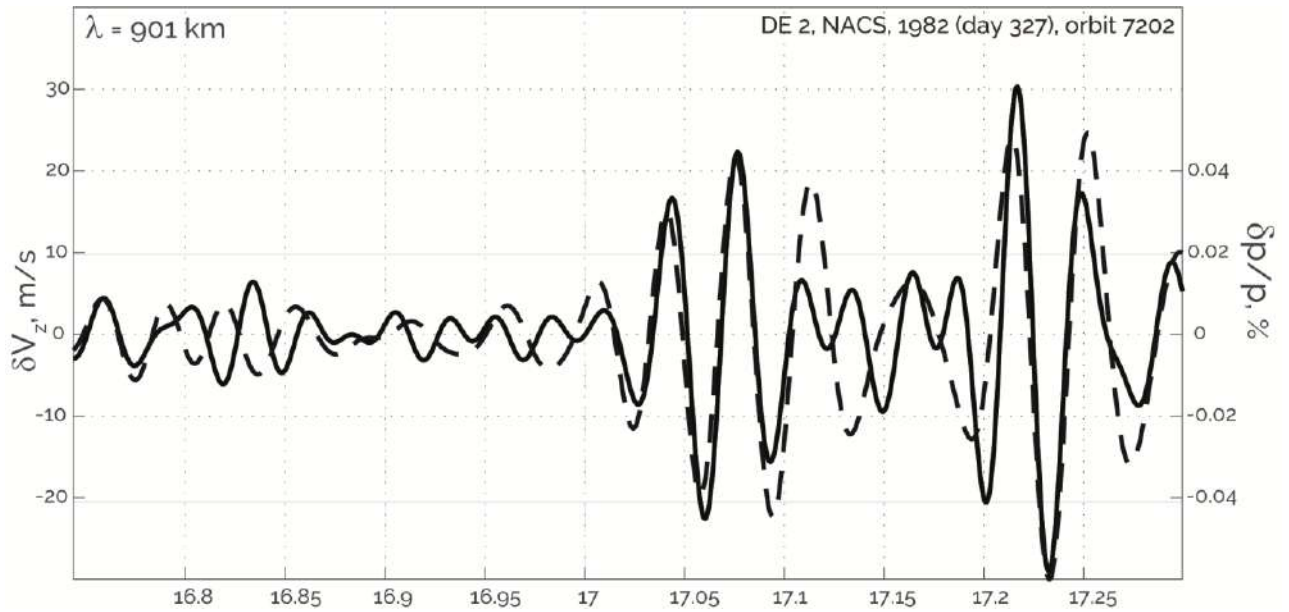


Рисунок 4.14 – Хвильові форми вертикальної швидкості (суцільна крива) і тиску (пунктир) для події 1-2.

Аналітичні вирази для компонент $\vec{V}_g$ випливають з дисперсійного рівняння ГХ (3.6):

$$V_{gh} = \frac{\partial \omega}{\partial k_x} = c_g \frac{1 + q_z^2}{(1 + q^2)^{3/2}}, \quad V_{gz} = \frac{\partial \omega}{\partial k_z} = -c_g \frac{q_h q_z}{(1 + q^2)^{3/2}}. \quad (4.12)$$

В короткохвильовій межі ці формули трохи спрощуються:

$$V_{gh} \approx c_g \frac{1 + q_z^2}{q^3}, \quad V_{gz} \approx -c_g \frac{q_h q_z}{q^3} \quad (\text{при } q^2 \gg 1). \quad (4.13)$$

Потік енергії ГХ, що поширюється знизу вгору, повністю поглинається верхньою атмосферою. Теорія дисипації ГХ (Vadas and Fritts 2005; Лизунов и Леонтьев 2014 а; Лизунов и Леонтьев 2014 b) виявляє глибоку аналогію з теорією Чепмена, яка описує поглинання атмосферою сонячного КХ випромінювання. А саме, поглинання ГХ в основному відбувається в шарі атмосфери завтовшки $\sim 2H$. Висота розташування шару залежить від спектральних параметрів ГХ, але не від інтенсивності ГХ. В умовах спостережень на супутнику DE 2 дисипація відбувається як раз на висотах проведення супутникових вимірів. Оцінка об'ємного темпу нагрівання атмосфери приймає вигляд:

$$Q \sim \frac{\langle S_z \rangle_\lambda}{2H} = k_g \langle S_z \rangle_\lambda. \quad (4.16)$$

Чисельні значення Q вказані в [табл. 4.3](#).

Порівняємо ГХ з іншими механізмами енергопереносу в термосфері. В [табл. 4.4](#) наведені швидкості нагрівання/охолодження атмосферного середовища на висоті 350 км під дією різних фізичних факторів ([Маров и Колисниченко 1987](#); [Брюнелли и Намналадзе 1988](#)) і швидкості дисипації ГХ, визначеній в даній роботі. Видно що, поступаючись внеску крайнього сонячного ультрафіолету і потоків енергійних частинок в сильних полярних сьйвах, ГХ входять до переліку основних агентів формування енергетичного балансу полярної термосфери.

Таблиця 4.4 – Об'ємні швидкості нагрівання/охолодження термосфери на висоті 350 км

Фактор	Темп нагріву Q , ерг/(см ³ с)
Поглинання сонячного КХ випромінювання (денна півсфера)	10^{-8}
Нагрівання авроральними частинками (в сильних полярних сьйвах)	10^{-9} – 10^{-8}
Охолодження шляхом молекулярної теплопровідності	10^{-9} – 10^{-8}
Нагрівання при дисипації ГХ (локально)	10^{-9} – 10^{-8}
Нагрівання/охолодження внаслідок стиснення (ніч)/розширення (день) термосфери	10^{-9}
Охолодження ІЧ випромінюванням	10^{-10} – 10^{-9}

4.6 Висновки до розділу 4

З використанням методу обробки даних, розробленого в розділах 2 і 3 дисертації, проведено систематичний кількісний аналіз вимірювань супутника DE 2. Результати обробки занесені до каталогу ГХ, який поповнюється по мірі обробки чергових порцій даних. На момент завершення роботи над дисертацією, було виявлено і кодифіковано понад тисячу хвильових збурень. Тим самим створена репрезентативна вибірка даних щодо хвильової активності термосфери у висотному шарі 250–500 км. Розділ 4 присвячений аналізу та узагальненню цієї інформації з метою вивчення фізики ГХ.

Виділимо наступні отримані результати:

1. Хвильове поле термосфери у кожен момент часу і в кожній точці являє собою суперпозицію кількох хвильових пакетів різних частот (типово виділяється три найбільш інтенсивні складові), що поширюються по індивідуальним променевим траєкторіям, і, ймовірно, генеруються різними джерелами;

2. Спектр хвильового поля завжди містить моди ГХ, як правило, містить дактовані термосферні моди і тільки в одиничних випадках – акустичні моди. Можна стверджувати, що в термосфері акустичне поле енергетично слабкіше поля ГХ, і що генерація потужних інфразвукових збурень на таких висотах є рідкісною подією;

3. Інформативним кількісним параметром хвильового поля є безрозмірна амплітуда, розрахована за відносними збуреннями густини атмосфери $a = \delta\rho/\rho$. Цей параметр виступає мірою енергії хвильового процесу по відношенню до внутрішньої термічної енергії атмосфери $E \sim a^2 U$. У регіонах полярних шапок амплітуди ГХ сягають $a \sim 0.1$, відповідно $E \sim 0.01 U$. Дисипація хвиль зазначених енергій здатна викликати підвищення температури термосфери на кілька десятків градусів. Кількісний аналіз показує, що ГХ є одним з основних факторів енергообміну в полярній термосфері (після

прямого нагріву сонячним короткохвильовим випромінюванням і на рівні з теплопровідністю);

4. Геопросторовий розподіл хвильового поля термосфери демонструє географічну структуру, в якій виражені активні високоширотні області (північна і південна, вище магнітної широти $40...50^\circ$) і спокійна низькоширотна область. Активні області повністю заповнені ГХ аврорального походження з максимальними амплітудами $a_{\max} \approx 0.1$. У спокійній зоні реєструються ізольовані сплески ГХ з амплітудами $a \sim 0.01$, генерація яких може бути викликана приземними джерелами;

5. Виявлено зв'язок між хвильовими збуреннями в спокійній зоні термосфери і землетрусами. Виділено область в просторі (відстань біля 2000 км) і часі (приблизно –6 год.) відносно епіцентрів землетрусів, в якій має місце генерація ГХ як провісника землетрусів. В цілому ж ГХ від приземних джерел реєструються рідко. Цей результат не слід трактувати як твердження про слабкість впливів на іоносферу знизу. Вірогідно, що приземні атмосферні збурення в основному не досягають супутникових висот.

ВИСНОВКИ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

В дисертації представлено 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 (координата x відраховується вздовж орбіти супутника); теоретична оцінка неспостережуваних спектральних параметрів процесу; корекція спостережуваного профілю шляхом відокремлення часових і просторових варіацій хвильового поля.

3. Вперше здійснено оцінювання похибок визначення ГХ. Встановлено, що оцінювання спектру здійснюється з високим ступенем точності ($\sim 1-5\%$). Оцінка 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, 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.

Результати дисертаційного дослідження використано у науково-дослідницькому процесі в Інституті космічних досліджень НАН України та ДКА України (Додаток Д).

На завершення хочеться виразити щиру подяку моєму науковому керівнику, Георгію Вячеславовичу Лізунову за те, що заради моєї освіченості він поклав на жертovníк мільярди своїх нервових клітин в наших дискусіях та моїй впертості. Я вдячна йому, що він навчив мене буквально всьому, що я знаю з фізики. Мені неймовірно пощастило мати власного професійного викладача, який не боявся визнавати, коли він щось не знав, але згодом обов'язково розбирався у будь-якому питанні.

Хочу виразити велику подяку своїй мамі Вірі, що була терпляча до мене і не переставала вірити в мої можливості.

Щиро дякую своєму коханому чоловіку Олександр, що за останні три роки завжди цікавився моєю роботою і ставив чудові запитання, з пошуком відповіді на які були отримані чудові результати, що увійшли до цієї дисертації.

Дякую своєму брату Олексію, що надавав постійну технічну підтримку і не переставав вірити в мене.

Дякую своїй колезі і кращій подрузі в останні роки, Олені П'янковій, що вірила, підтримувала і, найголовніше, зіграла роль «клею», або перекладача у багатьох дискусіях з Г.В. Лізуновим.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Afraimovich, E.L., Perevalova, N.P., Plotnikov, A.V., Uralov A.M.: The shock-acoustic waves generated by earthquakes. *Ann. Geophys.* **19**, 395-409 (2001)
2. Afraimovich, E.L., Edemskiy, I.K., Leonovich, A.S., Leonovich, L.A., Voeykov, S.V., Yasyukevich, Y.V.: MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator. *Geophysical Research Letters* **36**, (2009):
doi:10.1029/2009GL039803. issn: 0094-8276
3. Antonova, V.P., Dungenbaeva, K.E., Zalizovskii, A.V., Inchin, A.S., Kryukov, S.V., Somsikov, V.M., Yampol'skii, Yu.M.: Difference between the Spectra of Acoustic Gravity Waves in Daytime and Nighttime Hours due to Nonequilibrium Effects in the Atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy* **46**(1), 101–109 (2006).
doi:10.1134/S0016793206010117
4. Beynon, W.J.G.: Evidence of Horizontal Motion in Region F2 Ionization. *Nature* **162**, 887 (04 December 1948). doi:10.1038/162887a0
5. Blagoveshchenskaya, N.F., Borisova, T.D., Kornienko, V.A., Moskvina, I.V., Rietveld, M.T., Frolov, V.L., Uryadov, V.P., Kagan, L.M., Yampolski, Yu.M., Galushko, V.L., Koloskov, A.V., Kascheev, S.B., Zalizovski, A.V., Vertogradov, G.G., Vertogradov, V.G., Kelley, M.C.: Probing of medium-scale travelling ionospheric disturbances using HF-induced scatter targets. *Ann. Geophys.* **24**, 2333–2345 (2006).
6. Bond, F.R, Thomas, I.L.: The southern auroral oval. *Aust. J. Phys.* **24**, 97–102 (1971)
7. Brace, L.H., Spencer, N.W., Dalgarno, A.: Detailed behaviour of the midlatitude ionosphere from the explorer XVII satellite. *Planet. Space Sci.* **13**(7), 647-666 (1965)(AE-A)
8. Brinton, H.C., Scott, L.R., Pharo III, M.W., Coulson, J.T.: The Bennett ion-mass spectrometer on Atmosphere Explorer-C and -E. *Radio Sci.* **8**(4), 323–332 (1973). doi: 10.1029/RS008i004p00323
9. Bruinsma, S.L., Forbes, J.M.: Global observation of traveling atmospheric disturbances (TADs) in the thermosphere. *Geophys. Res. Lett.* **34**(14), (2007). doi:10.1029/2007GL030243
10. 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 B. *Space Science Instrumentation* **5**, 429–441 (1981) (DE 2)
11. Champion, K.S.W., Marcos, F.A.: The triaxial-accelerometer system on Atmosphere Explorer. *Radio Sci.* **8**(4), 297–303 (1973).
doi:10.1029/RS008i004p00297 (AE-C, -D, -E Atmospheric Density Accelerometer (MESA))

12. Chu, X., Yu, Z., Gardner, C.S., Chen, C., Fong, W.: Lidar observations of neutral Fe layers and fast gravity waves in the thermosphere (110–155 km) at McMurdo (77.8°S, 166.7°E), Antarctica. *Geophys. Res. Lett.* **38**, L23807 (2011). doi:10.1029/2011GL050016
13. Dalgarno, A., Hanson, W.B., Spencer, N.W., Schmerling, E. R.: The Atmosphere Explorer mission. *Radio Sci.* **8**(4), 263–266 (1973). doi: 10.1029/RS008i004p00263 (AE-C, -D, -E)
14. Davis, M.J., Rosa, A.V.: Traveling ionospheric disturbances originating in the auroral oval during polar substorms. *J. of Geophys. Res.* **74**(24), 5721–5735 (1969)
15. Dudis, J.J., Reber, C.A.: Composition effects in thermospheric gravity waves. *Geophys. Res. Letters* **3**(12), 727–730 (1976)
16. Fedorenko, A.K., Cheremnykh, O.K., Kryuchkov, E.I.: A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere. *Ann. Geophys.* **33**, 101–108 (2015). doi:10.5194/angeo-33-101-2015
17. Feldstein, Y.I., Starkov, G.V.: Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances. *Planet. Space Sci.* **15**(2), 209–229 (1967)
18. 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. *J. Space Weather Space Clim.* **4**(A17), (2014). <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014013>
19. Francis, S.H.: Global propagation of atmospheric gravity waves: a review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* **37**, 1011–1054 (1975)
20. Fritts, D.C., Lund, T.: Gravity Wave Influences in the Thermosphere and Ionosphere: Observations and recent modeling, in *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*, edited by M.A. Abdu, D. Pancheva, and A. Bhattacharyya, IAGA Special Sopron Book Series **2**, Springer, Dordrecht, 109–130 (2011)
21. Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.V., Moffett, R.J., Quegan, S.: Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J. of Geophys. Res.* **99**(A3), 3893–3914 (1994)
22. Galperin, Yu.I., Hayakawa, M.: On the Magnetospheric Effects of Experimental Ground Explosions Observed from AUREOL-3. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* **48**(10), 1241–1263 (1996)

23. Galushko, V.G., Beley, V.S., Koloskov, A.V., Yampolski, Y.M., Reinisch, B., Paznukhov, V.V.: Frequency-and-Angular HF Sounding and VHF ISR Diagnostics of TIDs. *Radio Sci.* **38**(6), 1102–1110 (2003)
24. Georges, T.M.: HF Doppler studies of travelling ionospheric disturbances. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* **30**, 735–746 (1968)
25. Gross, S.H., Reber, C.A., and Huang, F.T.: Large-scale waves in the thermosphere observed by the AE-C satellite. *The Transactions on Geoscience and Remote sensing* **GE-22**(4), 340–351 (1984)
26. Hanson, W.B., Zuccaro, D.R., Lippincott, C.R., Sanatani, S.: The retarding-potential analyzer on Atmosphere Explorer. *Radio Sci.* **8**(4), 333–339 (1973). doi:10.1029/RS008i004p00333
27. Hayakawa, M.: *The Frontier of Earthquake Prediction Studies*. Shuppan, Tokyo, Japan (2012)
28. Hedin, A.E., Mayr, H.G.: Characteristics of Wavelike Fluctuations in Dynamics Explorer Neutral Composition Data. *JGR* **92**(A10), 11159–11172 (1987)
29. King-Hele, D.G., Eileen Quinn: Air density at heights of 150–300 km in the years 1962–1964. *Planet. Space Sci.* **13**(7), 693–705 (1965) (AE-A)
30. Heelis, R.A., Hanson, W.B., Lippincott, C.R.: The Ion Drift Meter for Dynamics Explorer B. *Space Science Instrumentation*. **5**, 511–521 (1981) (DE 2)
31. Hines, C.O.: *The upper atmosphere in motion*. American Geophysical Union. Washington, D.C. (1974)
32. Hocke, K. and Schlegel, K.: A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.* **14**, 917–940 (1996)
33. Hoegy, W.R., Dyson, P.L., Wharton, L.E., Spencer, N.W.: Neutral atmospheric waves determined from atmospheric explorer measurements. *Geophys. Res. Let.* **6**(3), 187–190 (1979)
34. Hoffman, J.H., Hanson, W.B., Lippincott, C.R., Ferguson, E.E.: The magnetic ion-mass spectrometer on Atmosphere Explorer. *Radio Sci.* **8**(4), 315–322 (1973). doi:10.1029/RS008i004p00315 (AE-C, -D, -E)
35. Hooke, W.H.: Rossby-Planetary waves, tides, and gravity waves in the upper atmosphere. In: *Studies in Geophysics. The Upper Atmosphere and Magnetosphere*, pp.130–140. National Academy of Sciences, Washington, D.C. (1977)
36. 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.* **107**(A12), 1418–1439 (2002). doi:10.1029/2002JA009370

37. Jacobson, A.R., Carlos, R.C., Massey, R.S., Wu, G.: Observations of traveling ionospheric disturbances with a satellite-beacon radio interferometer: Seasonal and local time behavior. *J. of Geophys. Res.: Space Physics* **100**(A2), 1653–1665 (1995). <https://doi.org/10.1029/94JA02663>
38. Johnson, F.S., Hanson, W.B., Hodges R.R., Coley, W.R., Carignan G.R., and Spencer N.W.: Gravity waves near 300 km over the polar caps, *J. Geophys. Res.* **100**, 23,993–24,002 (1995)
39. Kato, S.: Dynamics of the upper atmosphere. In: *Developments of the Earth and Planetary Sciences*. Center for Academic Publications Japan, Tokyo (1980)
40. Kelley, M.C.: *The Earth's Ionosphere*. Ithaca, New York (1989)
41. Kramer, H.J.: *Observation of the Earth and Its Environment*. Springer (2002)
42. Makhlof, U., Dewan, E., Isler, J.R., and Tuan, T. F.: On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations, *J. Geophys. Res.* **95**, 4103–4111 (1990)
43. Mayr, H.G., Harris, I., Herrero, F.A., Spencer, N.W., Varosi, F., Pesnell, W.D.: Thermospheric gravity waves: observations and interpretation using the transfer function model (TFM). *Space Science Reviews* **54**, 297–375 (1990)
44. Munro, G.H.: Short-Period Changes in the F Region of the Ionosphere. *Nature* **162**(December 4), 886–887 (1948)
45. Newton, G.P., Horowitz, R., Priester, W.: Atmospheric density and temperature variations from the explorer XVII satellite and a further comparison with satellite drag. *Planet. Space Sci.* **13**(7), 599–616 (1965) (AE-A)
46. Newton, G.P., Pelz, D.T., Volland, H.: Direct in situ measurements of wave propagation in the neutral thermosphere. *J. Geophys. Res.* **74**(1), 183 (1969) (AE-B)
47. Nier, A.O., Potter, W.E., Hickman, D.R., Mauersberger, K.: The open-source neutral-mass spectrometer on Atmosphere Explorer-C, -D, and -E. *Radio Sci.* **8**(4), 271–276 (1973). doi:10.1029/RS008i004p00271. (AE-C, -D, -E)
48. Oliver, W.L., Otsuka, Y., Sato, M., Takami, T., Fukao, S.: A climatology of F region gravity wave propagation over the middle and upper atmosphere radar. *J. Geophys. Res.* **102**(A7), 14,499–14,512 (1997)
49. Pelz, D.T., Reber, C.A., Hedin, A.E., Carignan, G.R.: A neutral-atmosphere composition experiment for the Atmosphere Explorer-C, -D, and -E. *Radio Sci.* **8**(4), 277–285 (1973) doi:10.1029/RS008i004p00277
50. Perevalova, N.P., Polyakova, A.S., Zalizovski, A.V.: Diurnal variations of total electron content under quiet helio-geomagnetic conditions. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **72**(13), 997–1007 (2010).

51. Piankova, O.V., Lizunov, G.V., Kuzmych, A.A., Skorokhod, T.V.: Ionosphere Waves Service (POPDat FP7 Project). Сборник тезисов 12 Украинской конференции по космическим исследованиям, 74 (2012)
52. Potter, W.E., Kayser, D.C., Mauersberger, K.: Direct Measurements of Neutral Wave Characteristics in the Thermosphere. *J. Geophys. Res.* **81**(28), 5002–5012 (1976)
53. Prolss, G.W.: Common Origin of Positive Ionospheric Storms at Middle Latitudes and the Geomagnetic Activity Effect at Low Latitudes. *J. of Geophys. Res.* **98**(A4), 5981–5991 (1993)
54. Rice, C.J., Carter, V.L., LaValle, S.R., Chater, W.T., Jones, D.A., King, C.G., Nelson D.F.: Atmosphere Explorer pressure measurements: Ion gauge and capacitance manometer. *Radio Sci.* **8**(4), 305–314 (1973). doi:10.1029/RS008i004p00305. (AE-C, -D, -E)
55. Richmond, A.D., Matsushita, S.: Thermospheric Response to a Magnetic Substorm. *J. of Geophys. Res.* **80**(19), 2839–2850 (1975)
56. Reber, C.A., Nicolet, M.: Investigation of the major constituents of the April–May 1963 heterosphere by the explorer XVII satellite. *Planetary and Space Science* **13**(7), 617–646 (1965) (AE-A, Mass Spectrometer)
57. Rice, C.J., Sharp, L.R.: Neutral atmospheric waves in the thermosphere and tropospheric weather systems. *Geophys. Res. Lett.* **4**(8), 315–318 (1977)
58. Rolland, L.M., Lognonn´e, P., Astafyeva, E., Kherani, E.A., Kobayashi, N., Mann, M., Munekane, H.: The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space* **63**(7), 853–857 (2011)
59. Sauli, P., Boska, J.: Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* **63**, 945–950 (2001)
60. Skorokhod, T., Lizunov, G., Fedorenko, A.: Global Distribution of Atmosphere Gravity Waves According to DE 2 data. Сборник тезисов Девятой украинской конференции по космическим исследованиям, 54 (2009)
61. 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, 63 (2010)
62. Smith, S.M., Vadas, S.L., Baggaley, W.J., Hernandez, G., Baumgardner, J.: Gravity wave coupling between the mesosphere and thermosphere over New Zealand. *J. of Geophys. Res.: Space Physics* **118**, 2694–2707 (2013). doi:10.1002/jgra.50263

63. Spencer, N.W., Brace, L.H., Grimes, D.W.: The Atmosphere Explorer spacecraft system. *Radio Sci.* **8**(4), 267–269 (1973). doi:10.1029/RS008i004p00267. (AE-C, -D, -E)
64. Spencer, N.W., Niemann, H.B., Carignan, G.R.: The neutral-atmosphere temperature instrument. *Radio Sci.* **8**(4), 287–296 (1973). doi:10.1029/RS008i004p00287. (AE-C, -D, -E)
65. Spencer, N.W., Wharton, L.E., Niemann, H.B., Hedin, A.E., Carignan, G.R., Maurer, J.C.: The Dynamics Explorer Wind and Temperature Spectrometer. *Space Science Instrumentation* **5**, 417–428 (1981) (DE 2)
66. Thome, G.: Long-Period Waves Generated in the Polar Ionosphere during the Onset of Magnetic Storms. *J. of Geophys. Res., Space Phys.* **73**(19), 6319–6336 (1968)
67. Vadas, S.L., Taylor, M.J., Pautet, P.-D., Stamus, P.A., Fritts, D.C., Liu, H.-L., Sao Sabbas, F.T., Rampinelli, V.T., Batista, P., Takahashi, H.: Convection: the likely source of the medium-scale gravity waves observed in the OH airglow layer near Brasilia, Brazil, during the SpreadFEx campaign. *Ann. Geophys.* **27**, 231–259 (2009)
68. Vadas, S.L., Nicolls, M.J.: The phases and amplitudes of gravity waves propagating and dissipating in the thermosphere: Theory. *J. of Geophys. Res.* **117**(A05322), 1–25 (2012). doi:10.1029/2011JA017426
69. Vadas, S.L., Makela, J.J., Nicolls, M.J., Ralph, F.M.: Excitation of gravity waves by ocean surface wave packets: Upward propagation and reconstruction of the thermospheric gravity wave field. *J. of Geoph. Res.: Space Physics* **120**, 9748–9780 (2015). doi:10.1002/2015JA021430
70. Walterscheid, R.L., Hickey, M.P.: Group velocity and energy flux in the thermosphere: Limits on the validity of group velocity in a viscous atmosphere. *J. Geophys. Res.* **116**(D12101), 1–12 (2011). doi:10.1029/2010JD014987
71. Yeh, K.C. and Liu, C.H.: Acoustic-gravity waves in upper atmosphere. *Reviews of Geophys. And Space Phys.* **12**(2), 193–216 (1974)
72. Бондур, В.Г., Пулинец, С.А., Урзунов, Д.: Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Katrina. *Исследование Земли из космоса* **6**, 3–11 (2008)
73. Брюнелли, Б.Е., Намналадзе, А.А.: Физика ионосферы. Наука. Москва (1988)
74. Бурмака, В.П., Лысенко, В.Н., Черногор, Л.Ф., Черняк, Ю.В. Волновые процессы в F-области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур. *Геомагнетизм и аэрономия* **46**(6), 783 – 800 (2006)

75. Бучаченко, А.Л., Ораевский, В.Н., Похотелов, О.А. и др.: Ионосферные предвестники землетрясений. Успехи физ.наук **166**(9), 1023–1029 (1996)
76. Гайворонская, Т.В.: Некоторые ионосферные предвестники готовящихся землетрясений. Физика земли **9**(9), 38–42 (1996)
77. Гивишвили, Г.В.: Квазистационарные ионосферные неоднородности и мелкомасштабные ячейки циркуляции свободной атмосферы. Геомагнетизм и аэрономия **30**(1), 90–97 (1990)
78. Госсард, Э.Э., Хук, У.Х.: Волны в атмосфере. Мир, Москва (1978)
79. Горелый, С.И., Лампей, В.К., Никольский, А.В.: Ионосферные эффекты стартов космических аппаратов. Геомагнетизм и аэрономия **4**(3), 158–161 (1994)
80. Григорьев, Г.И.: Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (Обзор). Изв. ВУЗов Радиофизика **XLII**(1), 1–23 (1999)
81. Дробязко, И.Н., Красильников, В.Н.: Генерация акустико-гравитационных волн атмосферной турбулентностью. Изв. вузов. Радиофизика **28**(11), 1357–1365 (1985)
82. Маров, М.Я., Колесниченко, А.В.: Введение в планетарную аэрономию. Наука, Москва (1987)
83. Марпл.-мл., С.Л.: Цифровой спектральный анализ и его приложения. Мир, Москва (1990)
84. Лайонс, Р.: Цифровая обработка сигналов (пер. с англ.). Бином-Пресс, Москва (2006)
85. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М.: Гидродинамика. Наука, Москва (1986)
86. Леонтьев, А.Ю., Скороход, Т.В.: Поглощение АГВ в термосфере в присутствии ветра. Сборник тезисов 12 Украинской конференции по космическим исследованиям, 39 (2012)
87. Лизунов, Г.В., Федоренко, А.К.: Генерация атмосферных гравитационных волн солнечным термінатором по данным измерений на спутнике «Atmosphere Explorer-E». Радиофизика и радиоастрономия **11**(1), 49–62 (2006)
88. 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 **14**(4), 3–8 (2008)
89. Лизунов, Г.В., Леонтьев, А.В., Скороход, Т.В.: Изучение динамики ионосферы в проекте «Ионосат – Микро». Космический проект «Ионосат – Микро». Академперіодика, Киев, 26–45 (2013)

90. Лизунов, Г.В., Леонтьев, А.Ю.: Высота проникновения в ионосферу внутренних атмосферных гравитационных волн. Космічна наука і технологія **20**(4), 31–41 (2014)
91. Лизунов, Г.В., Скороход, Т.В.: Планетарное распределение среднемасштабных атмосферных гравитационных волн по данным спутниковых измерений. Космічна наука і технологія **16**(1), 36–41 (2010)
92. Лизунов Г.В., Скороход Т.В.: Спутниковые исследования динамических процессов в ионосфере. Космічні дослідження в Україні. Звіт COSPAR. 2008-2010. Академперіодика, Київ. с. 11–15 (2011)
93. Лізунов, Г.В., Скороход, Т.В.: Анализ спектрального состава АГВ по данным спутниковых измерений термосферных параметров. 16-th Ukrainian Conference on Space Research. Abstracts, 35 (2016)
94. Сергиенко, А.Б.: Цифровая обработка сигналов. СПб, Питер (2002)
95. Скороход, Т.В., Лізунов, Г.В.: Глобальний розподіл акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері за даними супутника DE 2. Сборник тезисов Конференции молодых ученых «Дистанционное радиозондирование ионосферы», 53 (2010)
96. Скороход, Т.В., Лізунов, Г.В.: Локалізовані хвильові пакети акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері Землі. Сборник тезисов Конференции молодых ученых «Дистанционное радиозондирование ионосферы», 54 (2010)
97. Скороход, Т.В., Лізунов, Г.В.: Морфологическая структура и возможные источники АГВ в ионосфере. Сборник тезисов 10-й украинской конференции по косм. Исследованиям, 21 (2010)
98. Скороход, Т.В., Лизунов, Г.В.: Связь среднемасштабных вариаций нейтральных и ионизированных компонент термосферы по данным измерений на DE 2.. Сборник тезисов 11-й украинской конференции по косм. исследованиям, 13 (2011)
99. Скороход, Т.В.: Морфологическая структура и возможные источники акустико-гравитационных волн в ионосфере. Космічна наука і технологія **17**(2), 61–67 (2011)
100. Скороход, Т.В.: Среднемасштабные атмосферные гравитационные волны на ионосферных высотах. Сборник тезисов 9-й конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 76–77 (2012)
101. Скороход, Т.В., Лизунов, Г.В.: Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере. Геомагнетизм и аэрономия **52**(1), 93–98 (2012)

102. Скороход, Т.В., Лизунов, Г.В.: Планетарное распределение и спектральный состав поля АГВ в верхней термосфере. 14-th Ukrainian Conference on Space Research. Abstracts, 29 (2014)
103. Скороход, Т.В., Лізунов, Г.В.: Методика селекції волнових форм АГВ по даним супутникових вимірювань термосферних параметрів. 16-th Ukrainian Conference on Space Research. Abstracts, 34 (2016)
104. Скороход, Т.В., Лизунов, Г.В.: Анализ амплитудных и частотных характеристик атмосферных гравитационных волн в верхній термосфере. 17-th Ukrainian Conference on Space Research. Abstracts, 35 (2017)
105. Сомсиков, В.М.: Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором (Обзор). Геомагнетизм и аэрономия 31(1), 1–12 (1991)
106. Сорокин, В.М., Чмырев, В.М.: Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф. Геомагнетизм и аэрономия 42(6), 821–830 (2002)
107. Фаткуллин, М.Н., Солодовников, Г.К., Легенька, А.Д., Друкаренко, С.П.: Среднемасштабные и крупномасштабные волновые возмущения и неоднородности электронной концентрации внешней ионосферы средних и низких широт. Геомагнетизм и аэрономия 24(2), 191–195 (1984)
108. Фаткуллин, М.Н., Заруцкая, Е.В., Фаткулина, В.А.: Глобальные пространственные характеристики среднемасштабных волнообразных неоднородностей на высотах области F ионосферы при различных уровнях магнитосферной активности. ИЗМИРАН, Москва (1990)
109. Федоренко, А.К., Лизунов, Г.В., Роткель, Х.: Супутникові спостереження квазиволнових возмущень атмосфери на висотах області F, викликаних потужними землетрясіннями. Геомагнетизм и аэрономия 45(3), 403–410 (2005)
110. Федоренко, А.К.: Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основі мас-спектрометричних супутникових вимірювань. Радиофізика и радиоастрономия 14(3), 254–265 (2009)
111. Федоренко, А.К.: Направлення розповсюдження акустико-гравітаційних волн над полярними шапками Землі. Космічна наука і технологія 17(3), 34–44 (2011)
112. Черногор, Л.Ф.: Енергетика процесів на Землі, в атмосфері і околотермом космосі в світлі проекту "Попередження". Космічна наука і технологія 5(1), 38–47 (1999)

113. Черногор, Л.Ф.: Тропический циклон как элемент системы Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера **12**(2/3), 16–36 (2006)
114. Черногор, Л.Ф., Шамота, М.А.: Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопутствовавшие прохождению солнечного терминатора. 1. Результаты спектрального анализа. Космічна наука і технологія **15**(5), 43–51 (2009)
115. Черногор Л.Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. Монография. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. – 386 с.
116. Черногор, Л.Ф., Барабаш, В.В.: Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации. Радиофизика и радиоастрономия **17**(4), 353–361 (2012)
117. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. Монография. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2012. – 555 с.
118. Черногор, Л.Ф.: Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 2. Спектральный аналіз. Геомагнетизм и аэрономия **52**(6), 818–831 (2012)
119. Ямпольский, Ю.М., Зализовский, А.В., Литвиненко, Л.Н.: Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью. Радиофизика и радиоастрономия **9**(2), 130–152 (2004)

ДОДАТОК А

АТМОСФЕРНІ СУПУТНИКОВІ ПРОЕКТИ, ЯКІ Є ДЖЕРЕЛАМИ ДАНИХ ДЛЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

	Назва супутника	Роки роботи	Елементи орбіти	Мета місії	Корисне навантаження
1	Atmosphere Explorer – А (АЕ-А, Explorer 17, Aeronomy-A, S6, 00564)	1963– 1966	Висота: 255–916 км Нахил: $i = 57,6^\circ$ Орбіт. період: 96,39 хв Дата запуску: 1963-04-03	Аерономія, глобальна структура верхньої атмосфери	Mass Spectrometer (PI: Reber, Carl) Langmuir Probes (PI: Brace, Larry) Pressure Gauge (PI: Newton, George)
2	Atmosphere Explorer – В (АЕ-В, Explorer 32, Aeronomy-B, 02183)	1966– 1985	Висота: 276–2725 км Нахил: $i = 65^\circ$ Орбіт. період: 116 хвилин Дата запуску: 1966-05-25	“ - ”	Ion Mass Spectrometer (PI: Brinton, Henry) Neutral Particle Magnetic Mass Spectrometer (PI: Reber, Carl) Satellite Drag Atmospheric Density (PI: Wulf-Mathies, Carsten) Pressure Gauges (PI: Newton, George) Electron Temperature and Density (PI: Brace, Larry)

	Назва супутника	Роки роботи	Елементи орбіти	Мета місії	Корисне навантаження
3	Atmosphere Explorer – C (AE-C, Explorer 51, 06977)	1973– 1978	Висота: 149–4294 км Нахил: $i = 68,1^\circ$ Орбіт. період: 132,3 хвилини Дата запуску: 1973-12-16	“_”	Cylindrical Electrostatic Probes (CEP) (PI: Brace, Larry) Atmospheric Density Accelerometer (MESA) (PI: Champion, Kenneth) Photoelectron Spectrometer (PES) (PI: Doering, John) Retarding Potential Analyser/Drift Meter (RPA) (PI: Hanson, William) Extreme Solar UV Monitor (ESUM) (PI: Heath, Donald) Solar EUV Spectrophotometer (EUVS) (PI: Hinteregger, Hans) Open-Source Neutral Mass Spectrometer (PI: Nier, Alfred) Closed-Source Neutral Mass Spectrometer (PI: Pelz, D.) Neutral Atmosphere Temperature (NATE) (PI: Spencer, Nelson) Magnetic Ion-Mass Spectrometer (MIMS) (PI: Hoffman, John) Bennett Ion-Mass Spectrometer (BIMS) (PI: Brinton, Henry) Low-Energy Electrons (LEE) (PI: Hoffman, Robert) Ultraviolet Nitric-Oxide (UVNO) (PI: Barth, Charles) Visible Airglow Photometer (VAE) (PI: Hays, Paul) Cold Cathode Ion Gauge (PI: Rice, Carl) Capacitance Manometer (PI: Rice, Carl) Magnetometer (Spacecraft) (PI: Zmuda, Alfred) Temperature Alarm (PI: Caruso, Paul)

	Назва супутника	Роки роботи	Елементи орбіти	Мета місії	Корисне навантаження
4	Atmosphere Explorer – D (AE-D, Explorer 54, 08353)	1975– 1976	Висота: 154–3816 км Нахил: $i = 90,1^\circ$ Орбіт. період: 126,9 хвилин Дата запуску: 1975-10-06	“-“	Cylindrical Electrostatic Probe (CEP) (PI: Brace, Larry) Atmospheric Density Accelerometer (MESA) (PI: Champion, Kenneth) Photoelectron Spectrometer (PES) (PI: Doering, John) Retarding Potential Analyzer/Drift Meter (PI: Hanson, William) Solar EUV Spectrophotometer (EUVS) (PI: Hinteregger, Hans) Open-Source Neutral Mass Spectrometer (PI: Nier, Alfred) Neutral Atmosphere Composition (NACE) (PI: Hedin, Alan) Neutral Atmosphere Temperature (NATE) (PI: Spencer, Nelson) Magnetic Ion-Mass Spectrometer (MIMS) (PI: Hoffman, John) Ultraviolet Nitric-Oxide Experiment (PI: Barth, Charles) Low-Energy Electrons (LEE) (PI: Hoffman, Robert) Visible Airglow Photometer (VAE) (PI: Hays, Paul) Capacitance Manometer (PI: Rice, Carl) Cold Cathode Ion Gauge (PI: Rice, Carl) Reflected Gas (Spacecraft) (PI: Scialdone, John) Planetary Atmosphere Composition Test (PI: Niemann, Hasso)

	Назва супутника	Роки роботи	Елементи орбіти	Мета місії	Корисне навантаження
5	Atmosphere Explorer – E (AE-E, Explorer 55, AE 5, 08440)	1975–1981	Висота: 156 – 2983 км Нахил: $i = 20^\circ$ Орбіт. період: 117,29 хвилин Дата запуску: 1975-11-20	“ - ”	Cylindrical Electrostatic Probe (CEP) (PI: Brace, Larry) Atmospheric Density Accelerometer (MESA) (PI: Champion, Kenneth) Photoelectron Spectrometer (PES) (PI: Doering, John) Retarding Potential Analyzer/Drift Meter (PI: Hanson, William) Extreme Solar UV Monitor (ESUM) (PI: Heath, Donald) Solar EUV Spectrophotometer (EUVS) (PI: Hinteregger, Hans) Open-Source Neutral Mass Spectrometer (PI: Nier, Alfred) Neutral Atmosphere Composition (NACE) (PI: Hedin, Alan) Neutral Atmosphere Temperature (NATE) (PI: Spencer, Nelson) Bennett Ion-Mass Spectrometer (BIMS) (PI: Brinton, Henry) Visible Airglow Photometer (VAE) (PI: Hays, Paul) Capacitance Manometer (PI: Rice, Carl) Cold Cathode Ion Gauge (PI: Rice, Carl) Backscatter UV Spectrometer (BUV) (PI: Heath, Donald) Temperature Alarm (Spacecraft) (PI: Caruso, Paul) Radiation Damage (PI: Cliff, Rodger) Energy Analyzer Spectrometer Test (PI: Hoffman, John)

	Назва супутника	Роки роботи	Елементи орбіти	Мета місії	Корисне навантаження
6	Dynamics Explorer 2 (DE 2, DE B, Explorer 63, Dynamics Explorer-B, 12625)	1981– 1983	Висота: 309–1012 км Нахил: $i = 89,99^\circ$, Орбіт. період: 98 хвилин Дата запуску: 1981-08-03	Глобальна структура та динаміка атмосфери- іоносфери, вертикальний зв'язок в системі іоносфера- магнітосфера	Magnetic Field Observations (MAG-B) (PI: Sugiura, Masahisa) Vector Electric Field Instrument (VEFI) (PI: Maynard, Nelson) Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) (PI: Carignan, George) Wind and Temperature Spectrometer (WATS) (PI: Spencer, Nelson) Fabry-Perot Interferometer (FPI) (PI: Hays, Paul) Ion Drift Meter (IDM) (PI: Heelis, Roderick) Retarding Potential Analyzer (RPA) (PI: Hanson, William) Low Altitude Plasma Instrument (LAPI) (PI: Winningham, J.) Langmuir Probe (LANG) (PI: Brace, Larry) Magnetospheric Energy Coupling To The Atmosphere Investigation (PI: Nagy, Andrew) Neutral-Plasma Interactions Investigation (PI: Roble, Raymond) Atmospheric Dynamics and Energetics Investigation (PI: Mayr, Hans) Low Altitude Plasma Investigation High Angular Resolution (PI: Hoffman, Robert)

ДОДАТОК Б

ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗОВАНОЇ ОБРОБКИ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ, СТВОРЕНИЙ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Програмний комплекс містить дві робочі програми, що використовують 8 додатково створених функцій (програмний код з коментарями поданий нижче).

Програми (*METHOD_spectr_analys.m* і *CALCULATspectral_parameters.m*):
METHOD_spectr_analys.m

На вхід програми подаються файли даних інструментів WATS і NACS із супутника DE 2 (інструменти можуть бути змінені простою командою). Далі, файли піддаються ряду процесів таких, щоб на виході отримати ряди параметрів, узгоджені за UT.

```
% завантажуються дані приладу NACS
way_NACS='D:\work\PhD_WORK\DE2\NACS\'; % шлях до даних на диску
day='1982327';
dayOrbit=[day 'T164000'];
datafile=[dayOrbit '_0_DE2_NACS_1S_V01.ASC']; % ім'я файлу даних
dataway=[way_NACS datafile]; % ім'я для завантаження файлу даних
NACS=importdata(dataway);
% файл даних розбивається по окремим параметрам
UT_NACS=UT_NACS1(1:end);
Lat=Latitude(1:end);
Oxygen=Oxygen1(1:end);
Nitrogen=Nitrogen1(1:end);
% визначаються точки розривів
sampling_NACS=1;
[breake_points_NACS]=BreakePoints(UT_NACS, sampling_NACS);
% селекція даних в спектральній області ГХ
[Trend_O, Wave_O, FFT_GW_O, GravWave_Oxygen]=GravitationWave(O);
[Trend_N2, Wave_N2, FFT_GW_N2, GravWave_Nitrogen]=GravitationWave(N2);

way_WATS='D:\work\PhD_WORK\DE2\WATS\';
WATS_file_type='_de2_wats_2s_v01.asc';
% завантажуються дані приладу WATS
WATS=textread([way_WATS day WATS_file_type]); % whole way to the datafile
% файл даних причісується для зручності подальшої роботи
[K_wats]=WATS_data_transmission(WATS);

%% Vertical wind (Vz)
[WATS_Vz]=Vertical_wind_WATS(K_wats);

VerticalWind=WATS_Vz(:,12); % [m/s]
UT_WATS_VertWind=WATS_Vz(:,2); % [ms]
UT_WATS_Vz=round(UT_WATS_VertWind./1000); % [sec]
Temperature_Vz=WATS_Vz(:,6);

% Harmonization of data NACS and WATS by UT
[Vz_start]=Aria_WATS(UT_NACS_1sec(1), UT_WATS_Vz);
[Vz_end]=UT_WATS_end_point(UT_NACS_1sec(end), UT_WATS_Vz);

%Looking for breake poisn there
```

```

sampling_WATS_Vz=8;
[breake_points_Vz]=BreakePoints(UT_WATS_Vz(Vz_start:Vz_end), sampling_WATS_Vz);

if (length(breake_points_Vz(:,1))>1) &&
(breake_points_Vz(2,1)~=breake_points_Vz(1,1))
    Vz_end=Vz_start+breake_points_Vz(2,1)-1;
elseif (length(breake_points_Vz(:,1))==1) ||
(breake_points_Vz(2,1)==breake_points_Vz(1,1))
    Vz_end=Vz_end;
end

Vz=VerticalWind(Vz_start:Vz_end);
T_Vz=Temperature_Vz(Vz_start:Vz_end);
%Інтерполяція до семплінгу 1 секунда
[Vz_interpolated]=Naiquist_theorem(Vz, L_Vz, Length_Vz);
[T_Vz_interpolated]=Naiquist_theorem(T_Vz, L_Vz, Length_Vz);

%Селекція параметру в спектральні області ГХ
[Trend_Vz, wave_Vz, FFT_Vz, FFT_GW_Vz,
GravWave_Vz]=GravitationWave_Wind(Vz_interpolated);

%% Horizontal wind (Vy)
[WATS_Vy]=Horizontal_wind_WATS(K_wats);

HorizontalWind=WATS_Vy(:,12); % [m/s]
UT_WATS_HorizWind=WATS_Vy(:,2); % [ms]
UT_WATS_Vy=round(UT_WATS_HorizWind./1000); % [sec]
Temperature_Vy=WATS_Vy(:,6);
Latitude_WATS_Vy=WATS_Vy(:,16);

[Wy_start]=Aria_WATS(UT_NACS_1sec(1), UT_WATS_Vy);
[Wy_end]=UT_WATS_end_point(UT_NACS_1sec(end), UT_WATS_Vy);

UT_WATS_Vy_bp=UT_WATS_Vy(Wy_start:2:Wy_end);
sampling_WATS_Vy=8;
[breake_points_Vy]=BreakePoints(UT_WATS_Vy_bp, sampling_WATS_Vy);

if length(breake_points_Vy(:,1))>1
    Vy_end=Vy_start+breake_points_Vy(2,1)*2-1;
else
    Vy_end=Vy_end;
end

Vy=HorizontalWind(Vy_start:2:Vy_end);
Lat_Vy=Latitude_WATS_Vy(Vy_start:2:Vy_end);

[Wy_corr]=Vy_correction(Vy, Lat_Vy);

T_Vy=Temperature_Vy(Vy_start:Vy_end);
L_Vy=UT_WATS_Vy(Vy_end)-UT_WATS_Vy(Vy_start); % how many seconds lost
Length_Vy=length(Vy_corr);

[Wy_interpolated]=Naiquist_theorem(Vy_corr, L_Vy, Length_Vy);
UT_WATS_Vy_1sec=(UT_WATS_Vy(Vy_start):1:UT_WATS_Vy(Vy_end))';

%% dz
[dz, FFT_dz]=Vertical_displacement_dz(T_Vz_interpolated(1:length(UT_WATS_Vz_1sec)),
GravWave_Oxygen(s:e), GravWave_Nitrogen(s:e), length(s:e));

%% dp/p = (dO+dN2) / (trendO+trendN2)+dT/T

```

```

    % p=nkT: n - from NACS (each 1 sec); T - from WATS (each 8 sec)

dp_p=GravWave_Oxygen(s:e)+dT_T; % dn/n+dT/T

dp=k_Bolc.*(Trend_O(s:e).*dT(1:length(UT_WATS_Vz_1sec))+Trend_T_Vz(1:length(UT_WATS_V
z_1sec)).*Wave_O(s:e)); % k(ndT+Tdn)

%% NOISE calculate in frequencies aria

    Poit100km=round(2^16*7.8/100);% 100 km - bottom line of GW
    mN=mean(abs(FFT_GW_O(Poit100km:2^16-Poit100km)));
for i=1:2^16
    Noise(i)=mN;
end
    for i_noise=[1:Poit100km-1, 2^16-Poit100km+1:2^16]
        FFT_noise(i_noise)=mN;
    end
    for i_noise=Poit100km:2^16-Poit100km
        FFT_noise(i_noise)=FFT_GW_O(i_noise);
    end

    ifft_noise=ifft(FFT_noise);
        ifft_Oxygen=ifft(FFT_GW_O);
        for_persent_calcul=max(real(ifft_Oxygen));

% Histogramm of NOISE
        x=linspace(min(real(ifft_noise(1:L_Ox))),
max(real(ifft_noise(1:L_Ox))),100);

```

CALCULATspectral_parameters.m

На вхід програми подаються відфільтровані параметри термосфери, узгоджені по UT. На виході програма видає розраховані спектральні параметри ГХ та енергія ГХ.

```
%% H=kT/mg      wg=Cs*Kg;
%constants
R=8.32*1000; % gramm*m^2/mol*K*s^2
% k_Bolc=1.38*10^(-23); % Dj/K or kg*m2/c2*K
k_Bolc=1.38*10^(-16); % erg/K or g*cm2/c2*K

m_O=16; %gramm/mol
m_N2=28;%gramm/mol
g=9.8; % m/s2;
H_O=R*mean(T_Vz_interpolated)/(m_O*g); % [m]
H_N2=R*mean(T_Vz_interpolated)/(m_N2*g); % [m]
gamma=5/3; % gamma
wg=((1-1/gamma)*g/H_O)^(1/2); % 1/s
Tg=2*pi/(wg*60); % min
Kg=1000/(2*H_O); % [1/km]
Lg=2*pi/Kg; % [km]
Cs2=gamma*R*mean(T_Vz_interpolated)/m_O; % [m^2/s^2]
Cs=sqrt(Cs2); % [m/s]

%%За допомогою функції SpectraMin визначаються мінімуми амплітудних спектрів кожного
параметра та виділяються мінімуми, які зійшлися в певному невеликому інтервалі (в
межах однієї гармоніки)
SpectaMin=textread(['D:\work\PhD_WORK\' dayOrbit '\ ' dayOrbit
'_SpectraMinimum.txt']);
SpM_O=SpectaMin(1,:);
SpM_N2=SpectaMin(2,:);
SpM_dz=SpectaMin(3,:);
SpM_Vz=SpectaMin(4,:);
SpM_Vy=SpectaMin(5,:);
SpM_dp=SpectaMin(6,:);
SpM_T=SpectaMin(7,:);

%% O N2 dz,[m] Vz,[m/s] Vy,[m/s] dp/p
calc=[1 2 3 5];
for calcul=1:4
    a_O(calcul)=SpM_O(calc(calcul));
    a_O_km(calcul)=2^16*7.8/a_O(calcul);
    a_N2(calcul)=SpM_N2(calc(calcul)); a_dz(calcul)=SpM_dz(calc(calcul));
    a_Vz(calcul)=SpM_Vz(calc(calcul)); a_Vy(calcul)=SpM_Vy(calc(calcul));
    a_dp(calcul)=SpM_dp(calc(calcul)); a_T(calcul)=SpM_T(calc(calcul));
end

%% Виділяються хвильові пакети в усіх параметрах
[FFT_GWO_Aria, iFFT_GW_dO_O_Aria]=GravitationWave_Aria(FFT_GW_O, Trend_O, L_Ox,
a_O(i), a_O(i+1));
[FFT_GWN2_Aria, iFFT_GW_dN2_N2_Aria]=GravitationWave_Aria(FFT_GW_N2, Trend_N2, L_Ox,
a_N2(i), a_N2(i+1));
[FFT_dz_GW_Aria, iFFT_dz_Aria]=GravitationWave_Aria_Wind(FFT_dz, a_dz(i), a_dz(i+1));
% [m]
[FFT_Vz_GW_Aria, iFFT_Vz_GW_Aria]=GravitationWave_Aria_Wind(FFT_Vz, a_Vz(i),
a_Vz(i+1)); % [m/s]
[FFT_Vy_GW_Aria, iFFT_Vy_GW_Aria]=GravitationWave_Aria_Wind(FFT_Vy, a_Vy(i),
a_Vy(i+1)); % [m/s]
[FFT_dp_GW_Aria, iFFT_dp_GW_Aria]=GravitationWave_Aria_Wind(FFT_GW_dp, a_dp(i),
a_dp(i+1));
```

```

[FFT_dT_GW_Aria,iFFT_GW_dT_T_Aria]=GravitationWave_Aria(FFT_GW_T_Vz, Trend_T_Vz,
L_Vz, a_T(i), a_T(i+1));

%% Розраховуються енергетичні показники
dro_ro=(m_O.*iFFT_GWO_Aria(s:e)+m_N2.*iFFT_GWN2_Aria(s:e))./(m_O.*Trend_O(s:e)+m_N2.*
Trend_N2(s:e));
maxA_dro_ro(i)=max(abs(dro_ro));
concentrationGas=Trend_O(s:e)+Trend_N2(s:e); % 1/cm2
U(i)=3/2*max(concentrationGas)*k_Bolc*max(Trend_T_Vz(1:length(concentrationGas))); %
internal energy [erg]
E(i)=(maxA_dro_ro(i)^2)*U(i); % full energy [erg]
S(i)=max(abs(iFFT_Vz_GW_Aria(1:length(find(iFFT_Vz_GW_Aria)))))*100*U(i)*maxA_dro_ro(
i)*2/3; % energy flow [erg*cm/s]
V_grup_from_energy(i)=max(abs(iFFT_Vz_GW_Aria(1:length(find(iFFT_Vz_GW_Aria)))))/maxA
_dro_ro(i); % check out of Vgrup by another method m/s
Q(i)=S(i)/(2*H_O*100); % erg/s?

%% w=dVz(k)/dz(k)
w(i)=rms(abs(FFT_Vz_GW_Aria))/rms(abs(FFT_dz_GW_Aria)); % 1/s
T_minut(i)=2*pi/(w(i)*60); % min
W0(i)=w(i)/wg;

%% Kx
% Kx=2*pi/Lx;
Kx(i)=2*pi/Lx(i); % 1/km
qx(i)=Kx(i)/Kg;

dKx(i)=(1/l2-1/l1)*pi;

dqx(i)=dKx(i)/Kg;

%% Ky=(y*w*Vy)/(Cs2*dp)
FFT_dO_O=fft([var_O; zeros(NFFT-L_Ox,1)], NFFT);
FFT_dN2_N2=fft([iFFT_GW_dN2_N2_Aria; zeros(NFFT-L_Ox,1)], NFFT);
FFT_dT_T=fft([iFFT_GW_dT_T_Aria; zeros(NFFT-L_Vz,1)], NFFT);

Ky(i)=(gamma/Cs2)*w(i)*1000*(rms(abs(iFFT_Vy_GW_Aria(1:L_Vy)))/(rms(abs(var_O))+rms(a
bs(iFFT_GW_dT_T_Aria)))); % 1/km
qy(i)=Ky(i)/Kg;

% check out
check_K(i)=Ky(i)/Kx(i);
check_V(i)=rms(abs(iFFT_Vy_GW_Aria))/rms(abs(iFFT_Vz_GW_Aria));

%% Ly=2*pi/Ky
Ly(i)=2*pi/Ky(i); % km

%% Kh2=Kx^2+Ky^2
Kh2=Kx(i)^2+Ky(i)^2; % horisontal wave nomber, 1/km2
Kh(i)=sqrt(Kh2);
qh(i)=Kh(i)/Kg;

%% Lh=2*pi/Kh
Lh(i)=2*pi/Kh(i);

%% Kz2=(wg^2/w^2-1)*Kh2-Kg2
Kz2(i)=(wg^2/w(i)^2-1)*Kh2-Kg^2;
Kz(i)=sqrt(Kz2(i));
qz(i)=Kz(i)/Kg;

```

```

%% Lz=2*pi/Kz
Lz(i)=2*pi/Kz(i);

%% K=sqrt(Kh2+Kz2)
K(i)=sqrt(Kh2+Kz2(i));
q(i)=K(i)/Kg;

end

figure % DISPERSION ARIA
% create mathematic function
q_math=0.01:0.001:10;
W=q_math./sqrt(1+q_math.^2); % upper border condition
plot(q_math, W, '--k', 'LineWidth', 2); grid on
hold on
Wdiss=0.1*q_math.^(2/3); % dissipative bottom border condition
hold on
plot(q_math, Wdiss, '--k', 'LineWidth', 2);
hold on

ws=sqrt(1+q_math.^2); %normalaised accoustic
hold on
plot(q_math, ws, '--k', 'LineWidth', 2);

cs=q_math; % line of sound velocity
hold on
plot(q_math, cs, '--k', 'LineWidth', 2);

cg=q_math.*0.98; % line of sound velocity
hold on
plot(q_math, cg, '--k', 'LineWidth', 2);

% Errors in spectrum
for i=1:length(qh)
    d1=qh(i)-dqx(i);
    d2=qh(i)+dqx(i);
    line([qh(i) d1], [W0(i) W0(i)], 'Marker', '.', 'LineStyle', '-'); hold on
    line([qh(i) d2], [W0(i) W0(i)], 'Marker', '.', 'LineStyle', '-'); hold on
    if qh(i)<1
        dw0(i)=dqx(i);
        dw1=W0(i)-dw0(i);
        dw2=W0(i)+dw0(i);
        line([qh(i) qh(i)], [W0(i) dw1], 'Marker', '.', 'LineStyle', '-'); hold on
        line([qh(i) qh(i)], [W0(i) dw2], 'Marker', '.', 'LineStyle', '-'); hold on

    elseif qh(i)>1
        Vg(i)=qz(i)/q(i)^2; % km/sec

        if real(qz(i))==0
            Vg(i)=1/(1+qx(i)^2)^(3/2); % km/sec
        end

        dw0(i)=Vg(i)*dqx(i);
        dw1=W0(i)-dw0(i);
        dw2=W0(i)+dw0(i);
        line([qh(i) qh(i)], [W0(i) dw1], 'Marker', '.', 'LineStyle', '-'); hold on
        line([qh(i) qh(i)], [W0(i) dw2], 'Marker', '.', 'LineStyle', '-'); hold on
    end
    Vgrup_z(i)=(qh(i)*qz(i)/(1+q(i)^2)^(3/2))*Cs; % m/s
    Vgrup_h(i)=(1+qz(i)^2)/((1+q(i)^2)^(3/2))*Cs; % m/s
end
end

```

Функції:

WATS_data_transmission.m

Допомагає трансформувати файл даних до зручного для подальшої роботи вигляду.

BreakePoints.m

Визначає точки розривів в даних за UT

GravitationWave.m

Селектує хвильовий параметр в спектральній області ГХ

HilbertAndEnergy.m

Створює огинаючу просторовим хвильовим пакетам

Vy_correction.m

Коригує змінний відносно географічної широти додатній напрямок вісі параметра.

MinimumInSpectra.m

Визначає мінімуми в амплітудному спектрі.

Naiquist_theorem.m

Інтерполює функцію до заданого семплінгу

Vertical_displacement_dz.m

Обчислює величину вертикального зміщення атмосферного газу.

ДОДАТОК В

ФРАГМЕНТИ КАТАЛОГІВ ГХ ТА ОБРОБЛЕНИХ ДАНИХ СУПУТНИКА DE 2

Фрагмент Каталогу параметрів ГХ, який поповнюється по мірі обробки нових порцій експериментальних даних. В каталозі вказуються метадані орбітальних прольотів: номер орбітального витка (також дата прольоту, географічні координати та висота орбіти), UT, Н, масштаб довжин хвиль ГХ λ_g , масштаб хвильових чисел k_g , значення проекцій хвильового числа k та проекції нормованого хвильового числа q , частота Брента-Вяйсяля (та період) для відповідних умов атмосфери, несучі значення довжин хвиль, частот (періодів) та нормованих частот хвильових пакетів ГХ, півширина спектру за частотою, відповідно перерахована (Розділ 2), фазові та групові швидкості.

В загальних таблицях створені додатки з енергетичними параметрами, зазначенням геомагнітної активності та інтервалами пакетів в спектральній області (це та інше створено для зручності роботи оператора).

Orbit	UT, h	H, km	λ_g , km	k_g c _g , m/s	k _x	$\Delta q_x = \Delta k_x / k_g$	k _y	q _{hor}	k _z	q _z	q	ω_g , T _g , min	λ_{x0} , km	ω , c ⁻¹	W _o	T _o , min	ΔW	V _{phor} , m/s	V _{grz} , m/s
1982321 T014140				Nov., 17, 1982			Lat 9 – 0 – 90S – 68S		Alt 347 – 316 - 349			Long 105W – ...70E					K _p ,3h_index=1+; a _p ,index=5; F _{10.7} =158.0		
7099	1.73	64	802	0.0078	0.0062	0.21	0.0052	1.03	0.022	2.74	2.93	0.0078 13	1009	0.0026	0.33	40	0.07	323	98
					0.0105	0.33	0.0145	2.29	0.014	1.74	2.87		599	0.0059	0.75	18	0.07	329	144
					0.0170	0.49	0.0.116	2.63	i	i	1.87		370	0.0097	1.24	11	0.04	472	i
Data points from file (100:end (1714 points)))																			
a_0=[371 642 1065 1695]; a_N2=[395 699 1049 1706]; a_dz=[358 699 1079 1625]; a_Vz=[404 636 1070 1647]; a_Vy=[404 544 1021 1623]; a_dp=[384 687 1063 1705]; a_T=[384 689 1065 1702];																			
$k_y / k_x = [2.47 _ 0.89 _ 0.32]$; $V_y / V_z = [24.19 _ 5.34 _ 1.56]$, N ₂ /O=[2.48_3.03_2.88]=2.80																			
1982327 T164000				Nov., 23, 1982			Lat 19N – 0 – 90S – 52S		Alt 312 – 270 – 357 - 432			Long 25E - 22E					K _p ,3h_index=6+; a _p ,index=94; F _{10.7} =196.1		
7202	16.69	79	999	0.0063	0.0038	0.22	0.0013	0.64	0.026	4.12	4.17	0.0070 15	1657	0.0010	0.15	100	0.12	260	38
					0.0070	0.95	0.0011	1.12	0.020	3.11	3.30		901	0.0023	0.33	46	0.11	324	97
				1140	0.0144	1.52	0.0024	2.3	0.016	2.52	3.42		438	0.0046	0.65	23	0.17	313	147
Data points from file (1:end (2218 points)))																			
	E	a _{max}	S _z	Q	U		V _{gh}	V _{gz}	V _{gz} вимірювання			a_0=[248 369 766 1570]; a_N2=[279 387 765 1520]; a_dz=[275 378 760 1531]; a_Vz=[211 383 770 1533]; a_Vy=[271 362 721 1510]; a_dp=[290 358 739 1602]; a_T=[289 358 739 1603]; function Vy_correction. Change at 7 k=[i-1,k] to k=[i,k] Vz need correction by hand of point 214 (with mean 106.85) T_Vz need correction point 216 (mean 1759)							
1-1	2.9e-6	0.077	0.0883	5.6e-9	5e-4		260	38	452										
1-2	1.4e-6	0.054	0.0538	3.4e-9			295	97	565										
1-3	2.4e-7	0.022	0.0195	1.2e-9			185	147	1228										

Orbit	UT, h	H, km	λ_g , km	k_g c _g , m/s	k _x	$\Delta q_x = \Delta k_x/k_g$	k _y	q _{hor}	k _z	q _z	q	ω_g , T _g , min	λ_{x0} , km	ω , c ⁻¹	W _o	T _o , min	ΔW	V _{φhor} , m/s	V _{grz} , m/s
$k_y/k_x = [0.36_0.16_0.16]$; $V_y/V_z = [2.2_1.13_1.3]$, N ₂ /O=[1.05_2.49_1.71]=1.75																			
1982329 T142320				Nov., 25, 1982			Lat 34- 0- 90S – 73S		Alt 324-407			Long					K _{p_3h_index} =5+; a _{p_index} =56; F _{10.7} =164.8		
7232	14.89	73	912	0.0069	0.0056	0.33	0.0009	0.86	0.021	2.98	3.10	0.0074 14	1072	0.0019	0.26	54	0.33	327	81
					0.0116	0.54	0.0052	1.88	0.002	0.35	1.94		528	0.0064	0.87	16	0.05	494	70
					0.0246	1.30	0.0026	3.59	0.012	1.67	3.96		256	0.0065	0.88	16	0.14	261	96
Data points from file (1611:3727 (2116 points)))																			
a ₀ =[290 664 1271 2729]; a _{N2} =[295 661 1357 2749]; a _{dz} =[251 663 1221 2707]; a _{Vz} =[277 621 1249 2756]; a _{Vy} =[288 669 1297 2791]; a _{dp} =[282 654 1219 2745]; a _T =[281 653 1220 2747]; In Name of file after number should be 1, but not 0 Vy need correction by hand on point 221 (mean 450.2)																			
$k_y/k_x = [0.16_0.42_0.10]$; $V_y/V_z = [1.62_0.86_0.94]$, N ₂ /O=[1.25_2.82_1.76]=1.94																			

Orbit	UT, h	H, km	λ_g , km	k_g	k_x	$\Delta q_x = \Delta k_x/k_g$	k_y	q_{hor}	k_z	q_z	q	ω_g , T_g , min	λ_{x0} , km	ω , c ⁻¹	W_o	T_o , min	ΔW	$V_{\phi hor}$, m/s	V_{gr} , m/s
1982330 T224820				Nov., 26, 1982			Lat 42 – 0 – 71S		Alt 329 – 270 - 341			Long 75W – 82W					$Kp_{3h_index}=5-; a_{p_index}=39; F_{10.7}=168.8$		
7253	23.22	68	853	0.0074	0.0044	0.22	0.0020	0.65	$\frac{0.000}{5}$	0.06	0.66	0.0076 14	1436	0.0042	0.55	25	0.22	862	25
					0.0095	0.47	0.0107	1.94	i	i	i		662	0.0152	2.01	7	0.11	1064	i
					0.0151	0.30	0.0034	2.11	0.003	0.47	2.16		415	0.0067	0.89	16	0.03	434	77
Data points from file (1318:3000 (1683 points)))																			
$a_o=[223\ 489\ 1055\ 1409];$ $a_{N2}=[204\ 491\ 1064\ 1418]; a_{dz}=[202\ 490\ 1052\ 1497];$ $a_{Vz}=[264\ 448\ 1003\ 1412]; a_{Vy}=[226\ 490\ 977\ 1347];$ $a_{dp}=[280\ 462\ 1040\ 1515]; a_T=[280\ 463\ 1044\ 1518];$																			
$k_y/k_x=[5.36_0.82_0.14]; V_y/V_z=[4.10_1.55_1.02], N_2/O=[2.59_3.70_3.15]=3.15$																			
1982332 T042140				Nov., 28, 1982			Lat 46 – 0 – 69S		Alt 328 – 269 - 344			Long 155W – 162W					$Kp_{3h_index}=4-; a_{p_index}=22; F_{10.7}=160.3$		
7272	4.48	68	849	0.0074	0.0054	0.21	0.0018	0.77	0.011	1.46	1.32	0.0076 14	1160	0.0030	0.40	34	0.21	534	-164
					0.0113	0.58	0.0042	1.62	0.010	1.41	2.15		558	0.0052	0.68	20	0.18	434	-180
					0.0245	1.21	0.0045	3.36	0.020i	2.7i	2.04		257	0.0113	1.48	9	0.03	452	i
Data points from file (374:end (1710 points)))																			
$a_o=[313\ 568\ 1265\ 2719];$ $a_{N2}=[267\ 549\ 1280\ 2724]; a_{dz}=[294\ 544\ 1299\ 2728];$ $a_{Vz}=[297\ 574\ 1276\ 2696]; a_{Vy}=[296\ 580\ 1315\ 2710];$ $a_{dp}=[281\ 583\ 1309\ 2721]; a_T=[280\ 583\ 1308\ 2721];$																			
$k_y/k_x=[5.36_0.82_0.14]; V_y/V_z=[4.10_1.55_1.02], N_2/O=[2.59_3.70_3.15]=3.15$																			

Orbit	UT, h	H, km	λ_g , km	k_g	k_x	$\Delta q_x = \Delta k_x/k_g$	k_y	q_{hor}	k_z	q_z	q	ω_g , T_g , min	λ_{x0} , km	ω , c^{-1}	W_0	T_0 , min	ΔW	$V_{\phi hor}$, m/s	V_{gr} , m/s
1982346 T185500				Dec., 12, 1982			Lat 65N – 0 – 42S		Alt 271 – 294 – 384			Long 27W – 33W					$K_{p_3h_index}=30$; $a_{p_index}=15$; $F_{10.7}=251.1$		
7500	18.93																		
Data points from file (1:1600 (1600 points)))																			
$a_0=[]$;																			
$k_y/k_x = [2.69_0.48_0.16]$; $V_y/V_z = [6.22_1.60_0.67]$, $N_2/O=[2.86_2.96_2.98]=3.24$																			

Orbit	UT, h	H, km	λ_g , km	k_g	k_x	$\Delta q_x = \Delta k_x/k_g$	k_y	q_{hor}	k_z	q_z	q	ω_g, T_g, min	λ_{x0}, km	ω, c^{-1}	W_o	T_o, min	ΔW	$V_{\phi hor}, m/s$	$V_{gr}, m/s$
1982364 T005640				Dec., 30, 1982			Lat 26N – 90N – 86N		Alt 267 – 270 -			Long 46E – 43E – 139W -					$K_{p_3h_index}=4-;$ $a_{p_index}=22;$ $F_{10.7}=142.5$		
7771	0.96	54	674	0.0093	0.0064	0.31	0.0172	2.50	0.031	4.27	3.86	0.0085 12	980	0.0042	0.49	25	0.07	230	97
					0.0161	0.72	0.0077	2.53	0.007	1.31	2.05		391	0.0072	0.84	15	0.13	402	112
				936	0.0311	0.89	0.0051	5.13	0.025i	3.9i	2.04		202	0.0127	1.49	8	0.02	404	i
Data points from file (1:end (1105 points)))																			
	E	a_{max}	S_z	Q	U		V_{gh}	V_{gz}	V_{gz} вимірювання			$a_0=[283\ 760\ 1852\ 3205];$ $a_{N2}=[310\ 784\ 1827\ 3223];$ $a_{dz}=[320\ 798\ 1805\ 3210];$ $a_{Vz}=[232\ 690\ 1848\ 3202];$ $a_{Vy}=[189\ 777\ 1946\ 3190];$ $a_{dp}=[155\ 718\ 1856\ 3144];$ $a_T=[254\ 717\ 1847\ 3295];$ function Vy_correction. Change at 7 k=[i-1,k] to k=[i,k]							
1-1	2.4e-7	0.028	0.0005	4.4e-11	3.1e-4		230	97	29										
1-2	2.5e-7	0.028	0.0004	4e-11			402	112	26										
1-3	4.2e-8	0.012	0.0001	1.3e-11			404	-	49										
$k_y/k_x = [2.69_0.48_0.16];$ $V_y/V_z = [6.22_1.60_0.67],$ $N_2/O=[2.86_2.96_2.98]=3.24$																			

Orbit	UT, h	H, km	λ_g , km	k_g	k_x	$\Delta q_x = \Delta k_x/k_g$	k_y	q_{hor}	k_z	q_z	q	ω_g , T_g , min	λ_{x0} , km	ω , c ⁻¹	W _o	T _o , min	ΔW	V _{phor} , m/s	V _{gr} , m/s
1982365 T042320				Dec., 31, 1982			Lat 34N – 90N – 36N		Alt 257 – 273 - 341			Long 7W - 9W – 167E – 166E				K _{p_3h_index} =2+; a _{p_index} =9; F _{10.7} =134.4			
7789	4.43	53	668	0.0094	0.0045	0.16	0.0041	0.65	0.028	2.98	3.05	0.0086 12	1383	0.0017	0.20	61	0.16	284	54
					0.0103	0.45	0.0032	1.14	0.016	1.67	2.02		611	0.0044	0.51	24	0.19	405	1.5
				932	0.0208	0.67	0.0037	2.25	0.009i	0.95i	2.04		301	0.0085	0.99	12	0.05	402	i
Data points from file (1:end (1642 points)))																			
	E	a _{max}	S _z	Q	U		V _{gh}	V _{gz}	V _{gz} вимірювання		a ₀ =[250 489 1185 2206]; a _{N2} =[243 501 1248 2191]; a <sub_dz< sub="">=[249 479 1222 2194]; a_{Vz}=[222 576 1210 2201]; a_{Vy}=[202 649 1291 2189]; a<sub_dp< sub="">=[180 625 1261 2180]; a_T=[230 626 1235 2107];</sub_dp<></sub_dz<>								
1-1	5.4e-7	0.046	0.0007	6.5e-11	2.6e-4		278	54	19										
1-2	1.5e-6	0.076	0.0015	1.4e-10			307	155	15										
1-3	8.7e-7	0.058	0.0016	1.5e-10			8.4	-	27										

Orbit	UT, h	H, km	λ _g , km	k _g	k _x	Δq _x = Δk _x /k _g	k _y	q _{hor}	k _z	q _z	q	ω _g , T _g , min	λ _{x0} , km	ω, c ⁻¹	W _o	T _o , min	ΔW	V _{φhor} , m/s	V _{gr} , m/s
$k_y/k_x = [0.89_0.31_0.18]$; $V_y/V_z = [8.35_1.75_0.58]$; $N_2/O=[2.41\ 2.07\ 2.58]=2.47$																			
1982365 T072500				Dec., 31, 1982			Lat 22N – 90N – 72N		Alt 265 – 274 - 294			Long 52W – 56W – 122E					K _{p,3h_index} =10; a _{p_index} =4; F _{10.7} =134.4		
7791	7.43	52	659	0.0095	0.0054	0.18	0.0020	0.60	0.033	3.46	3.51	0.0086 12	1168	0.0014	0.17	73	0.18	248	40
					0.0116	0.47	0.0044	1.30	0.022	2.25	2.60		543	0.0040	0.47	26	0.16	325	125
				925	0.0219	0.61	0.0037	2.32	0.018	1.85	2.97		287	0.0064	0.74	16	0.13	289	129
Data points from file (1:end (1279 points))																			
	E	a _{max}	S _z	Q	U		V _{gh}	V _{gz}	V _{gz} вимірювання			a ₀ =[299 576 1307 2250]; a _{N2} =[255 539 1314 2252]; a <sub_dz< sub="">=[265 522 1312 2257]; a_{Vz}=[233 604 1252 2257]; a_{Vy}=[308 614 1305 2232]; a<sub_dp< sub="">=[200 573 1305 2276]; a_T=[235 574 1307 2279];</sub_dp<></sub_dz<>							
1-1	1.7e-6	0.074	0.0010	9e-11	3.1e-4		247	40	8										
1-2	1.1e-6	0.060	0.0011	1.1e-10			260	125	15										
1-3	1.7e-7	0.023	0.0004	3.6e-11			133	129	34										
$k_y/k_x = [0.38_0.38_0.17]$; $V_y/V_z = [6.96_2.39_0.86]$; $N_2/O=[3.26\ 2.36\ 2.97]=2.35$																			

Orbit	UT, h	H, km	λ_g , km	k_g	k_x	$\Delta q_x = \Delta k_x/k_g$	k_y	q_{hor}	k_z	q_z	q	ω_g , T_g , min	λ_{x0} , km	ω , c ⁻¹	W_o	T_o , min	ΔW	$V_{\phi hor}$, m/s	V_{gr} , m/s
1983003 T095320				Jan., 03, 1983			Lat 21S – 0 – 90N – 85N		Alt 305 – 250 – 285			Long 92W – 98W – 80E					Kp_3h_index=3+; ap_index=18; F10.7=136.2		
7839	9.9	51	640	0.0098	0.0049	0.14	7.4e-04	0.502	0.034	3.50	3.54	0.0088 12	1291	0.0012	0.14	88	0.14	243	
					0.0112	0.51	0.005	1.250	0.005i	0.5i	1.15		561	0.0072	0.82	15	0.15	587	
					0.0215	0.55	0.003	2.221	0.002	0.15	2.23		292	0.0080	0.91	13	0.02	366	
Data points from file (1:end (1724 points))																			
a_0=[285 507 1317 2189]; a_N2=[225 517 1328 2185]; a_dz=[233 511 1324 2204]; a_Vz=[217 517 1344 2203]; a_Vy=[290 538 1288 2238]; a_dp=[249 516 1350 2182]; a_T=[249 516 1350 2190]; function Vy_correction. Change at 7 k=[i-1,k] to k=[1,k]																			
$k_y/k_x = [0.15_0.44_0.15]$; $V_y/V_z = [1.97_1.08_0.57]$; $N_2/O = [4.66\ 2.47\ 2.67] = 3.31$																			
1983003 T113320				Jan., 03, 1983			Lat 60N – 90N – 50N		Alt 258 – 286 - 339			Long 120W – 121W – 57E -55E					Kp_3h_index=3+; ap_index=18; F10.7=136.2		
7841	11.76	51	647	0.0097	0.0078	0.52	0.0044	0.924	0.026	2.63	2.79	0.0087 12	802	0.0027	0.31	38	0.52	303	
					0.0192	0.65	0.0059	2.064	0.006	0.61	2.15		328	0.0076	0.87	14	0.09	379	
					0.0346	0.95	0.0032	3.580	0.012	1.24	3.79		181	0.0080	0.91	13	0.08	229	
Data points from file (656:end (1042 points))																			
a_0=[229 1046 2070 3564]; a_N2=[247 1028 2076 3537]; a_dz=[254 1021 2083 3530]; a_Vz=[257 1031 2057 3554]; a_Vy=[224 1103 2085 3587]; a_dp=[252 1036 2058 3547]; a_T=[246 1036 2056 3547];																			
$k_y/k_x = [0.56_0.31_0.09]$; $V_y/V_z = [3.05_1.09_0.77]$; $N_2/O = [3.21\ 2.48\ 2.97] = 3.29$																			

Orbit	UT, h	H, km	λ_g , km	k_g	k_x	$\Delta q_x = \Delta k_x / k_g$	k_y	q_{hor}	k_z	q_z	q	ω_g , T_g , min	λ_{x0} , km	ω , c ⁻¹	W_o	T_o , min	ΔW	$V_{\phi hor}$, m/s	V_{gr} , m/s	
1983004 T185000				Jan., 04, 1983			Lat		Alt			Long					$Kp_{3h_index}=3$; $a_{p_index}=12$; $F_{10.7}=138.2$			
7861	18.98	63	788	0.008	0.0051	0.24	0.0049	1.150	0.020	3.6		0.0079 13	1232	0.0027	0.31	43	0.24	347		
					0.0100	0.37	0.0065	1.426	0.019	2.3			630	0.0076	0.49	27	0.11	328		
					0.0248	1.48	0.0039	3.836	0.015i	2.2i			254	0.0080	1.16	11	0.04	365		
Data points from file (456:end (1253 points))																				
a_0=[261 569 1053 2977]; a_N2=[265 554 1058 3032]; a_dz=[268 608 1059 2961]; a_Vz=[286 620 1047 3006]; a_Vy=[251 510 976 2968]; a_dp=[343 756 1007 2987]; a_T=[346 600 1008 2987]; function Vy_correction. Change at 7 k=[i-1,k] to k=[i,k]																				
$k_y / k_x = [0.95_0.65_0.16]$; $V_y / V_z = [7.14_2.97_0.84]$; $N_2 / O = [1.57\ 2.45\ 2.02] = 1.75$																				

Orbit	UT, h	H, km	λ _g , km	k _g	k _x	Δq _x = Δk _x /k _g	k _y	q _{hor}	k _z	q _z	q	ω _g , T _g , min	λ _{x0} , km	ω, c ⁻¹	W _o	T _o , min	ΔW	V _{φhor} , m/s	V _{gr} , m/s
1983005 T143640				Jan., 05, 1983			Lat 23S – 0 – 90N – 39N		Alt 294 – 262 – 295 - 365			Long 174W – 180 – 2W – 4W					K _{p,3h_index} =30; a _{p_index} =15; F _{10.7} =154.6		
7874	15.17	54	678	0.0093	0.0047	0.16	0.0030	0.604	0.016	1.8	1.87	0.0085 12	1324	0.0024	0.28	43	0.16	434	105
					0.0115	0.58	0.0073	1.477	0.006	0.6	1.61		544	0.0066	0.78	16	0.14	486	130
				939	0.0229	0.65	0.0064	2.564	0.016i	1.8i	1.89		275	0.0102	1.22	10	0.03	430	i
Data points from file (1834:end (2454 points))																			
	E	a _{max}	S _z	Q	U		V _{gh}	V _{gz}	V _{gz} вимірювання						a _O =[266 506 1373 2351]; a _{N₂} =[253 506 1396 2376]; a _{dz} =[249 490 1354 2364]; a _{V_z} =[259 481 1352 2335]; a _{V_y} =[234 483 1297 2367]; a _{dp} =[258 516 1353 2357]; a _T =[213 474 1353 2411];				
1-1	2.8e-6	0.081	0.0502	4.6e-9	4.3e-4		407	105	262										
1-2	1.6e-6	0.061	0.0846	7.8e-9			195	130	777										
1-3	1.6e-7	0.020	0.0108	1e-9			-191	–	988										
k _y /k _x =[0.62_0.63_0.28]; V _y /V _z =[3.73_1.37_0.81]; N ₂ /O=[1.60 2.76 2.34]=2.05																			

1983031 T141140				Jan., 31, 1983			Lat 23S - 90S - 0 - 8N		Alt 287 - 257 - 278 - 284			Long 7W - 10W - 168E - 162E					K _{p,3h_index} =30; a _{p_index} =15; F _{10.7} =161.9		
8286	14.36	69	867	0.0072	0.0047	0.24	0.0012	0.669	0.023	3.2	3.28	0.0075 14	1331	0.0015	0.20	71	0.24	304	
					0.0113	0.66	0.0022	1.590	0.016	2.2	2.73		558	0.0041	0.54	26	0.20	357	
					0.0212	0.71	0.0045	3.094	0.017i	2.3i	1.93		297	0.0104	1.38	10	0.02	479	
Data points from file (448:end (2457 points))																			
														a_0=[244 524 1308 2140]; a_N2=[210 568 1321 2144]; a_dz=[223 571 1320 2143]; a_Vz=[244 568 1309 2153]; a_Vy=[231 549 1349 2149]; a_dp=[270 562 1354 2151]; a_T=[269 540 1295 2150]; function Vv correction. Change at 7 k=[i-1,kl to k=[i,kl					
k _y / k _x = [0.24_0.19_0.21]; V _y / V _z = [3.33_1.66_0.59]; N ₂ / O = [2.15 1.72 1.78] = 1.80																			

Фрагмент каталогу опрацьованих даних супутника DE 2 (включає дані для оператора по роботі з файлами супутника DE 2 із зазначенням орбітальних витків та їх характеристик, що увійшли до того чи іншого файлу)

NACS 1981

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
25 Aug	237T032140	12.5			549	386		12175647	3.3	137	135	55	90		320	1	542
		0.3			386	420	516			-48	-52	90	0	-18		543	2164
	237T050000	12.5			548	385		18039671	5.0	112	110	55	90		321	1	543
		0.5			385	421	516			-71	-77	90	0	-18		544	2163
	237T143820	12.4			698	380		52791760	14.7	-33	-36	27	90		?	1	985
		0.4			380	428	730			142	134	90	0	-51		986	3049
	237T180140	12.4			545	378		64943674	18.04	-84	-85	53	90		329	1	556

NACS 1982

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
31 Oct	304T004320	8.3	8.4		436	547		2652806	0,74	109	107	42	90		6835	1	751
	-	20.3			547	554		3403787	0,95	-75	-78	90	29		6835	752	1728
	T052000	8.3			415	549		19259563	5,35	39	37	34	90		6838	1	879
-	-	20.1	20.3		549	503	324	20138551	5,59	-146	-155	90	0	-90	6838	880	3693
	-	8.2			324	297		22971515	6,38	23	20	-90	-26		6838	3694	4583
-	T094320	8.3			299	334	550	35100617	9,75	-27	-33	-24	0	90	6840/1	1	1771
	-	20.2			550	522		36871626	10,24	145	141	90	11		6841	1772	3038
	T130140	8.2	8.4		388	550		46971603	13,05	-76	-78	23	90		6843	1	1040
-	-	20.2	20.3		550	500	322	48027614	13,34	98	88	90	0	-90	6843	1041	3827
	-	8.1	8.2		322	291		50859646	14,13	-99	-95	-90	-38		6843	3828	4602
	T174140	8.2			410	551		63820842	17,73	-146	-149	30	90		6846	1	930
	-	20.1			551	563		64761842	17,99	28	26	90	42		6846	931	1713
	T191820	8.2	8.4		442	551		69580823	19,33	-170	-171	42	90		6847	1	758
-	-	20.2			551	497	320	70338825	19,54	5	-5	90	0	-90	6847	759	3570
	-	8.1			320	308		73169832	20,32	173	170	-90	-18		6847	3571	4643
01 Nov	305T002320	20.2			561	495	366	1468850	0,41	-67	-73	40	0	-61	6850	1	1598
	T013140	8.2			455	533		5548792	1,54	96	100	46	90		6851	1	688

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	20.2			533	544		6246782	1,74	-88	-91	90	27		6851	689	1706
	T034820	20.2			418	319		13812675	3,84	-118		-35	-90		6852	1	841
	-	8.2			319	297		14653663	4,07	56	54	-90	-31		6852	842	1726
	T060640	8.2			414	554		22036749	6,12	27	24	30	90		6854	1	943
	-	20.1	20.2		554	562		22979751	6,38	-158	-160	90	42		6854	944	1715
	T073820	8.2			415	554		27612775	7,67	4	1	30	90		6855	1	919
	-	19.5	20.2		554	569		28555786	7,93	169	178	90	74		6855	920	1153
	T091000	8.2	8.3		404	554		33124840	9,20	-19	-22	26	90		6856	1	1000
-	-	20.2			554	491	409	34132693	9,48	155	148	90	0	-37	6856	1001	3020
	T115320	8.2			298	343	452	42836798	11,90	-60	-67	-70	0	43	6857	1	1695
	T143640	20.2			430	316		52724917	14,65	79	76	-27	-90		6859	1	956
	-	8.1	8.2		316	294		53688929	14,91	-106	-108	-90	-39		6859	957	1718
	T161000	20.2			431	316		58291846	16,19	55	53	-26	-90		6860	1	974
	-	8	8.2		316	294		59265856	16,46	-131	-132	-90	-39		6860	975	1735
	T183000	8.2			427	555		66692944	18,53	-159	-162	33	90		6862	1	890
	-	20.1			555	555		67591950	18,78	15	13	90	39		6862	891	1719
	T205140	20.2			403	315		75203922	20,89	-15	-17	-39	-90		6863	1	789
	-	8.1			315	305		75992926	21,11	160	158	-90	-26		6863	790	1734
	T231320	8.2			472	556		83668973	23,24	129	127	49	90		6865	1	652
	-	20.1	20.2		556	484	396	84320971	23,42	-54	-62	90	0	-41	6865	653	2684
	-	8.2			460	553		962	0,00	119	117	48	90		6850	2685	3354
	-	20.1	20.2		553	518		670960	0,19	-65	-69	90	12		6850	3355	4609
18																	
02 Nov	306T034820	8.1			443	557		13821040	3,84	60	63	38	90		6868	1	828
	-	20.1			557	548		14649031	4,07	-124	-127	90	35		6868	829	1715
	T073820	20.1	20.2		430	313		27604894	7,67	-177	179	-23	-90		6870	1	1018
	-	8.1			313	294		28622883	7,95	-2.5	-4	-90	-43		6870	1019	1718
	T091140	20.1			429	313		33180867	9,22	159	156	-23	-90		6871	1	1017
	-	8.1			313	295		34197867	9,50	-27		-90	-43		6871	1018	1720
	T102000	20.1			571	480	407	37316869	10,37	142	135	67	0	-33	6872	1	1596
	T130320	8.1			414	558		47084787	13,08	-78	-82	25	90		6874	1	1018
	-	20.1			558	479	398	48102790	13,36	96	88	90	0	-37	6874	1019	3037
	T160820	8.1			414	558		58228156	16,17	-125	-128	25	90		6876	1	1026
	-	20			558	559		59254160	16,46	48	47	90	47		6876	1027	1724

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T174140	8.1			414	559		63805132	17,72	-148	-150	25	90		6877	1	1017
	-	20.1			559			64830139	18,01	26	24	90	47		6877	1018	1715
	T200640	20.1	20.2		393	310		72437192	20,12	-4	-6	-38	-90		6878	1	786
	-	8.1			310	309		73223198	20,34	171	168	-90	-27		6878	787	1723
	T213820	20.1			393	310		78004231	21,67	-28	-30	-38	-90		6879	1	794
	-	8.1			310			78798236	21,89	148	144	-90	-27		6879	795	1730
	T231140	20.1			391	310		83589119	23,22	-51	-53	-38	-90		6880	1	783
	-	8.1			310			84372108	23,44	124	121	-90	-27		6880	784	1721
03 Nov	307T002320	20.1			552	474	350	1501447	0,42	-69	-75	42	0	-60	6881	1	1585
	T021640	20.1			398	309		8277260	2,30	-97	-75	-34	-90		6882	1	845
	-	8.1			309	357	560	9122237	2,53	78	68	-90	0	90	6882/3	846	3583
	-	20	20.1		560	536		11880161	3,30	-113	-116	90	32		6883	3584	4520
	T060820	8.1			448	560		22172751	6,16	24	22	36	90		6885	1	856
	-	19.8	20.1		560	542		23028745	6,40	-164	-162	90	36		6885	857	1714
	T072820	8.1			337	358	560	27028004	7,51	4	-1	-11	0	90	6885/6	1	1568
	-	20	20.1		560	541		28603988	7,95	176	174	90	36		6886	1569	2427
	T091140	8.1			419	560		33140943	9,21	-21	-25	24	90		6887	1	1037
	-	20	20.1		560	470	390	34177933	9,49	153	146	90	0	-36	6887	1038	3043
	T115500	8	8.1		294	360	493	43028764	11,95	-63	-69	-59	0	52	6888	1	1699
	T135000	8	8.2		421	561		49869161	13,85	-91	-93	25	90		6890	1	1032
	-	20	20.1		561	468	308	50901175	14,14	83	73	90	0	-90	6890	1033	3826
	-	8			308	305		53715213	14,92	-108	-110	-90	-36		6890	3827	4634
	T183140	8			451	561		66757325	18,54	-162	-164	35	90		6893	1	867
	-	20	20.1		561	466	307	67624330	18,78	13	3	90	0	-90	6893	868	3652
	-	8			307	320		70437347	19,57	-178	178	-90	-24		6893	3653	4641
	T231320	8	8.1		484	562		83661305	23,24	127	125	47	90		6896	1	685
	-	20			562	566		84346299	23,43	-56	-57	90	61		6896	686	1150
37																	
04 Nov	308T035000	8	8.1		465	562		13861328	3,85	58	57	39	90		6899	1	807
	-	20			562	531		14668321	4,07	-126	-129	90	33		6899	808	1723
	T052320	8			466	562		19437273	5,40	35	32	40	90		6900	1	804
	-	20			562	569		20241265	5,62	-149	-150	90	73		6900	805	1062
	T073320	20			452	305		27309195	7,59	-178	177	-3	-90		6901	1	1316

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	8			305	317		28625181	7,95	-4	-7	-90	-28		6901	1317	2240
	T104320	20			410	304		38733332	10,76	134	131	-21	-90		6903	1	1038
	-	7.9			304	302		39771320	11,05	-51	-53	-90	-44		6903	1039	1720
	T121640	20			409	304		44309270	12,31	111	108	-21	-90		6904	1	1035
	-	7.8			304	302		45344258	12,60	-76		-90	-44		6904	1036	1721
	T135140	20	20.1		400	304		49941288	13,87	87	84	-25	-90		6905	1	977
	-	8			304	306		50918285	14,14	-97	-99	-90	-40		6905	978	1721
	T152320	20			409	323		55445275	15,40	64	61	-21	-70		6906	1	738
	T174320	8			450	509		63901498	17,75	-151	-152	32	55		6908	1	374
	T175320	8			536	563		64484498	17,91	-153		68	90		6908	1	344
	-	19.9	20		563	540		64828497	18,01	24	22	90	41		6908	345	1132
	T191640	8			447	563		69452492	19,29	-174	-177	30	90		6909	1	949
	-	19.9	20		563	539		70401491	19,56	1	-1	90	41		6909	950	1735
	T205140	8			471	564		75165485	20,88	162	159	39	90		6910	1	810
	-	19.9	20		564	526		75975484	21,10	-22	-25	90	33		6910	811	1716
	T222320	8			471	564		80733437	22,43	139	136	39	90		6911	1	814
	-	19.9			564	525		81547428	22,65	-45	-48	90	33		6911	815	1721
05 Nov	309T004500	20			366	303		2781640	0,77	-76	-78	-40	-90		6912	1	745
	-	7.9			303	327		3526630	0,98	99	96	-90	-24		6912	746	1723
	T021820	19.9	20		365	302		8357561	2,32	-99	-102	-41	-90		6913	1	742
	-	7.8	7.9		302	328		9099551	2,53	74	73	-90	-24		6913	743	1724
	T060640	7.9			454	564		22077426	6,13	23	20	31	90		6915	1	933
	-	19.8	19.9		564	536		23011417	6,39	-163	-164	90	41		6915	934	1719
	T091140	7.9	8		455	564		33221175	9,23	-23	-26	31	90		6918	1	936
	-	19.9			564	448	357	34157176	9,49	151	143	90	0	-43	6918	937	3038
	T112820	19.9	20		416	301		41373323	11,49	122	118	-13	-90		6919	1	1160
	-	7.9			301	378	564	42533329	11,81	-63	-73	-90	0	90	6919/0	1161	3896
	-	19.9			564	551		45302343	12,58	104	103	90	52		6920	3897	4501
	T160820	19.9			398	301		58205797	16,17	52	48	-21	-90		6922	1	1045
	-	7.8	7.9		301	307		59250792	16,46	-134	-135	-90	-44		6922	1046	1724
	T183140	7.9			476	565		66764759	18,55	-164	-166	38	90		6924	1	827
	-	19.9			565	526		67591755	18,78	12	9	90	38		6924	828	1666
	T194140	7.9			303	381	527	70973740	19,71	178	171	-51	0	60	6924/5	1	1717

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T205140	19.9			365	300		75157668	20,88	-18	-21	-36	-90		6925	1	807
	-	7.9			300	327		75964653	21,10	157	154	-90	-29		6925	808	1723
	T222500	19.9			364	300		80733559	22,43	-42	-44	-37	-90		6926	1	803
	-	7.8	7.9		300	327		81536543	22,65	133	130	-90	-29		6926	804	1718
06 Nov	310T015000	7.9			299	383	508	6725315	1,87	86	79	-60	0	51	6928	1	1699
	T030000	19.9			387	300		10853501	3,01	-111	-114	-24	-90		6929	1	998
	-	7.9			300	310		11851501	3,29	63	62	-90	-44		6929	999	1682
	T043140	19.9			386	300		16429505	4,56	-134	-137	-24	-90		6930	1	978
	-	7.8	7.9		300	313		17422505	4,84	40	38	-90	-41		6930	979	1705
	T095320	7.9			411	565		35645695	9,90	-35	-39	10	90		6934	1	1265
	-	19.8			565	557		36910689	10,25	138		90	62		6934	1266	1719
	T112500	7.9			411	565		41213514	11,45	-58		10	90		6935	1	1269
	-	19.8			565	557		42482510	11,80	115	114	90	62		6935	1270	1718
	T125820	7.8	7.9		411	565		46781495	12,99	-81	-85	10	90		6936	1	1271
	-	19.8			565	557		48052490	13,35	92	91	90	62		6936	1272	1723
	T143140	7.8	7.9		411	565		52349475	14,54	-104	-109	10	90		6937	1	1251
	-	19.8			565	559		53624471	14,90	69	68	90	65		6937	1252	1656
	T161000	7.8	7.9		470	565		58285516	16,19	-129	-132	33	90		6938	1	911
	-	19.8			565	522		59196505	16,44	46	43	90	40		6938	912	1721
	T174140	7.8			460	565		63789782	17,72	-152	-155	29	90		6939	1	966
	-	19.7	19.8		565	529		64766787	17,99	22	20	90	44		6939	967	1704
	T194000	19.8			553	433	298	70829820	19,67	-2	-10	59	0	-90	6940	1	2294
	-	7.8			298	351		73134833	20,32	167	164	-90	-19		6940	2295	3361
	T231000	19.8	19.9		351	298		83501633	23,19	-55	-56	-38	-90		6942	1	775
	-	7.8			298			84276638	23,41	121		-90	-87		6942	776	809
07 Nov	311T012820	7.8			479	565		5341688	1,48	91	88	35	90		6944	1	873
	-	19.6	19.8		565	512		6222694	1,73	-96		90	36		6944	874	1739
	T043140	7.8			461	565		16364765	4,55	45	41	27	90		6946	1	998
	-	19.8			565	528		17364779	4,82	-140	-142	90	44		6946	999	1730
	T060500	7.8			472	565		22005843	6,11	21	18	32	90		6947	1	929
	-	19.8			565			22934856	6,37	-163		90	88		6947	930	958
	T130000	19.8	20.1		395	298		46853853	13,01	97		-13	-90		6951	1	1157

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	7.8			298	397	565	48010869	13,34	-88	-98	-90	0	90	6951/2	1158	3865
	-	19.7	19.8		565	538		50787909	14,11	80	78	90	52		6952	3866	4473
	T165500	7.8	8.2		471	565		60965010	16,93	-141	-140	30	90		6954	1	965
	-	19.8			565	495		61930012	17,20	33	30	90	31		6954	966	1917
	T204820	19.8	19.9		360	297		74941993	20,82	-20	-21	-29	-90		6956	1	918
	-	7.7	7.8		297	400	565	75859982	21,07	155	145	-90	0	90	6956/7	919	3698
	-	19.7	19.8		565	508		78639950	21,84	-36	-39	90	37		6957	3699	4540
76																	
08 Nov	312T001820	7.7	7.8		313	402	553	1173848	0,33	107	99	-52	0	71	6958	1	1893
	T014820	7.7	7.8		304	402	553	6565844	1,82	84	76	-63	0	71	6959	1	2078
	T031820	7.7			299	403	543	12013845	3,34	61	53	-72	0	63	6960	1	2078
	T045140	7.7			300	403	543	17581846	4,88	38	30	-71	0	63	6961	1	2078
	T075500	7.7			297	405	531	28598056	7,94	-8	-16	-80	0	55	6963	1	2075
	T092820	7.7			297	405	531	34149070	9,49	-31	-39	-81	0	55	6964	1	2094
	T110000	7.6			297	406	524	39670084	11,02	-56		-84	0	51	6965	1	2078
	T140500	7.7			297	407	517	50741984	14,09	-101	-108	-89	0	47	6967	1	2067
	T153640	7.7			297	407	518	56309983	15,64	-124	-132	-89	0	47	6968	1	2084
	T174000	7.7			477	564		63670004	17,69	-154	-157	29	-90		6970	1	970
	-	19.7			564	514		64648001	17,96	21	19	-90	44		6970	971	1712
	T191500	7.7			502	565		69405069	19,28	-178	180	39	90		6971	1	812
	-	19.7			565	411	316	70217071	19,50	-2	-10	90	0	-53	6971	813	3049
	T213500	19.7			335	297		77798085	21,61	-33	-35	-38	-90		6972	1	773
	-	7.7			297	354		78571087	21,83	143	140	-90	-27		6972	774	1707
	T235500	7.7			509	537		86157152	23,93	112	111	42	57		6974	1	243
	-	19.8			326	297		151	0,00	-68	-69	-50	-90		6958	244	843
	-	7.7			297	341		600147	0,17	108	106	-90	-30		6958	844	1735
09 Nov	313T012820	7.7			512	564		5342124	1,48	89	86	43	90		6975	1	752
	-	19.7			564	479		6094120	1,69	-95	-98	90	30		6975	753	1718
	T030000	7.7			504	564		10846096	3,01	66	63	39	90		6976	1	779
	-	19.6	19.7		564	487		11663150	3,24	-118	-121	90	33		6976	780	1687
	T043140	7.7			504	564		16414124	4,56	43	40	39	90		6977	1	818
	-	19.6	19.7		564	487		17232119	4,79	-142	-144	90	33		6977	819	1719
	T060140	7.7			478	564		21798095	6,06	20	64	27	90		6978	1	1004

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	19.6			564	559		22802089	6,33	-165		90	77		6978	1005	1214
	T074320	7.7			544	564		27901030	7,75	-5	-6	61	90		6979	1	469
	-	19.6	19.7		564	511		28370033	7,88	172	169	90	45		6979	470	1189
	T090820	7.7			477	564		32925065	9,15	-26	-30	27	90		6980	1	1000
	-	19.6			564	404	297	33939072	9,43	148		90	0	-90	6980	1001	3741
	-	7.6			297	350		36722092	10,20	-43	-46	-90	-32		6980	3742	4617
	T121640	7.7			510	563		44286053	12,30	-74	-76	41	90		6982	1	770
	-	19.6			563	525		45077066	12,52	101	100	90	53		6982	771	1363
	T135000	7.6			512	563		49870145	13,85	-97	-88	42	90		6983	1	775
	-	19.6			563	476		50645158	14,07	78	75	90	31		6983	776	1726
	T152320	7.6	7.7		518	563		55485237	15,41	-120	-122	45	90		6984	1	728
	-	19.6			563	466		56213249	15,61	55	52	90	27		6984	729	1729
	T165640	7.6	7.7		520	563		61062510	16,96	-144	-146	45	90		6985	1	719
	-	19.6			563	467		61781508	17,16	32	29	90	27		6985	720	1726
	T183140	7.6	7.7		539	563		66814385	18,56	-168	-169	57	90		6986	1	536
	-	19.6			563	437		67350384	18,71	9	5	90	15		6986	537	1714
	T204640	19.6	19.7		336	297		74838369	20,79	-21	-24	-33	-90		6987	1	849
	-	7.6			297	419	563	75698367	21,03	154	151	-90	0	90	6987	850	3629
	-	19.6			563	481		78486526	21,80	-38	-40	90	34		6988	3630	4523
10 Nov	314T004000	7.6			521	562				100	98	45	90		6990	1	721
	-	19.6			562	465		3223173	0,90	-84	-87	90	28		6990	722	1702
	T015000	7.6			329	421	549	6621113	1,84	82	75	-49	0	63	6990	1	1725
	T025820	19.6	19.7		329	297		10766309	2,99	-115	-117	-36	-90		6991	1	803
	-	7.6			297	360		11569303	3,21	61	58	-90	-29		6991	804	1720
	T043000	19.6			330	297		16309264	4,53	-138	-141	-35	-90		6992	1	828
	-	7.6			297	361		17137258	4,76	38	35	-90	-29		6992	829	1745
	T060140	19.6			340	297		21774220	6,05	-161	-164	-28	-90		6993	1	930
	-	7.6			297	347		22704212	6,31	14	12	-90	-37		6993	931	1725
	T073320	19.6			347	297		27278175	7,58	176	173	-24	-90		6994	1	994
	-	7.5	7.6		297	423	561	28272167	7,85	-9	-19	-90	0	90	6994/5	995	3761
	-	19.6			561	496		31064020	8,63	159	157	90	42		6995	3762	4525
	T103500	19.6	19.7		368	297		38230238	10,62	130	127	-12	-90		6996	1	1177
	-	7.6			297	302		39407245	10,95	-56		-90	-78		6996	1178	1358

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T143000	7.6			483	561		52294643	14,53	-108	-111	25	90		6999	1	1039
	-	19.6			561	505		53333636	14,81	66	64	90	48		6999	1040	1719
	T160320	7.6			480	561		57837605	16,07	-131	-135	23	90		7000	1	1064
	-	19.5	19.6		561	505		58901598	16,36	43	41	90	48		7000	1065	1740
	T173820	7.6			500	561		63542566	17,65	-155	-158	32	90		7001	1	927
	-	19.5	19.6		561	488		64469560	17,91	20	17	90	41		7001	928	1719
	T191140	7.6			516	560		69230527	19,23	-179	178	40	90		7002	1	788
	-	19.5	19.6		560	390	297	70036486	19,45	-4	-13	90	0	-90	7002	789	3562
	-	7.5	7.6		297	387		72810514	20,23	165	161	-90	-18		7002	3563	4642
	T230500	19.6			320	298		83165617	23,10	-57	-60	-38	-90		7004	1	779
	-	7.5			298	372		83944611	23,32	118	115	-90	-27		7004	780	1725
11 Nov	315T003820	19.4	19.6		314	298		2398573	0,67	-81	-83	-42	-90		7005	1	713
	-	7.2	7.6		298	428	560	3111568	0,86	91	85	-90	0	90	7005/6	714	3491
	-	19.5			560	387	374	5905546	1,64	-96	-102	90	0	-6	7006	3492	4998
	T094820	19.5	19.6		354	298		35373344	9,83	141	138	-14	-90		7011	1	1137
	-	7.5			298	433	559	36510353	10,14	-44	-54	-90	0	90	7011/2	1138	3915
	-	19.5			559	508		39307377	10,92	124	122	90	52		7012	3916	4515
	T134140	19.5			383	299		51845482	14,40	78	68	1	0	-90	7014	1	1364
	-	7.5			299	367		53210493	14,78	-114	-117	-90	-32		7014	1365	2238
	T173500	19.5	19.6		332	298		63374731	17,60	24	22	-25	-90		7016	1	968
	-	7.5			298	377		64342732	17,87	-161	-163	-90	-27		7016	969	1910
12 Nov	316T025140	19.5			326	299		10397676	2,89	-115	-118	-27	-90		7022	1	940
	-	7.5			299	376		-		60	57	-90	-29		7022	940	1855
	T040000	19.5			534	376	295	14470597	4,02	-132	-141	69	0	-67	7023	1	2083
	T053320	19.5			533	375	295	20030490	5,56	-155	-164	69	0	-66	7024	1	2078
	T070320	19.4	19.5		545	374	297	25462289	7,07	-178	173	78	0	-58	7025	1	2088
	T083500	19.4	19.4		544	374	297	31030585	8,62	158	150	78	0	-57	7026	1	2052
	T105140	19.5			300			39158579	10,88	126		-90			7027	1	7
	-	7.4			300	442	533	39165579	10,88	-56	-64	-90	0	45	7027	8	2073
	T131320	19.4			545	372	297	47701652	13,25	88	80	79	0	-56	7029	1	2044
	T144640	19.4			541	371	295	53310740	14,81	65	57	77	0	-59	7030	1	2083
	T162000	19.4			541	371	295	58870814	16,35	42	34	77	0	-58	7031	1	2086

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T173140	7.4	7.5		494	554		63157832	17,54	-156	-159	23	90		7032	1	1060
	-	19.4			554	469		64228836	17,84	19		90	41		7032	1061	1844
	T190820	7.4			530	554		69031006	19,18	180	178	43	90		7033	1	763
	-	19.4	19.5		554	369	301	69794008	19,39	-5	-14	90	0	-90	7033	764	3494
	-	7.4			301	356		72556878	20,15	164	162	-90	-44		7033	3495	4185
	T210140	19.4			518	444		75782835	21,05	-28	-30	63	31		7034	1	509
	T223500	19.4			518	368	294	81342762	22,60	-52	-60	64	0	-73	7035	1	2084
130																	
13 Nov	317T003140	19.4			317	301		1934868	0,54	-81	-84	-29	-90		7036	1	917
	-	7.3	7.4		301	386		2851859	0,79	93	91	-90	-28		7036	918	1846
	T141820	19.4			359	303		51593709	14,33	72	67	-1	-90		7045	1	668
	-	7.3	7.4		303	342		52929705	14,70	-115	-116	-90	-57		7045	669	923
	T173000	19.4			318	303		63070923	17,52	24	21	-24	-90		7047	1	984
	-	7.2	7.4		303	382		64054938	17,79	-162	-164	-90	-33		7047	985	1838
	T190140	19.4	19.5		319	303		68622046	19,06	0	-1	-23	-90		7048	1	997
	-	7.3	7.4		303	382		69619049	19,34	175	173	-90	-34		7048	998	1845
	T203640	7.4			555	548		77633074	21,56	143		68	90		7050	1	356
	-	19	19.3		548	446		77989075	21,66	-43	-42	90	36		7050	357	1210
14 Nov	318T003000	7.3	7.4		527	548		1870976	0,52	98	96	37	90		7052	1	847
	-	19.3			548	422		2717968	0,75	-86	-89	90	27		7052	848	1836
	T014000	7.3			354	455	543	6062937	1,68	81	74	-51	0	49	7052	1	1563
	T041820	19.3	19.4		315	304		15614939	4,34	-139	-142	-24	-90		7054	1	986
	-	7.3			304	456	489	16600940	4,61	36	30	-90	0	16	7054	987	2606
	T080820	7.3	7.4		496	546		29398908	8,17	-17	-20	19	90		7057	1	1107
	-	19.3			546	541		30542923	8,48	157		90	85		7057	1108	1193
	T094140	7.3			496	546		34958980	9,71	-40	-44	18	90		7058	1	1148
	-	19.3			546	467		36106995	10,03	134	132	90	47		7058	1149	1837
	T104500	19.3			299	305		38735029	10,76	125		-81	-90		7058	1	127
	-	7.1	7.3		305	459	528	38862031	10,80	-59	-64	-90	0	37	7058	128	2079
	T141820	7.3			486	545		51559065	14,32	-109	-113	13	90		7061	1	1240
	-	19.3			545	487		52799080	14,67	39	63	90	52		7061	1241	1846
	T155320	7.3	7.4		500	545		57239132	15,90	-133	-136	20	90		7062	1	1123
	-	19.3			545	459		58362146	16,21	41	39	90	45		7062	1124	1844

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T172640	7.3			506	544		62846273	17,46	-156	-160	23	90		7063	1	1080
	-	19.3			544	451		63926276	17,76	18	16	90	42		7063	1081	1847
	T234320	7.3			543			85495084	23,75	109		48	90		7067	1	683
	-	19.3			543	524		86178079	23,94	-75		90	76		7067	684	905
	-	7.3			309	361		77	0,00	105	104	-84	-47		7051	906	1470
15 Nov	319T085640	7.2	7.3		531	541		32294793	8,97	-30	-32	36	90		7073	1	848
	-	19.2	19.3		541	344	309	33155786	9,21	145	136	90	0	-90	7073	849	3556
	-	7.2			309	467	540	35906764	9,97	-46	-53	-90	0	44	7073	3557	5628
	T133320	7.2	7.3		524	540		48894661	13,58	-99	-102	31	90		7076	1	950
	-	19.2	19.3		540	343	310	49844653	13,85	76	67	90	0	-90	7076	951	3664
	-	7.2			310	468	534	52593632	14,61	-116	-123	-90	0	38	7076	3665	5649
	T225500	7.2			546	537		82575322	22,94	120	118	50	90		7082	1	644
	-	19.1	19.3		537	339	311	83219309	23,12	-64	-73	90	0	-90	7082	645	3375
	-	7.2			311	352		85966256	23,88	105	104	-90	-61		7082	3376	3809
	-	19.3			524	348	293	248	0,00	-75	-82	76	0	-43	7067	3810	5644
16 Nov	320T032820	7.2			524	536		12535327	3,48	52	49	30	90		7085	1	971
	-	19.2			536	419		13506306	3,75	-133	-136	90	35		7085	972	1843
	T050000	7.2			523	536		18087206	5,02	28	25	29	90		7086	1	964
	-	19.2			536	419		19068185	5,30	-156	-159	90	35		7086	965	1825
	T071000	19.2			352	330		25910180	7,20	176	175	8	-3		7087	1	88
	-	7.2			345	348		27726181	7,70	-12		-66	-64		7087	89	119
	T084820	19.2			316	313		31767184	8,82	151	148	-12	-90		7088	1	1168
	-	7.2			313	383		32936185	9,15	-34	-36	-90	-45		7088	1169	1826
	T102000	19.2			316	313		37327188	10,37	128	124	-12	-90		7089	1	1158
	-	7.1	7.2		313	474	495	38498188	10,69	-58	-63	-90	0	10	7089	1159	2706
	T132640	19.2			311	314		48486574	13,47	82	78	-14	-90		7091	1	1135
	-	7.1	7.2		314	389		49621577	13,78	-104	-106	-90	-43		7091	1136	1846
	T150140	19.2			303	314		54151593	15,04	58	55	-21	-90		7092	1	1031
	-	7	7.2		314	403		55182596	15,33	-129		-90	-36		7092	1032	1851
	T202320	7.1	7.2		508	532		73511606	20,42	157	153	17	90		7096	1	1150
	-	19.1			532	331	291	74685584	20,75	-29	-38	90	0	-64	7096	1151	3476
	T220320	7.1	7.2		543	531		79511494	22,09	132	130	44	90		7097	1	734

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	19.1			531	371		80245481	22,29	-52	-56	90	19		7097	735	1848
	T233640	7.1	7.2		542	530		85063478	23,63	109	107	44	90		7098	1	719
	-	19.1			530	455		85806468	23,84	-75	-77	90	53		7098	720	1313
	-	7.2			352	414		460	0,00	104	102	-61	-28		7082	1314	1800
17 Nov	321T014140	19.1	19.2		347	316		6231455	1,73	-103	-107	9	0	-90	7099	1	1479
	-	7.1			316	349		7710425	2,14	70	69	-90	-68		7099	1480	1813
	T045500	19.1			301	317		17766472	4,94	-151	-155	-19	-90		7101	1	1066
	-	7.1			317	405		18832463	5,23	24	21	-90	-38		7101	1067	1860
	T062820	19.1			302	317		23318426	6,48	-174	-178	-18	-90		7102	1	1075
	-	7.1			317	405		24393418	6,78	0	-2	-90	-38		7102	1076	1861
	T075140	19.1			355	327	317	28407505	7,89	164	159	13	0	-90	7103	1	1546
	-	7	7.1		317	346		29953508	8,32	-23		-90	-70		7103	1547	1840
	T084640	7.1			518	528		31679511	8,80	-29	-33	22	90		7104	1	1081
	-	19.1			528	327	317	32773514	9,10	145	136	90	0	-90	7104	1082	3820
	-	6.6	7.1		317	409		35512519	9,86	-53	-48	-90	-37		7104	3821	4636
	T115000	7.1			511	527		42719410	11,87	-75	-79	17	90		7106	1	1146
	-	19	19.1		527	439		43894425	12,19	97		90	48		7106	1147	1809
	T132320	7.1	7.3		509	527		48263479	13,41	-98	-100	15	90		7107	1	1193
	-	19.1			527	439		49456494	13,74	75	74	90	48		7107	1194	1848
	T145820	7.1	7.2		520	526		53935550	14,98	-122	-125	23	90		7108	1	1081
	-	19.1			526	420		55016564	15,28	52	50	90	41		7108	1082	1849
	T163000	7.1			539	526		59766681	16,60	-146	-149	40	90		7109	1	810
	-	19.1			526	422		60576681	16,83	29	27	90	42		7109	811	1564
	T180500	7.1			533	526		65215696	18,12	-169	-172	33	90		7110	1	922
	-	19	19.1		526	392		66137703	18,37	6	3	90	31		7110	923	1846
	T202320	19.1	19.2		289	320		73527757	20,42	-24	-26	-29	-90		7111	1	909
	-	7.1			320	485		74436764	20,68	151	146	-90	0		7111	910	2294
	T230820	19.1			421	322	295	83554661	23,21	-66	-72	43	0	-67	7113	1	1634
170																	
18 Nov	322T010500	19.1			285	321		4060681	1,13	-95	-96	-46	-90		7114	1	657
	-	7	7.1		321	486	524	4717677	1,31	81	71	-90	0	90	7114/5	658	3460
	-	19	19.1		524	321	285	7539660	2,09	-110	-118	90	0	-47	7115	3461	5546
	T053820	19	19.1		290	322		20423582	5,67	-163	-166	-25	-90		7117	1	973

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	7			322	405		21396576	5,94	12	10	-90	-42		7117	974	1699
	T102500	19	19.1		287	323		37535716	10,43	125	124	-54	-90		7120	1	540
	-	7	7.1		323	488	520	38075716	10,58	-58	-68	-90	0	90	7120/1	541	3348
	-	19			520	318	294	40899706	11,36	110	104	90	0	-20	7121	3349	5024
	T145140	19	19.1		299	324		53607774	14,89	58	55	-13	-90		7123	1	1146
	-	7			324	404		54753784	15,21	-128	-129	-90	-44		7123	1147	1837
	T180140	19			285	325		64999828	18,06	10		-31	-90		7125	1	872
	-	7	7.1		325	490	518	65871834	18,30	-174	176	-90	0	90	7125/6	873	3681
	-	19			518	331		68696852	19,08	-6	-10	90	8		7126	3682	4947
	T223000	19			334	315	326	81047956	22,51	-56	-61	10	0	-90	7128	1	1483
	-	6.7	7		326	492	516	82549946	22,93	112	106	-90	0	90	7128/9	1484	4284
	-	18.9	19		516	363		85374928	23,72	-76	-79	90	24		7129	4285	5310
	-	7.1			418	459		922	0,00	102	101	-34	-14		7113	5311	5627
19 Nov	323T031640	19			285	327		11895969	3,30	-128	-131	-28	-90		7131	1	930
	-	7			327	436		12825953	3,56	47	44	-90	-31		7131	931	1838
	T044820	19			288	327		17358874	4,82	-151	-154	-21	-90		7132	1	1027
	-	6.9			327	339		18385856	5,11	23		-90	-83		7132	1028	1138
	T075140	19			295	282		28351796	7,88	162	161	-13	-34		7134	1	318
	T105500	19			301	329		39383719	10,94	116	112	-7	-90		7136	1	1207
	-	6.9	7.6		329	495	512	40619551	11,28	-70	-71	-90	0	90	7136/7	1208	4034
	-	18.9	19		512	446		43446550	12,07	98		90	59		7137	4035	4519
	T140140	19			297	330		50543885	14,04	70	66	-10	-90		7138	1	1192
	-	6.9	7		330	468		51735901	14,37	-116	-120	-90	-15		7138	1193	2339
	T170820	18.9	19		287	330		61807981	17,17	23	20	-20	-90		7140	1	1036
	-	6.8	7		330	496	510	62851994	17,46	-163	-172	-90	0	90	7140/1	1037	3856
	-	18.9			510	412		65680026	18,24	6	4	90	47		7141	3857	4534
	T222140	6.9	7		450	509		80938236	22,48	123	119	1	90		7143	1	1416
	-	18.9			509	307	282	82354223	22,88	-64	-71	90	0	-43	7143	1417	3442
20 Nov	324T011820	6.9			401	498	533	4815026	1,34	80	75	-52	0	28	7145	1	1263
	T022500	18.9			283	333		8815932	2,45	-117	-119	-24	-90		7146	1	982
	-	6.8	6.9		333	438		9799909	2,72	58	56	-90	-34		7146	983	1843
	T035820	18.9			282	333		14416154	4,00	-140	-143	-27	-90		7147	1	941

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	5.7	6.9		333	444		15357138	4,27	18	32	-90	-30		7147	942	1851
	T070140	18.9			289	333		25335970	7,04	174	171	-14	-90		7149	1	1137
	-	6.9			333	420		26472951	7,35	-11	-13	-90	-44		7149	1138	1844
	T123140	6.9			540	504		45175987	12,55	-88	-91	40	90		7153	1	783
	-	18.9			504	303	335	45974986	12,77	87	78	90	0	-90	7153	784	3510
	-	6.7	6.9		335	437		48701985	13,53	-106		-90	-36		7153	3511	4337
	T144640	18.9			282	291		53248120	14,79	58	56	-22	-56		7154	1	506
	T161820	18.9			282	336		58792164	16,33	35	31	-21	-90		7155	1	1025
	-	6.9			336	437		59817172	16,62	-151	-153	-90	-37		7155	1026	1838
	T175140	18.9			282	336		64336207	17,87	11	8	-21	-90		7156	1	1037
	-	6.8	6.9		336	436		65373215	18,16	-174	-176	-90	-38		7156	1038	1843
	T192500	18.9			280	337		69983251	19,44	-12	-51	-27	-90		7157	1	930
	-	6.8	6.9		337	450		70931258	19,70	163	160	-90	-31		7157	931	1843
	T205820	18.9			280	337		75535356	20,98	-35	-38	-26	-90		7158	1	952
	-	6.8	6.9		337	449		76487344	21,25	140	137	-90	-31		7158	953	1854
	T223140	18.9			279	338		81152281	22,54	-59	-61	-30	-90		7159	1	892
	-	6.8	6.9		338	455		82044270	22,79	116	113	-90	-29		7159	893	1838
	T234320	18.9			408	300	289	85496425	23,75	-77	-81	50	0	-10	7160	1	884
	-	6.9			490	513		390	0,00	100	99	-4	0	10	7144	885	1105
	T235500	18.9			308	289		86175396	23,94	-80	-80	5	0	-10	7160	1	225
	-	6.9			490	289		390	0,00	100	99	-4	0	10	7144	226	447
21 Nov	325T005320	6.9			540	500		3320301	0,92	85	83	45	90		7161	1	712
	-	18.8			500	389		4032282	1,12	-99	-101	90	43		7161	713	1446
	T035320	6.8	7		533	499		14128506	3,92	40	38	26	90		7163	1	1017
	-	18.8			499	376		15145483	4,21	-145	-147	90	38		7163	1018	1822
	T052820	6.8	6.9		536	498		19776376	5,49	17	14	32	90		7164	1	926
	-	18.8	18.9		498	299	340	20702355	5,75	-168	-178	90	0	-90	7164	927	3638
	-	6.8			340	465		23428292	6,51	0	-3	-90	-24		7164	3639	4643
	T082820	6.8	6.9		523	496		30624126	8,51	-29	-33	15	90		7166	1	1192
20 0	-	18.8			496	399		31816098	8,84	145	143	90	49		7166	1193	1841
	T143500	6.8	6.9		500	494		52543054	14,60	-120	-125	-4	0	90	7169/0	1	1489
	-	18.8			494	409		54040350	15,01	52	51	90	53		7170	1490	2063

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T170000	18.8			279	343		61288367	17,02	23	20	-21	-90		7171	1	1032
	-	6.8			343	507	493	62320369	17,31	-162	-172	-90	0	90	7171/2	1033	3711
	-	18.8			493	392		65151376	18,10	6	4	90	47		7172	3712	4382
	T200640	18.8			277	343		72471393	20,13	-23	-26	-26	-90		7173	1	960
	-	6.8			343	456		73431395	20,40	147	149	-90	-32		7173	961	1861
	T214140	18.8	18.9		279	344		78208491	21,72	-47	-49	-38	-90		7174	1	762
	-	6.8			344	507	492	78986485	21,94	128	118	-90	0	90	7174/5	763	3567
	-	18.6	18.8		492	294	285	81819465	22,73	-65	-71	90	0	-47	7175	3568	5644
22 Nov	326T043640	6.8			535	534		16688333	4,64	28	27	30	55		7179	1	391
	T091140	6.8			519	487		33981570	9,44	-43	-44	69	90		7182	1	326
	-	18.5	18.8		487	291	348	34307570	9,53	131	125	90	0	-90	7182	327	3027
	-	6.7	6.8		348	455		37027570	10,29	-57	-60	-90	-34		7182	3028	3885
	T113000	18.8			278	348		41464570	11,52	105	101	-15	-90		7183	1	1118
	-	6.7	6.8		348	509	486	42582570	11,83	-81	-90	-90	0	90	7183/4	1119	3905
	-	18.7			486	461		45417427	12,62	87		90	78		7184	3906	4094
	T161320	18.7	18.8		280	349		58480647	16,24	34	32	-39	-90		7186	1	766
	-	6.6	6.8		349	510	484	59246647	16,46	-151	-160	-90	0	90	7186/7	767	3575
	-	18.7			484	290	286	62080648	17,24	18	10	90	0	-48	7187	3576	5642
	T191820	18.7	18.8		279	350		69576652	19,33	-12	-14	-38	-90		7188	1	779
	-	6.7			350	481		70355652	19,54	163	160	-90	-21		7188	780	1847
	T231500	6.7	6.8		528	481		83768627	23,27	108	107	57	90		7191	1	529
	-	18.7			481	428		84297620	23,42	-75		90	66		7191	530	877
	T233640	18.7			356	288	288	85112610	23,64	-77	-83	37	0	-49	7191	1	1288
	-	6.8			534	537		594	0,00	98		29	34		7176	1289	1373
23 Nov	327T030140	18.7			282	352		11000615	3,06	-129	-131	-42	-90		7193	1	725
	-	6.6	6.7		352	511	516	11725609	3,26	47	42	-90	0	4	7193	726	2193
	T043500	18.7			281	299		16536570	4,59	-152		-41	-58		7194	1	245
	T044500	18.7			348	512		17241564	4,79	-154	-	-88	0	4	7194/5	1	1484
	T060500	18.7	18.8		276	353		21951526	6,10	-174	-176	-31	-90		7195	1	881
	-	6.7			353	507		22832519	6,34	0	-4	-90	-4		7195	881	2215
	T073640	18.7			276	354		27495535	7,64	162	160	-31	-90		7196	1	891
	-	6.7			354	507		28386541	7,89	-22	-27	-90	-4		7196	891	2221

№	Им'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row
	T103640	18.7			278	354		38303599	10,64	117	113	-10	-90		7198	1 1189
	-	6.6	6.7		354	513	477	39492606	10,97	-69	-79	-90	0	90	7198/9	1190 3998
	-	18.7			477	397		42328482	11,76	99	98	90	56		7199	3999 4527
	T164000	18.7	18.8		312	285	356	60071734	16,69	26	21	19	0	-90	7202	1 1635
	-	6.6	6.7		356	432		61706749	17,14	-162	-163	-90	-52		7202	1636 2218
	T194640	18.7			297	357		71304834	19,81	-21	-26	11	0	-90	7204	1 1498
	-	6.6			357	447		72811848	20,23	152	150	-90	-45		7204	1499 2195
	T214820	6.6	6.7		389	514	473	78600779	21,83	128	119	-74	0	90	7205/6	1 2600
	-	18.6			473	341		81200765	22,56	-63	-66	90	35		7206	2601 3451
24 Nov	328T012500	6.6	6.7		530	472		5184723	1,44	75	72	45	90		7208	1 721
	-	18.6			472	283	277	5905721	1,64	-109	-114	90	0	-7	7208	722 2183
	T025640	6.6	6.7		525	470		10848708	3,01	51	49	52	90		7209	1 610
	-	18.6			470	277		11458707	3,18	-133	-138	90	0	-6	7209	611 2071
	T042820	6.6			531	470		16208695	4,50	28	26	40	90		7210	1 802
	-	18.5			470	280		17010693	4,73	-157	-161	90	0	-2	7210	803 2197
	T060140	6.6			530	469		21760999	6,04	5	20	40	90		7211	1 803
	-	18.6			469	280		22563994	6,27	-179	176	90	0	-2	7211	804 2201
	T073140	6.6	6.7		531	469		27175967	7,55	-17	-19	31	90		7212	1 939
	-	18.6			469	288		28114961	7,81	158	153	90	6		7212	940 2215
	T090500	6.6	6.7		531	468		32736933	9,09	-40	-43	31	90		7213	1 931
	-	18.6			468	288		33667927	9,35	134	130	90	7		7213	932 2199
	T112000	18.6			272	362		40864884	11,35	105	102	-19	-90		7214	1 1070
	-	6.6			362	444		41934878	11,65	-80	-82	-90	-49		7214	1071 1681
	T151820	6.6			526	465		55168704	15,32	-134	-136	46	90		7217	1 706
	-	18.5	18.7		465	280	363	55874706	15,52	41	33	90	0	-90	7217	707 3402
	-	6.6			363	505		58589714	16,27	-150	-154	-90	-10		7217	3403 4642
	T182320	6.6	6.8		526	464		66265018	18,41	179		45	90		7219	1 713
	-	18.6			464	279	364	66978023	18,61	-5	-14	90	0	-90	7219	714 3412
	-	6.6			364	504		69692038	19,36	164	160	-90	-11		7219	3413 4639
	T212820	6.6			526	462		77352953	21,49	133	131	44	90		7221	1 719
	-	18.6			462	279	365	78082946	21,69	-51	-60	90	0	-90	7221	720 3416
	-	6.5	6.6		365	504		80794920	22,44	118	113	-90	-12		7221	3417 4634

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
25 Nov	329T011820	6.6			467	516	462	6299039	1,75	69	61	-38	0	90	7223/4	1	2029
	-	18.5	18.6		462	278	293	8353014	2,32	-121	-128	90	0	-49	7224	2030	4077
	T050820	6.6			527	460		18560893	5,16	17	15	35	90		7226	1	860
	-	18.6			460	277	368	19433882	5,40	-175	-176	90	0	-90	7226	861	3556
	-	6.5	6.6		368	495		22147835	6,15	2	-2	-90	-20		7226	3557	4638
	T052820	18.5	18.6		406	277	367	19791832	5,50	-168	-176	67	0	-90	7226	1	2356
	-	6.5	6.6		367	495		22147835	6,15	2	-2	-90	-20		7226	2357	3438
	T081320	6.6			526	458		29712843	8,25	-29	-31	38	90		7228	1	823
	-	18.5			458	452		30535844	8,48	147		90	87		7228	824	865
	T084820	18.5	18.6		288	277	369	31736845	8,82	143	137	11	0	-90	7228	1	1511
	-	6.5			369	499		33247847	9,24	-45	-48	-90	-17		7228	1512	2643
	T111820	6.5	6.6		526	457		40791951	11,33	-75	-78	37	90		7230	1	843
	-	18.5	18.6		457	276	370	41634965	11,57	100	91	90	0	-90	7230	844	3524
	-	6.5			370	499		44349012	12,32	-91	-94	-90	-18		7230	3525	4646
	T142320	6.5			525	455		51897275	14,42	-121	-124	37	90		7232	1	838
	-	18.5			455	276	370	52736278	14,65	54	51	90	0	-90	7232	839	3458
	-	6.5			370	499		55448206	15,40	-138	-141	-90	-18		7232	3459	4575
	T211820	18.5			278	372		76785152	21,33	-45	-48	-33	-90		7236	1	850
	-	6.5			372	518	452	77647146	21,57	130	120	-90	0	90	7236/7	851	3646
	-	18.5			452	324		80485126	22,36	-62	-64	90	35		7237	3647	4485
26 Nov	330T002500	18.5			288	372		1632074	0,45	-95	-94	-43	-90		7238	1	693
	-	6.4	6.5		372	518	451	2355068	0,65	83	74	-90	0	90	7238/9	694	3445
	-	18.5			451	274	300	5183048	1,44	-108	-116	90	0	-51	7239	3446	5565
	T050000	18.5			275	375		18073125	5,02	-161	-163	-29	-90		7241	1	907
	-	6.5			375	518	448	18993128	5,28	14	4	-90	0	90	7241/2	908	3745
	-	18.1	18.5		448	355		21831137	6,06	177	-180	90	50		7242	3746	4355
	T085000	6.5			526	448		31889133	8,86	-39	-42	24	90		7244	1	1024
	-	18.5			448	286		32929144	9,15	136	132	90	14		7244	1025	2160
	T115320	6.5			525	446		42857251	11,90	-85	-89	16	90		7246	1	1169
	-	18.4	18.5		446	273	276	44026263	12,23	89	83	90	0	-29	7246	1170	2956
	T150140	6.5			523	509		54193350	15,05	-132	-133	31	51		7248	1	288
	T153140	18.5			319	272	378	55960352	15,54	40	34	35	0	-90	7248	1	1874
	-	6.5			378	457		57834354	16,07	-156	-150	-90	-51		7248	1875	2478

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T185320	18.4	18.5		281	379		68097517	18,92	-10	-12	-35	-90		7250	1	834
	-	6.4			379	519	444	68931501	19,15	165	161	-90	0	90	7250/1	835	3649
	-	18.4			444	271	292	71768446	19,94	-27	-34	90	0	-44	7251	3650	5664
	T224820	6.4	6.5		511	441		82200246	22,83	111	109	48	90		7253	1	665
	-	18.4	18.5		441	271	380	82865233	23,02	-73	-82	90	0	-90	7253	666	3287
	-	6.4			380	481		85574426	23,77	96	93	-90	-37		7253	3288	4113
	-	18.5			396	387		407	0,00	-86	-86	66	63		7238	4114	4173
27 Nov	331T025820	6.4			451	519	488	10801163	3,00	48	40	-56	0	64	7255	1	1898
	T044320	6.4			514	439		17089402	4,75	22	16	-9	0	90	7256/7	1	1567
	-	18.4			439	341		18656382	5,18	-166	-167	90	48		7257	1568	2208
	T060140	6.4			438	519	461	21777341	6,05	2	-7	-63	0	79	7257	1	2261
	T073320	6.4			437	519	461	27313270	7,59	-21	-30	-64	0	79	7258	1	2255
	T090140	6.4			397	520	513	32553258	9,04	-43	-51	-84	0	43	7259	1	2000
	T103320	6.4			396	520	507	38088272	10,58	-67	-75	-85	0	48	7260	1	2095
	T120640	6.4			406	520	503	43705285	12,14	-90	-98	-80	0	51	7261	1	2074
	T134000	6.4			407	520	504	49257350	13,68	-113	-121	-80	0	50	7262	1	2054
	T151320	6.4			415	520	497	54857481	15,24	-136	-144	-76	0	55	7263	1	2064
	T164500	6.3	6.4		414	519	497	60393515	16,78	-160	-168	-77	0	55	7264	1	2086
	T182500	6.4			466	520	502	66361551	18,43	176	176	-50	0	51	7265	1	1589
	T193140	18.4			280	387		70409625	19,56	-21	-19	-32	-90		7266	1	880
	-	6.4			387	497		71289618	19,80	154	151	-90	-29		7266	881	1838
	T210640	18.4			314	388		76300580	21,19	-45	-46	-55	-90		7267	1	536
	-	6.3	6.4		388	520	432	76836576	21,34	131	122	-90	0	90	7267/8	537	3375
	-	18.4			432	402		79675554	22,13	-71	-62	90	77		7268	3376	3579
260																	
28 Nov	332T003500	6.3	6.4		470	520	496	2176486	0,60	83	76	-48	0	53	7269	1	1618
	T042140	18.3			384	268	344	15761414	4,38	-154	-162	71	0	-69	7272	1	2083
	T072320	18.3			411	345		26665454	7,41	160	159	83	54		7274	1	436
	T092140	18.3			272	392		33769545	9,38	131	135	-21	-90		7275	1	1037
	-	6.3			392	511		34806558	9,67	-54	-58	-90	-16		7275	1038	2202
	T105500	18.3	18.4		277	394		39409617	10,95	107	105	-27	-90		7276	1	935
	-	6.3			394	520	426	40352629	11,21	-77	-87	-90	0	90	7276/7	936	3736
	-	17.9	18.3		426	267	285	43191537	12,00	85	84	90	0	-34	7277	3737	5589

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T150640	18.3			402	267	327	54432663	15,12	44	36	80	0	-59	7279	1	2087
	T163140	6.4			437	424		59736712	16,59	-156		84	90		7280	1	92
	-	18.3			424	267	394	-		21	12	90	0	-90	7280	93	2778
	-	6.3			394			62535718	17,37	-170		-90	-89		7280	2779	2784
	T181320	18.3			375	267	352	65697724	18,25	-2	-10	69	0	-71	7281	1	2073
	T194640	18.3			376	266	352	71232766	19,79	-25	-34	69	0	-70	7282	1	2094
	T212000	18.3			364	266	360	76849671	21,35	-49	-57	65	0	-74	7283	1	2075
	T225140	18.3			365	266	360	82385791	22,88	-72	-80	65	0	-74	7284	1	2083
29 Nov	333T005140	18.3			307	397		3209770	0,89	-102		-47	-90		7285	1	652
	-	6.3			397	519	420	3861758	1,07	74	64	-90	0	90	7285/6	653	3476
	-	18.1			420	311		6700706	1,86	-119	-120	90	41		7286	3477	4225
	T035500	18.3			294	399		14177568	3,94	-148	-150	-39	-90		7287	1	755
	-	6.3	6.4		399	519	419	14951674	4,15	28	19	-90	0	90	7287/8	756	3582
	-	18.3			419	326		17789663	4,94	-164	-166	90	49		7288	3583	4207
	T065640	18.3			279	399		25097634	6,97	166	163	-27	-90		7289	1	944
	-	6.2	6.3		399	519	417	26041630	7,23	-18	-28	-90	0	90	7289/0	945	3773
	-	18.2	18.3		417	352		28878619	8,02	149		90	62		7290	3774	4206
	T100000	18.3			273	399		36097590	10,03	120	117	-22	-90		7291	1	1032
	-	6.2			399	480		37129586	10,31	-65	-67	-90	-48		7291	1033	1694
	T125320	18.2	18.3		282	265	400	46513779	12,92	77	71	24	0	-90	7293	1	1665
	-	6.1	6.2		400	515		48218802	13,39	-113	-115	-90	-12		7293	1666	2884
	T152820	6.2	6.3		500	414		55804797	15,50	-142	-144	39	90		7295	1	795
	-	18.1			414	265	401	56599813	15,72	33	25	90	0	-90	7295	796	3457
	-	6.2			401	482		59306867	16,47	-158	-159	-90	-47		7295	3458	4128
	T182320	6.2			519	412		66274138	18,41	174	175	0	90		7296	1	1390
	-	18.2			412	265	267	67688135	18,80	-12	-17	90	0	-10	7296	1391	2902
	T210500	6.2	6.3		405	519	411	75954118	21,10	133	123	-89	0	90	7298/9	1	2748
	-	18.2			411	265	403	78776113	21,88	-59	-68	90	0	-90	7299	2749	5428
	-	6.2			403	426		81481107	22,63	110		-90	-80		7299	5429	5587
30 Nov	334T013000	18.2			310	404		5505703	1,53	-112	-114	-46	-90		7301	1	664
	-	6.2			404	518	516	6169699	1,71	63	57	-90	0	14	7301	665	2311
	T051820	6.2			503	478		19193913	5,33	10	9	33	54		7304	1	334

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T052500	6.2			471	410		19592781	5,44	8	7	58	90		7304	1	487
	-	18.1			399	264	375	20152789	5,60	-175	176	86	0	-76	7304	488	2919
	T090640	18.2	18.3		280	407		32912978	9,14	133	130	-26	-90		7306	1	971
	-	6.2			407	516		33883992	9,41	-52	-56	-90	-11		7306	972	2205
	T104000	18.2			279	408		38442059	10,68	110	106	-25	-90		7307	1	985
	-	6.2			408	504		39427074	10,95	-75	-78	-90	-31		7307	986	1902
	T143140	6.2			502	404		52426093	14,56	-128	-131	31	90		7310	1	924
	-	18.1			404	264		53352092	14,82	46	42	90	4		7310	925	2209
	T160640	6.2			496	403		58058087	16,13	-152	-154	37	90		7311	1	809
	-	18.1			403	264	265	58892086	16,36	23	18	90	0	-5	7311	810	2195
	T173140	6.2			515	487		63178081	17,55	-173	-176	10	44		7312	1	534
	T195820	18.2			310	409		71986087	20,00	-30	-32	-44	-90		7313	1	608
	-	6.1	6.2		409	517	401	72682075	20,19	145	135	-90	0	90	7313/4	609	3362
	-	18.1			401	302		75518023	20,98	-46	-48	90	43		7314	3363	4073
	T224140	18.1	18.2		304	264	349	81746268	22,71	-71	-78	45	0	-62	7315	1	1598
01 Dec	335T003640	18.1			317	412		2250135	0,63	-100		-47	-90		7316	1	658
	-	6.1	6.2		412	517	400	2908123	0,81	76	66	-90	0	90	7316/7	659	3467
	-	17.9	18.1		400	264	330	5744068	1,60	-118	-123	90	0	-53	7317	3468	5593
	T042640	6.1	6.3		488	398		16050055	4,46	22	21	40	90		7319	1	747
	-	18.1			398	264	265	16828051	4,67	-162	-167	90	0	-6	7319	748	2180
	T054500	6.1	6.2		516	516	398	20754032	5,77	2.5	-2.9	-13	0	90	7319/0	1	1616
	-	18.1			398	315		22370024	6,21	174	173	90	51		7320	1617	2142
	T072820	6.1	6.2		490	397		27104000	7,53	-24	-26	38	90		7320	1	808
	-	18.1			397	264		27911996	7,75	152	147	90	7		7320	809	2054
	T094500	18.1			284	415		35193959	9,78	122	119	-26	-90		7321	1	964
	-	6.1			415	473		36156955	10,04	-63	-64	-90	-60		7321	965	1427
	T102320	6.1			517	516	396	37449741	10,40	-67	-68	-8	0	90	7321/2	1	1496
	-	18.1			396	333		38993744	10,83	105	104	90	61		7322	1497	1935
	T231140	18.1			354	331		83577306	23,22	-80		73	62		7330	1	87
02 Dec	336T011320	6.1			471	515	390	5573371	1,55	65	61	-64	0	90	7331/2	1	2423
	-	18.0			390	358		8007390	2,22	-126		90	75		7332	2424	2647
	T050320	6.1			486	389		18250227	5,07	12	10	36	90		7334	1	839

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	18.0	18.0		389	264		19088230	5,30	-172	-177	90	0	-1	7334	840	2209
	T071640	18.0	18.1		278	422		26250250	7,29	159	155	-19	-90		7335	1	1079
	-	5.9	6.0		422	502		27329260	7,59	-28	-29	-90	-41		7335	1080	1845
	T131640	18.0	18.1		267	264	425	47841307	13,29	68	67	20	0	-90	7340	1	1612
30 0	-	6.0			425	515		49489324	13,75	-120	-124	-90	-8		7340	1613	2871
	T144820	18.0	18.1		267	264	425	53377365	14,83	45	44	20	0	-90	7341	1	1652
	-	6.0	6.17		425	515		55029383	15,29	-143	-147	-90	-8		7341	1653	2942
	T172140	6.0	6.1		478	383		62602374	17,39	-173	-175	38	90		7343	1	801
	-	18.0			383	375		63403382	17,61	2		90	86		7343	802	858
03 Dec	337T092820	18.0			300	430		34202508	9,50	124	122	-31	-90		7353	1	882
	-	5.9	6.3		430	510	376	35099518	9,75	-60	-65	-90	0	90	7353/4	883	3715
	-	17.9	18.0		376	295		37932547	10,54	108	106	90	48		7354	3716	4343
	T120640	17.9	18.0		351	265	328	43650341	12,13	84	80	78	0	-45	7355	1	1798
	T130820	6.0			515	510		47377402	13,16	-111	-116	-14	0	90	7355/6	1	1613
	-	17.9			375	300		49009428	13,61	61	60	90	52		7356	1614	2188
	T145320	6.0			480	374		53642504	14,90	-137	-139	32	90		7357	1	895
	-	17.9			384	265	268	54547519	15,15	38	33	90	0	-5	7357	896	2309
	T183500	17.9			266	434		66986623	18,61	-13	-17	-1	-90		7359	1	1344
	-	5.9			434	512		68330640	18,98	161	158	-90	-32		7359	1345	2263
	T205000	5.9	6.0		514	509	372	75099883	20,86	133	128	-12	0	90	7360	1	1600
	-	17.9			372	274		76699890	21,31	-54	-57	90	34		7361	1601	2443
	T233500	5.7	5.9		437	412		84953658	23,60	89		-89	-33		7362	1	897
04 Dec	338T003140	17.9			291	265	435	2009637	0,56	-102	-49	48	0	-90	7363	1	2042
	-	5.9			435	512		4081625	1,13	68	65	-90	-32		7363	2043	2959
	T015640	17.9			299	266	327	7467491	2,07	-125	-131	53	0	-43	7364	1	1429
	T031320	5.9			463	371		11690497	3,25	37	35	41	90		7365	1	729
	-	17.8	17.9		368	266	270	12457499	3,46	-148	-152	90	0	-6	7365	730	2141
	T044320	5.9			474	369		17098506	4,75	15	12	33	90		7366	1	890
	-	17.6	18		369	265	437	17988507	5,00	-173	-179	90	0	-90	7366	891	3577
	-	5.9			437	508		20693511	5,75	-1	-3	-90	-41		7366	3578	4351
	T073640	5.9	6.1		513	507	368	27442636	7,62	-28	-32	-13	0	90	7367/8	1	1619

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	17.9			367	264		29061658	8,07	144	139	90	2		7368	1620	2923
	T100320	17.9			289	438		36265756	10,07	115	111	-22	-90		7369	1	1020
	-	5.9	6.0		438	507	366	37305666	10,36	-70	-80	-90	0	90	7369	1021	3843
	-	17.9			366	301		40136711	11,15	97	96	90	56		7370	3844	4353
	T125820	17.9			262	266	439	46802663	13,00	71	65	14	0	-90	7371	1	1577
	-	5.8	5.9		439	505		48379683	13,44	-117	-119	-90	-46		7371	1578	2258
	T191000	17.9			265	441		69122814	19,20	-22	-27	3	0	-90	7375	1	1403
	-	5.8	5.9		441	508		70525826	19,59	150	148	-90	-42		7375	1404	2159
	T205320	17.9			320	441		75258859	20,91	-48	-50	-37	-90		7376	1	803
	-	5.7	5.9		441	514		76061855	21,13	125	124	-90	-24		7376	804	1837
	T215500	17.8	17.9		350	266	324	78978838	21,94	-64	-40	84	0	-71	7377	1	1808
	T231320	5.9			401	361		84129809	23,37	95	94	70	90		7378	1	298
	-	17.8			361	262		84427808	23,45	-87	-91	90	17		7378	299	1391
05 Dec	339T002320	5.8	5.9		508	504	422	1473789	0,41	79	72	-43	0	59	7378/9	1	1612
	T013140	17.8	18		337	442		5570722	1,55	-117	-118	-44	-90		7379	1	700
	-	5.8			442	487		6270721	1,74	57		-90	-64		7379	701	1104
	T034820	5.8			460	428		13810707	3,84	27	26	36	55		7381	1	289
	-	17.8			354	267	269	14677705	4,08	-167	-161	87	0	-2	7381	290	1630
	T052140	5.8	6.1		459	359		19346722	5,37	4	6	36	90		7382	1	826
	-	17.8			359	267	269	20172730	5,60	180	175	90	0	-2	7382	827	2204
	T064000	5.8			511	502	358	24081768	6,69	-15	-20	-14	0	90	7382	1	1606
	-	17.8			358	265		25707783	7,14	156		90	2		7383	1607	2899
	T090820	17.8	17.9		302	445		32986853	9,16	127	124	-27	-90		7384	1	919
	-	5.8			445	502	357	33949862	9,43	-57	-67	-90	0	90	7384	920	3747
	-	17.8			357	288		36777890	10,22	110	109	90	51		7385	3748	4325
	T121140	17.8			295	446		43985731	12,22	81	78	-22	-90		7386	1	1034
	-	5.8			446	509		45019747	12,51	-103	-108	-90	-12		7386	1035	2269
	T181500	17.8			269	447		65819017	18,28	-9	-14	-1	-90		7390	1	1341
	-	5.7	5.8		447	513		67160028	18,66	163	160	-90	-31		7390	1342	2264
	T195820	17.8			344	447		72011064	20,00	-35	-37	-45	-90		7391	1	668
	-	5.6	5.8		447	499	353	72695227	20,19	139	130	-90	0	90	7391/2	669	3495
	-	17.7			353	328		75522238	20,98	-51		90	77		7392	3496	3688
	T221820	5.8			432	352		80427009	22,34	109	107	49	90		7393	1	631

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	17.7	17.8		352	268	282	81058003	22,52	-74	-79	90	0	-12	7393	632	2149
	T235000	5.8			438	377		85898953	23,86	86	84	45	90		7394	1	502
	-	17.9			331	442		948	0,00	-94	-93	-42	-90		7378	503	1236
	-	5.8			442	513		734940	0,20	81	78	-90	-28		7378	1237	2209
06 Dec	340T012320	6	5.8		438	351		5034884	1,40	63	61	45	90		7395	1	690
	-	17.7	17.8		351	269	281	5724884	1,59	-121	-125	90	0	-11	7395	691	2201
	T025320	5.8			452	352		10425881	2,90	40	38	36	90		7396	1	824
	-	17.6	17.8		352	269	271	11267881	3,13	-145	-148	90	0	-3	7396	825	2202
	T043000	5.8			412	350		16313878	4,53	16	15	58	90		7397	1	481
	-	17.8			350	269	450	16794878	4,67	-174	-176	90	0	-90	7397	482	3188
	-	5.7			450	471		19501876	5,42	2		-90	-79		7397	3189	3359
	T063820	17.8			293	390		23945999	6,65	164	161	-18	-63		7398	1	679
	T081140	17.8			403	451		30236940	8,40	138	137	-68	-90		7399	1	333
	-	5.7			451	503		30569943	8,49	-44	-49	-90	-7		7399	334	1627
	T094500	17.7	17.8		308	451		35137976	9,76	117	114	-27	-90		7400	1	966
	-	5.7	5.8		452	497	358	36103982	10,03	-67	-77	-90	0	84	7400	967	3604
	T120320	5.7	5.8		462	347		43499035	12,08	-97	-100	27	90		7402	1	964
	-	17.7			347	265		44463042	12,35	77	73	90	6		7402	965	2208
	T133500	5.7			462	418		49027222	13,62	-120	-122	27	53		7403	1	407
	T145820	5.7	5.8		483	346		54314210	15,09	-142	-146	11	90		7404	1	1216
	-	17.7			346	270	276	55530207	15,43	31	26	90	0	-5	7404	1217	2625
	T203320	17.7			331	454		74018180	20,56	-45	-47	-37	-90		7407	1	820
	-	5.6			454	511		74838170	20,79	130	127	-90	-24		7407	821	1855
07 Dec	341T114140	17.7			262	272	458	42139246	11,71	87	81	17	0	-90	7417	1	1616
	-	5.6	5.7		459	509		43763255	12,16	-100	-102	-90	-49		7417	1617	2254
	T133140	17.7			386	459		48795359	13,55	59	58	-58	-90		7418	1	500
	-	5.6	5.8		459	490	340	49295357	13,69	-123	-132	-90	0	88	7418	501	3285
	T154640	5.7			432	337		56867327	15,80	-154	-156	39	90		7420	1	782
	-	17.6			337	273	284	57649324	16,01	21	16	90	0	-9	7420	783	2259
	T171820	5.7			434	358		62378305	17,33	-177	-179	37	78		7421	1	631
	T193820	17.6	17.7		360	460		70747399	19,65	-32	-34	-46	-90		7422	1	674
	-	5.6	5.7		460	488	349	71421390	19,84	144	134	-90	0	82	7422	675	3371

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T215820	5.6	5.7		412	335		79147355	21,99	112	111	49	90		7424	1	627
	-	17.6			335	266		79774350	22,16	-71	-73	90	40		7424	628	1371
	T232640	5.6	5.7		432	334		84499309	23,47	90	87	37	90		7425	1	806
	-	17.6			334	261		85305303	23,70	-94	-97	90	20		7425	807	1848
08 Dec	342T023320	5.6	5.7		418	333		9275492	2,58	43	41	44	90		7427	1	655
	-	17.6			333	274	297	9966481	2,77	-140	-146	90	0	-16	7427	656	2180
	T040320	5.6			431	332		14683405	4,08	21	18	37	90		7428	1	814
	-	17.6			332	275	284	15497391	4,30	-163	-168	90	0	-7	7428	815	2268
	T053320	5.6			450	332		20035318	5,57	-1	-4	25	90		7429	1	924
	-	17.6			332	270		21028302	5,84	173	169	90	4		7429	925	2191
	T092140	17.6			417	464		34459192	9,57	118		-68	-90		7431	1	340
	-	5.6			464	484	330	34799192	9,67	-92	-73	-90	0	90	7431	341	3108
	-	17.5	17.6		330	277		37618189	10,45	104	102	90	54		7432	3109	3642
	T114140	5.6			442	338		42203184	11,72	-93	-97	28	90		7433	1	879
	-	17.5	17.7		338	274		43150183	11,99	80	76	90	1		7433	880	2191
	T170500	17.6	17.7		338	465		61595536	17,11	5	3	-34	-90		7436	1	853
	-	5.6			465	483		62448544	17,35	-179	175	-90	0		7436	854	2269
	T183000	17.6			285	465		66707583	18,53	-16	-20	-7	-90		7437	1	1270
	-	5.6			465	507		67977595	18,88	157	154	-90	-27		7437	1271	2264
	T200320	17.6			286	466		72235404	20,07	-39	-44	-7	-90		7438	1	1271
	-	5.5	5.6		466	507		73506415	20,42	134	131	-90	-28		7438	1272	2260
	T213500	17.6			460	466		78980349	21,94	-67	-67	-86	-90		7439	1	56
	-	5.5	5.6		466	507		79036349	21,95	111	108	-90	-28		7439	57	1044
	T231640	17.6			368	467		83890417	23,30	-88	-90	-46	-90		7440	1	675
	-	5.5	5.6		467	484		84565426	23,49	88	83	-90	-2		7440	676	2027
35 8																	
09 Dec	343T013320	5.6	5.7		429	325		5642530	1,57	58	56	33	90		7442	1	869
	-	17.5			325	262		6512542	1,81	-127	-130	90	24		7442	870	1833
	T035140	17.5	17.6		348	468		13939644	3,87	-157	-159	-37	-90		7443	1	813
	-	5.5			468	479	328	14752656	4,10	19	9	-90	0	88	7443	814	3575
	T095640	17.5	17.6		330	469		25923545	7,20	111	108	-29	-90		7447	1	928
	-	5.5	5.6		469	477	322	36866537	10,24	-73	-83	-90	0	90	7447/8	929	3719

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	17.5			322	269		39683415	11,02	94	92	90	49		7448	3720	4316
	T130320	17.5			340	470		47043438	13,07	64	62	-33	-90		7449	1	880
	-	5.5			470	480		47923441	13,31	-120	-124	-90	-3		7449	881	2253
	T190320	17.5			286	471		68715720	19,09	-26	-30	-4	-90		7453	1	1318
	-	5.4	5.5		471	505		70033734	19,45	147	145	-90	-31		7453	1319	2262
	T205000	17.5			398	471		75035764	20,84	-52	-53	-56	-90		7454	1	517
	-	5.4	5.5		471	474	318	75560761	20,99	124	114	-90	0	90	7454	518	3331
	-	17.5			318	281	420	78374739	21,77	-67	-75	90	0	-65	7455	3332	5646
10 Dec	344T012140	17.5			366	472		5003688	1,39	-120	-122	-42	-90		7457	1	739
	-	5.2	5.5		472	472	464	5742681	1,60	53	50	-90	0	6	7457	740	2233
	T025140	17.5			354	473		10451638	2,90	-143	-146	-37	-90		7458	1	809
	-	5.1	5.5		473	470	317	11269631	3,13	27	22	-90	0	90	7458/9	810	3491
	-	17.4	17.5		317	264		14082605	3,91	-160	-161	90	44		7459	3492	4180
	T055320	17.5			328	473		21331540	5,93	171	-175	-26	-90		7460	1	992
	-	5.4	5.5		473	484		22323531	6,20	-14	-18	-90	-10		7460	993	2268
	T071500	17.5			265	282	473	26195624	7,28	151	150	18	0	-90	7461	1	1637
	-	5.4	5.5		473	509		27849632	7,74	-37		-90	-51		7461	1638	2252
	T085820	17.5			329	474		32387655	9,00	125	124	-26	-90		7462	1	968
	-	5.4	5.5		474	470	315	33376660	9,27	-60	-70	-90	0	90	7462	969	3780
	-	17.4			315	293		36188674	10,05	108	107	90	75		7463	3781	3994
	T142320	5.4	5.5		414	313		51891744	14,41	-136	-139	33	90		7466	1	875
	-	17.3	17.4		313	289		52766759	14,66	38	34	90	0	-3	7466	876	2262
	T155500	5.4			414	313		57418698	15,95	-159	-162	33	90		7467	1	860
	-	17.3	17.4		313	289		58291710	16,19	15	11	90	0	-3	7467	861	2230
	T173000	17.4	17.5		297	285	475	63975748	17,77	-8	-16	79	0	-90	7468	1	2557
	-	5.4			475	504		66532799	18,48	161	159	-90	-34		7468	2558	3447
11 Dec	345T062820	17.4			339	478		23363729	6,49	162	159	-27	-90		7476	1	970
	-	5.4	5.6		478	463	308	24333721	6,76	-23	-31	-90	0	90	7476/7	971	3757
	-	17.3	17.4		308	266		27141700	7,54	145	143	90	51		7477	3758	4337
	T093140	17.4			338	358		34403779	9,56	116		-27	-36		7479	1	134
	T093500	17.4			371	478		34619781	9,62	114	112	-41	-90		7478	1	762
	-	5.3	5.5		478	462	307	35381785	9,83	-69	-78	-90	0	90	7478	763	3550

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	17.4			307	288	363	38188800	10,61	98	92	90	0	-37	7479	3551	5449
	T141000	17.4			357	479		51091871	14,19	46	43	-34	-90		7481	1	862
	-	5.3	5.5		479	460	306	51953879	14,43	-139	-148	-90	0	90	7481/2	863	3653
	-	17.3	17.4		306	262		54760907	15,21	29	27	90	44		7482	3654	4341
	T171640	17.4			374	479		62242982	17,29	-1	-3	-41	-90		7483	1	758
	-	5.3	5.4		479	459	305	-		175	165	-90	0	90	7483/4	759	3482
	-	17.3			305	261		65807017	18,28	-16	-19	90	36		7484	3483	4285
	T202320	17.4			408	480		73500078	20,42	-47	-49	-55	-90		7485	1	536
	-	5.3	5.4		480	458	304	74048076	20,57	129	119	-90	0	90	7485/6	537	3325
	-	17.3			304	290	428	76853067	21,35	-63	-71	90	0	-63	7486	3326	5626
12 Dec	346T050320	17.3			284	291	429	18275860	5,08	-178	173	76	0	-63	7491	1	2084
	T063500	17.3			284	292	429	23787948	6,61	158	150	76	0	-63	7492	1	2074
	T080500	17.3			293	292	411	29196010	8,11	135	127	84	0	-55	7493	1	2083
	T093640	17.3			295	292	411	34699073	9,64	112	104	85	0	-54	7494	1	2100
	T105140	5.3	5.4		409	300		39178892	10,88	-85	-88	26	90		7495	1	977
	-	17.3			300	293	383	40155907	11,15	89	82	90	0	-43	7495	978	2961
	T124140	17.3			288	293	421	45811994	12,73	66	58	81	0	-58	7496	1	2055
	T141320	17.3			288	293	421	51331080	14,26	43	35	81	0	-58	7497	1	2086
	T152820	5.3			402	299		55780252	15,49	-155	-158	28	90		7498	1	932
	-	17.3			299	264		56721252	15,76	20	18	90	30		7498	933	1829
	T172140	17.3			271	294	454	62620208	17,39	-3	-12	65	0	-73	7499	1	2078
	T185500	17.3			271	294	454	68140232	18,93	-26	-35	65	0	-73	7500	1	2078
	T205320	17.3			386	484		75267163	20,91	-56	-58	-43	-90		7501	1	739
	-	5.2	5.3		484	479		76006156	21,11	120	116	-90	-20		7501	740	1853
	T220000	17.3			266	295	466	79292123	22,03	-73	-81	57	0	-79	7502	1	2040
13 Dec	347T034640	5.3			379	296		13708190	3,81	20	18	38	90		7506	1	781
	-	17.2			296	296	314	14489182	4,02	-164	-169	90	0	-10	7506	782	2256
	T052000	5.2	5.3		378	295		19228136	5,34	-3	-5	38	90		7507	1	781
	-	17.2			295	314		20009129	5,56	173	167	90	0	-10	7507	782	2265
	T065000	5.2	5.3		391	295		24636024	6,84	-25	-28	31	90		7508	1	894
	-	17.2			295	297		25530023	7,09	149	144	90	0	-1	7508	895	2241
	T090500	17.2			350	485		32788118	9,11	120	117	-26	-90		7509	1	984

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	5.2	5.3		485	445	295	33772115	9,38	-65	-74	-90	0	89	7509	985	3733
	T121000	5.2			480	454		45868087	12,74	-114	-115	-23	-6		7511	1	275
	T145320	17.2			264	299	486	53652426	14,90	33	25	55	0	-90	7513	1	2200
	-	5.2			486	497		55852408	15,51	-157	-159	-90	-40		7513	2201	2988
	T165500	17.2			444	486		60988364	16,94	3	2	-66	-90		7514	1	384
	-	5.1	5.2		486	440	391	61372361	17,05	180	173	-90	0	29	7514	385	2251
	T202140	5.2			484	441	292	73396298	20,39	130	124	-28	0	90	7516/7	1	1811
	-	17.2			292	268		75207266	20,89	-58		90	64		7517	1812	2192
14 Dec	348T063500	17.2			372	488		23756385	6,60	157	154	-33	-90		7523	1	878
	-	5.1	5.2		488	437	359	24645388	6,85	-28	-35	-90	0	43	7523	879	2970
	T084140	5.2			461	437	289	31364410	8,71	-55	-60	-14	0	90	7524/5	1	1594
	-	17.1	17.2		289	262		32958415	9,16	118	116	90	49		7525	1595	2209
	T102140	5.2			399	289		37420364	10,39	-80	-83	20	90		7526	1	1033
400	-	17.1	17.2		289	290		38476279	10,69	94	90	90	8		7526	1034	2244
	T212140	5.17			297	286		76956523	21,38	115		80	90		7533	1	145
	-	17.1			286	269		77101521	21,42	-67	-69	90	29		7533	146	1047
	T224000	5.1	5.2		381	286		81676468	22,69	95	92	28	90		7534	1	943
	-	17.1			286	270		82619457	22,95	-90	-92	90	30		7534	944	1839
15 Dec	349T001320	5.1	5.2		355	286		1009414	0,28	71	69	42	90		7535	1	727
	-	17.1			286	273		1736411	0,48	-113	-116	90	26		7535	728	1658
	T014500	5.1	5.2		374	285		6355395	1,77	49	46	31	90		7536	1	898
	-	17.1			285	273		7253392	2,01	-136	-139	90	26		7536	899	1853
	T031640	5.1	5.2		373	285		11876376	3,30	26	23	31	90		7537	1	894
	-	17.1			285	273		12770373	3,55	-159	-162	90	26		7537	895	1848
	T075140	5.1	5.2		378	284		28372444	7,88	-43	-45	27	90		7540	1	932
	-	17.1			284	270		29320453	8,14	132	129	90	30		7540	933	1822
	T092320	5.1	5.2		378	284		33883499	9,41	-66	-68	27	90		7541	1	953
	-	17.1			284	271		34836508	9,68	109	106	90	30		7541	954	1846
	T105500	5.1	5.2		378	283		39396553	10,94	-89	-91	27	90		7542	1	957
	-	17.1			283	271		40353563	11,21	86	83	90	30		7542	958	1845
	T122640	5.1	5.2		377	282		44916551	12,48	-112	-114	27	90		7543	1	943
	-	17.1			282	271		45880557	12,74	62	60	90	30		7543	944	1820

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T135820	5.1	5.2		376	283		50428585	14,01	-135	-137	27	90		7544	1	945
	-	17	17.1		283	271		51385591	14,27	39	37	90	31		7544	946	1829
	T153140	5.1	5.2		377	283		55931620	15,54	-158	-160	26	90		7545	1	955
	-	17	17.1		283	271		56901626	15,81	16	14	90	31		7545	956	1838
	T170320	5.1	5.3		371	282		61499654	17,08	178		29	90		7546	1	919
	-	17	17.1		282	274		62418660	17,34	-7	-9	90	27		7546	920	1860
	T200820	5.3	5.5		290	282		73326573	20,37	133	135	82	90		7548	1	123
	-	17			282	275		73449574	20,40	-53	-55	90	26		7548	124	1067
	T214000	5			368	281		78051595	21,68	109	120	29	90		7549	1	913
	-	17			281	275		78964599	21,93	-76	-78	90	27		7549	914	1854
	T231140	5	5.1		367	281		83572517	23,21	86	84	30	90		7550	1	906
	-	17			281	272		84478525	23,47	-163	-117	90	78		7550	907	1080
16 Dec	350T004320	5	5.1		366	281		2692570	0,75	63	61	30	90		7551	1	894
	-	16.3	17		281	266		3594579	1,00	-132	-122	90	69		7551	895	1209
	T021500	5			373	280		8140623	2,26	40	38	26	90		7552	1	969
	-	17			280	272		9109632	2,53	-150	-147	90	31		7552	970	1831
	T034820	5			358	280		13772677	3,83	17	14	33	90		7553	1	853
	-	16.8	17		280	313	429	14625685	4,06	-171	-175	90	0	-52	7553	854	2989
	T172140	5.0			453	415	278	62564731	17,38	173	167	-21	0	90	7561/2	1	1690
	-	16.9			278	302		64254719	17,85	-15	-19	90	8		7562	1691	2906
	T211640	17	17.3		320	493		76644750	21,29	-65	-67	-1	-90		7564	1	1370
	-	5			493	472		-		107	104	-90	-33		7564	1371	2262
	T225820	17			416	493		82812692	23,00	-91	-86	-45	-90		7565	1	696
	-	4.9	5		493	413	280	83528691	23,20	84	75	-90	0	90	7565/6	697	3438
	-	16.9	17		280	272		86309686	23,97	-107	-107	90	84		7566	3439	3529
	-	17			396	433		686	0,00	-106	-107	-39	-55		7550	3530	3783
17 Dec	351T033140	17			391	493		12780663	3,55	-160	-162	-33	-90		7568	1	887
	-	4.6	5		493	411	347	13667661	3,80	11	8	-90	0	35	7568	888	2838
	T110820	16.9			372	494		40204896	11,17	85	82	-24	-90		7573	1	1028
	-	4.8	5		494	408	275	41232905	11,45	-100	-109	-90	0	90	7573/4	1029	3753
	-	16.9			275	264		44011110	12,23	68	67	90	52		7574	3754	4318
	T150140	4.9			347	307		54165017	15,05	-153	-154	32	58		7576	1	390

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T202640	16.9			439	494		73724824	20,48	-55	-56	-53	-90		7579	1	580
	-	4.9			494	405	306	74304821	20,64	122	113	-90	0	58	7579	581	2878
18 Dec	352T005820	16.9			402	493		3587850	1,00	-122	-125	-36	-90		7582	1	852
	-	4.8	4.9		493	453		4439848	1,23	53	50	-90	-27		7582	853	1842
	T053000	16.9			368	494		19884736	5,52	169	166	-20	-90		7585	1	1088
	-	4.8	4.9		494	475		20972753	5,83	-16	-18	-90	-42		7585	1089	1843
	T101000	16.9			413	494		36717007	10,20	99	97	-40	-90		7588	1	787
	-	4.8	4.9		494	470		37504020	10,42	-85	-88	-90	-40		7588	788	1589
	T140140	4.8	4.9		325	271		50549243	14,04	-139	-141	40	90		7591	1	749
	-	16.8			271	270		51298248	14,25	37	35	90	44		7591	750	1436
	T175000	16.8	17.1		415	493		64269137	17,85	-16	-15	-40	-90		7593	1	786
	-	4.8	4.9		493	396	371	65055133	18,07	159	150	-90	0	90	7593/4	787	3540
	-	16.8			371	277		67826119	18,84	-32	-34	90	36		7594	3541	4346
19 Dec	353T125500	4.8	5.1		344	268		46541197	12,93	-123	-122	24	90		7606	1	990
	-	16.8			268	284		47531192	13,20	52	49	90	32		7606	991	1849
	T143000	4.8			323	268		52237169	14,51	-147	-149	36	90		7607	1	802
	-	16.8			268	266		53039165	14,73	-13	28	90	57		7607	803	1294
	T150320	16.8			319	493		54261159	15,07	25	19	8	0	-90	7607	1	1518
	-	4.7	4.8		493	459		55779152	15,49	-163	-165	-90	-38		7607	1519	2337
	T181820	16.8			411	493		65941264	18,32	-24	-27	-36	-90		7609	1	846
	-	4.7	4.8		493	439		66795259	18,55	151	148	-90	-30		7609	847	1843
20 Dec	354T003320	16.7	16.9		472	493		2077156	0,58	-118	-117	-68	-90		7613	1	349
	-	4.7			493	436		2426157	0,67	59	56	-90	-26		7613	350	1348
	T015640	16.7	17.1		414	493		7085170	1,97	-139	-137	-36	-90		7614	1	848
	-	4.7	4.8		493	383	267	7933173	2,20	36	26	-90	0	90	7614/5	849	3593
	-	16.7			267	279		10697180	2,97	-155	-157	90	39		7615	3594	4345
	T045640	16.7			381	493		17861312	4,96	176	172	-20	-90		7616	1	1068
	-	4.4	4.7		493	461		18946318	5,26	-13	-12	-90	-42		7616	1069	1827
	T123320	16.7			374	492		45333341	12,59	61	57	-16	-90		7621	1	1139
	-	4.6	4.7		492	465		46480351	12,91	-125	-127	-90	-45		7621	1140	1841

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T141000	16.7			407	492		51068391	14,19	37	34	-31	-90		7622	1	901
	-	4.7			492	405		51986399	14,44	-148	-152	-90	-13		7622	902	2110
	T171320	16.7			409	492		62093487	17,25	-9	-12	-32	-90		7624	1	905
	-	4.7			492			62998495	17,50	166	163	-90	-30		7624	906	1846
	T184500	16.7			428	492		67736536	18,82	-32	-34	-41	-90		7625	1	767
	-	4.7			492	437		68503543	19,03	143	140	-90	-30		7625	768	1709
21 Dec	355T000640	4.7			317	265		525436	0,15	67	64	32	90		7629	1	857
	-	16.6	16.7		265	276		1383430	0,38	-118	119	90	47		7629	858	1495
	T015320	4.7			265			6869357	1,91	41		88	90		7630	1	18
	-	16.6	16.7		265	292		6887357	1,91	-140	-143	90	31		7630	19	886
	T044000	4.7			327	265		16925274	4,70	-1	-4	25	90		7632	1	972
	-	16.6			265	344	492	17897273	4,97	174	-168	90	0	-90	7632	973	3700
	-	4.6			492	481		20642437	5,73	-18	-19	-90	-62		7632	3701	4139
	T135140	4.6	4.7		295	264		50261593	13,96	-140	-142	45	90		7638	1	663
	-	16.6			264	346	491	50924593	14,15	35	26	90	0	-90	7638	664	3363
	-	4.6			491	457		53670597	14,91	-156	-158	-90	-46		7638	3364	4061
	T174140	16.6			412	491		63756611	17,71	-17	-20	-31	-90		7640	1	922
	-	4.6			491	429		64678613	17,97	158	155	-90	-30		7641	923	1861
	T191500	16.6			430	491		69388573	19,27	-40	-43	-40	-90		7641	1	706
	-	4.6			491	368	264	70182568	19,50	135	126	-90	0	90	7641/2	707	3443
	-	16.4	16.6		264	291		72939550	20,26	-58	-59	90	34		7642	3444	4265
	T230320	4.6			310	264		83085613	23,08	82	79	32	90		7644	1	849
	-	16.5	16.6		264	307		83946605	23,32	-102	-105	90	24		7644	850	1831
22 Dec	356T025320	16.6			431	490		10509534	2,92	-155	-156	-40	-90		7646	1	792
	-	4.6			490	472		11301531	3,14	20	19	-90	-58		7646	793	1292
	-	4.6			319	263		13089524	3,64	14	10	25	90		7647	1293	2260
	-	16.5			263			14058521	3,91	-171		90	84		7647	2261	2345
	T100320	16.5	16.6		264	351	433	36293619	10,08	96	89	75	0	-40	7651	1	1725
23 Dec	357T004140	4.5			457	356	267	2541714	0,71	56	49	-52	0	72	7660	1	1878
	T023140	4.5			315	262		9180552	2,55	29	26	22	90		7662	1	1009

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	-	16.5			262	300		10189562	2,83	-156	-159	90	33		7662	1010	1860
	T033820	4.5			404	355	273	13973599	3,88	9	4	-24	0	60	7662	1	1268
	T045140	16.5			438	488		17662636	4,91	173	171	-40	-90		7663	1	780
	-	4.4	4.5		488	410		18442643	5,12	-11	-14	-90	-27		7663	781	1769
	T125000	4.5			474	352	267	46310812	12,86	-126	-134	-67	0	68	7668	1	2039
	T142140	4.5			476	351	267	51773913	14,38	-149	-157	-69	0	67	7669	1	2076
	T155500	4.5			467	351	264	57397876	15,94	-172	179	-62	0	75	7670	1	2083
	T172640	4.5			385	350	264	63591949	17,66	161	156	-17	0	75	7671	1	1388
	T192500	4.5			288	262		69941804	19,43	135	133	39	90		7673	1	756
	-	16.4	16.5		262	304		70697807	19,64	-49	-51	90	32		7673	757	1605
	T203500	4.4	4.5		435	349	262	74197821	20,61	117	110	-43	0	90	7673/4	1	2000
	-	16.4			262	265		76197829	21,17	-72		90	78		7674	2001	2183
24 Dec	358T181820	4.4			288	262		65958146	18,32	150	148	34	90		7688	1	807
	-	16.4			262	325		66787135	18,55	-33	-37	90	22		7688	808	1822
	T195000	4.4	4.5		287	262		71462073	19,85	128	126	34	90		7689	1	823
	-	16.4			262	326		72285062	20,08	-56	-60	90	22		7689	824	1841
25 Dec	359T101640	16.3	16.4		416	481		37092766	10,30	90	87	-24	-90		7698	1	1031
	-	4.2	4.4		481	335	263	38123759	10,59	-96	-104	-90	0	90	7698/9	1032	3739
	-	16.3			263	292		40862742	11,35	74	72	90	49		7699	3740	4344
	T194320	4.3			480	339		71110305	19,75	127	122	-89	-3		7704	1	1343
	-	4.3			330	263		-		122	118	1	90		7704/5	1344	2666
	-	16.2	16.4		263	372	480	73846294	20,51	-64	-73	90	0	-90	7705	2667	5405
	-	4.3			480	473		76603283	21,28	104		-90	-78		7705	5406	5587
26 Dec	360T074000	16.3			427	478		27710266	7,70	128	126	-28	-90		7712	1	969
	-	4.2	4.3		478	328	264	28679277	7,97	-56	-65	-90	0	90	7712/3	970	3685
	-	16.1	16.3		264	374	446	31415308	8,73	110	105	90	0	-40	7713	3686	5660
	T135000	16.3	16.4		464	477		50078397	13,91	35		-53	-90		7716	1	584
	-	4.2			477	326	304	50662396	14,07	-148	-154	-90	0	13	7716	585	2176
27 Dec	361T011320	4.2			286	262		4470302	1,24	44	43	23	55		7724	1	462

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
	T024500	4.2			286	265		9966238	2,77	21	18	23	90		7725	1	991
	-	16.2			265	322		10957226	3,04	-163	-166	90	33		7725	992	1841
	T041500	4.2			297	265		15334083	4,26	0	-4	15	90		7726	1	1105
	-	16.2			265	311		16452073	4,57	173	171	90	41		7726	1106	1836
	T060640	16.2			268	379	463	22037338	6,12	150	142	83	0	-52	7727	1	2077
	T073000	4.2			259	265		27102371	7,53	-49	-50	67	90		7728	1	337
	-	16.2			265	297		27439374	7,62	128	126	90	52		7728	338	882
	T104140	16.2			315	380	467	39183330	10,88	79	73	39	0	-55	7730	1	1466
	T121320	16.2			271	381	466	44054413	12,24	58	50	81	0	-55	7731	1	2007
	T141320	16.2			442	472		51310600	14,25	29	27	-35	-63		7732	1	435
	T151820	16.2			278	381	472	55166615	15,32	13	4	72	0	-63	7733	1	2078
	T165000	16.2			278	382	472	60654636	16,85	-10	-18	73	0	-63	7734	1	2084
	T191500	4.2			404	316	266	69390385	19,28	133	126	-43	0	90	7735/6	1	1954
	-	16.1			266	340		71390382	19,83	-56	-59	90	24		7736	1955	2939
28 Dec	362T031000	4.1			278	266		11486445	3,19	14	11	25	90		7741	1	969
	-	16	16.1		266	322		12455445	3,46	-172	-173	90	37		7741	970	1754
	T052640	16.2			469			20706465	5,75	157		-89	-90		7742	1	6
	-	4.1			469	313	271	-		-25	-32	-90	0	31	7742	7	1861
	T163500	4.1			408	309	268	59798828	16,61	172	165	-49	0	90	7749/0	1	2058
	-	16	16.1		268	374		61884852	17,19	-18	-21	90	7		7750	2059	3306
	T200140	4.1			260	268		72190689	20,05	121	119	44	90		7752	1	677
	-	16	16.1		268	387	469	72867688	20,24	-63	-71	90	0	-61	7752	678	2985
	T222000	16.1			458	466		80438535	22,34	-93	-84	-46	-90		7753	1	687
	-	4.1			466	307	265	81125536	22,53	82	73	-90	0	85	7753	688	3308
482																	
29 Dec	363T102500	16			426	463		37574802	10,44	84		-21	-90		7761	1	1060
	-	4	4.1		463	303	269	38652810	10,74	-101	-110	-90	0	90	7761/2	1061	3784
	-	16			269	308		41376831	11,49	67	66	90	52		7762	3785	4343
	T141640	4	4.1		266	270		51462910	14,30	-153	-156	29	90		7764	1	894
	-	16			270	271		-		21		90	87		7764	895	929
	-	16			368	391	462	53511926	14,86	18	12	13	0	-90	7764	930	2543
	-	4			462	391		55124938	15,31	-170	-172	-90	-44		7764	2544	3252

№	Ім'я файлу	LST	LST	LST	Alt	Alt	Alt	UT, ms	UT, hour	Long	Long	Lat	Lat	Lat	№orbit	№ of row	
30 Dec	364T005640	4	4.1		267	271		3438867	0,96	46	43	26	90		7771	1	946
	-	16			271	343		4384853	1,22	-139	-141	90	30		7771	947	1788
	T035820	4			268	271		14382750	4,00	0	18	24	90		7773	1	981
	-	16			271	393	453	15363748	4,27	175	168	90	0	-42	7773	982	2979
	T100140	4			276	272		36207151	10,06	-91	-94	15	90		7777	1	1111
	-	15.9	16		272	394	444	37318154	10,37	83	77	90	0	-33	7777	1112	2974
31 Dec	365T042320	3.9			257	274		15947226	4,43	-7	-9	34	90		7789	1	826
	-	15.8	15.9		274	341		16773232	4,66	167	166	90	35		7789	827	1642
	T072500	3.9			265	274		26743265	7,43	-52	-55	22	90		7791	1	1004
	-	15.9	16		274	398	452	27747258	7,71	122	114	90	0	-90	7791	1005	3756
	-	3.9			452	321		30518240	8,48	-69	-73	-90	-18		7791	3757	4858
	T124320	15.9			430	451		45903141	12,75	48	44	-21	-90		7794	1	1077
	-	3.8	3.9		451	382		46980134	13,05	-138	-140	-90	-48		7794	1078	1709
	T141500	3.9			355	289	275	53312093	14,81	-163	-170	-35	0	90	7795/6	1	1860
	-	15.7	15.9		275	325		55181081	15,33	6		90	49		7796	1861	2475
	T202820	15.9			458	448		73783177	20,50	-69	-66	-50	-90		7799	1	630
49 2	-	3.9			448	288	277	74413174	20,67	107	98	-90	0	90	7799/0	631	3315
	-	15.8	15.9		277	400	461	77127162	21,42	-84	-92	90	0	-62	7800	3316	5654

ДОДАТОК Г

ПРОСТОРОВО ЛОКАЛІЗОВАНІ СПЛЕСКИ ГХ В СПОКІЙНІЙ ОБЛАСТІ, ОТРИМАНІ З
ДАНИХ СУПУТНИКА DE 2 ЗА ПЕРІОД ЛИСТОПАД 1982 р. – ЛЮТИЙ 1983 р.

В каталозі вказані дата та час орбітального прольоту; висота, номер та
локальний час орбіти та географічна локалізація сплесків ГХ

№	Дата	UT. hr	Alt	Long	Lat1	Lat2	Norbit	LST
1	Nov 15	23.11	537 339 311	-68	-20	-56	7082	19.2
2	Nov 17	01.73	347 316	-105	-31	-47	7099	19.2
3	Nov 18	22.51	334 315 326	-59	-15	-27	7128	19.0
4	Nov 22	09.53	487 291 348	128	-40	-60	7182	18.7
5	Nov 23	16.69	312 285 356	24	3	-42	7202	18.7
6	Nov 25	14.65	455 276 370	52	0	-23	7232	18.5
7	Nov 26	12.23	446 273 276	86	6	-4	7246	18.5
8	Nov 26	23.02	441 271 380	-77	25	-30	7253	18.5
9	Nov 28	04.38	384 268 344	-158	-5	-15	7272	18.3
10	Nov 28	16.59	424 267 394	17	-10	-27	7280	18.3
11	Nov 29	15.72	414 265 401	29	-2	-14	7295	18.1
12	Nov 29	21.88	411 265 403	-64	-10	-35	7299	18.1
13	Nov 30	05.60	399 264 375	180	20	-4	7304	18.1
14	Nov 30	22.71	304 264 349	-75	-10	-37	7315	18.1
15	Dec 01	01.60	400 264 330	-121	26	-25	7317	18.0
16	Dec 02	14.83	267 264 425	44	4	20	7341	18.0
17	Dec 02	14.83	267 264 425	44	-18	-23	7341	18.0
18	Dec 04	05.00	369 265 437	-176	0	-15	7366	17.9
19	Dec 06	03.13	352 269 271	-146	20	40	7396	17.7
20	Dec 10	16.19	313 289	13	39	48	7467	17.4
21	Dec 11	10.61	307 288 363	95	30	45	7479	17.4
22	Dec 12	09.64	295 292 411	108	0	34	7494	17.3
23	Dec 12	12.73	288 293 421	62	40	60	7496	17.3
24	Dec 12	18.93	271 294 454	-30	40	50	7500	17.3
25	Jan 02	20.22	296 273 283	110	18	26	7830	3.7
26	Jan 05	14.88	416 261 295	-175	-35	-30	7874	3.5
27	Jan 05	14.88	416 261 295	-175	7	16	7874	3.5
28	Jan 06	13.65	104 258 263	-157	-32	-22	7889	3.4
29	Jan 06	13.65	104 258 263	-157	40	50	7889	3.4
30	Jan 09	08.6	386 249 312	-84	15	20	7933	3.2
31	Jan 12	20.31	282 243 328	100	-40	-30	7988	3.0
32	Jan 13	06.91	289 243 286	-61	-48	-40	7995	2.9
33	Jan 13	13.55	406 352	17	30	40	8000	14.9
34	Jan 14	19.29	286 242 336	112	5	24	8019	2.8
35	Jan 21	08.61	297 249 359	-97	-35	-27	8123	2.3
36	Jan 22	05.78	290 360	-50	-37	-25	8137	2.2
37	Jan 22	05.78	290 360	-50	2	12	8137	2.2
38	Jan 24	12.31	258 257 365	-153	27	33	8173	2.1
39	Jan 24	06.22	266 255 365	-62	-50	-35	8169	2.1
40	Jan 25	01.87	265 258 366	2	-65	-35	8182	2.1

41	Jan 25	09.59	248 259 366	-112	-25	-15	8187	2.1
42	Jan 27	15.82	251 265 364	150	-52	-32	8223	1.9
43	Jan 27	05.10	270 264 367	-45	-47	-43	8216	1.9
44	Jan 28	05.36	254 268 367	-53	-55	-45	8232	1.9
45	Jan 29	08.45	257 366	-99	-52	-32	8250	1.8
46	Jan 31	08.71	253 299	-105	-32	-25	8282	1.7
47	Feb 01	05.69	255 277 357	-64	-50	-35	8296	1.6
48	Feb 01	17.73	254 356	114	-45	-35	8304	1.5
49	Feb 04	01.51	253 316	-1	-32	-27	8341	1.4
50	Feb 07	11.92	244 332	-158	-45	-35	8396	1.2
51	Feb 07	05.92	244 334	-73	-50	-35	8392	1.2
52	Feb 13	01.77	277 216	166	10	30	8486	12.8
53	Feb 15	09.47	229 269	-150	-43	-27	8523	22.4

ДОДАТОК Д

ДОВІДКА ПРО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОГО ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
Інституту космічних досліджень
НАН України та ДКА України

ІНСТИТУТ
КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
НАУК УКРАЇНИ ТА
ДЕРЖАВНОГО КОСМІЧНОГО
АГЕНТСТВА УКРАЇНИ
Ідентифікаційний
код 229710.5

О.П. Федоров
2018 р.

ДОВІДКА

про використання результатів наукового дисертаційного дослідження Скороход Т.В.
«Внутрішні гравітаційні хвилі в термосфері за даними прямих супутникових спостережень»
при підготовці космічного експерименту «Іоносат – Мікро» на супутнику «Мікросат-М»

Частина результатів, представлених у науковому дисертаційному дослідженні Скороход Т.В., отримана в результаті підготовки космічного експерименту «Іоносат – Мікро» на супутнику «Мікросат-М», який здійснюється в рамках Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України. Метою експерименту є вивчення динамічних процесів в іоносфері в інтересах фундаментальних космічних досліджень, і ряду практичних застосувань в галузі безпеки та моніторингу факторів впливу на навколишнє середовище. Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України є головною науковою організацією, відповідальною за планування, проведення і обробку даних цього космічного експерименту.

В ході підготовки проекту «Іоносат – Мікро» використані наступні основні результати наукового дисертаційного дослідження:

- при розробці модельних циклограм вмикань комплексу наукової апаратури «Іоносат – Мікро» (вибір просторово-часових вікон спостережень, вибір переліку датчиків, що вмикаються, вибір режимів роботи датчиків) враховані результати картографування геопросторової структури іоносферних збурень, отримані у дисертації;
- в рамках Наукової програми експерименту «Іоносат – Мікро» розроблено часткову програму дослідження іоносферних збурень – провісників землетрусів;
- принципи побудови хвильових каталогів, запропоновані у дисертації, використані при проектуванні бази даних і метаданих наземного Центру збору, обробки і розповсюдження даних експерименту «Іоносат – Мікро» (який розгорнутий в Інституті космічних досліджень НАН України та ДКА України);
- методи, алгоритми і програмне забезпечення для опрацювання й інтерпретації супутникових даних, розроблені у дисертації, будуть використані в ході реалізації проекту.

Науковий керівник
експерименту «Іоносат – Мікро»,
кандидат фіз.-мат. наук

Г.В. Лізунов