

УДК 523.9  
№ держреєстрації 0118U004070  
Інв. №

**Національна Академія наук України**  
Головна астрономічна обсерваторія  
03143, м. Київ, вул. Заболотного 27; тел. (044) 526 08 69; факс (044) 526 47 61;

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор ГАО НАНУ,  
академік НАН України

\_\_\_\_\_ Я.С.ЯЦКІВ

\_\_\_\_\_ грудня 2018 р.

**ЗВІТ**  
**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**  
за договором від 08.02.2018 № 3/18

Дослідження та інтерпретація акустичних коливань на Сонці за даними  
космічних експериментів КОРОНАС-ДИФОС (Україна),  
SOHO (США) та наземних спостережень

**ЕТАП 1. ОБРОБКА СПОСТЕРЕЖНИХ ДАНИХ ТА**  
**ВИЗНАЧЕННЯ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК**  
**ЛОКАЛЬНИХ ТА ГЛОБАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ**  
(проміжний)

Науковий керівник НДР  
с.н.с., канд. фіз.-мат. наук

Осіпов С.М.

13 грудня 2018р.

2018

Результати цієї роботи розглянуто Вченою Радою ГАО НАН України,  
протокол від 13 грудня 2018 N 18

## СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР старший наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук	13.12.2018	Осіпов С.М. (вступ, висновки, розд. 1)
Відповідальні виконавці: Зав. відділом фізики Сонця д-р. фіз.-мат. наук	13.12.2018	Щукіна Н.Г. (розд. 2)
д-р. фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАНУ	13.12.2018	Костик Р.І. (реферат, розд. 1)
Виконавці: старший наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук,	13.12.2018	Васильєва І.Е. (розд. 2,)
ведучий інженер	13.12.2018	Беспалько В.Г.

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 33 с., 1 табл., 17 рис., 17 джерел.

СОНЦЕ, ГЕЛІОСЕЙСМОЛОГІЯ, КОЛИВАННЯ, СПАЛАХИ, ФАЗИ, СПЕКТР ПОТУЖНОСТІ.

Об'єкт дослідження – осциляції яскравості та швидкості п'ятихвилинних коливань в сонячній атмосфері.

Мета роботи – 1) Систематизація спостережень, первинна обробка та аналіз похибок даних космічних експериментів КОРОНАС-ДИФОС, SOHO/Virgo та SOHO/Golf. 2) розробка та вдосконалення методів та алгоритмів досліджень та створення програмних кодів для комп'ютерних обчислень частотно-амплітудно-фазових характеристик 5-ти хвилинних коливань яскравості та швидкості Сонця. 3) Аналіз спостережних амплітудно-фазових характеристик осциляцій швидкості та яскравості з даними наземних спостережень отриманими на телескопі VTT (Іспанія), які мають високу просторову роздільну здатність. 3) Пошуковий аналіз реакції акустичних коливань на збурення атмосфери Сонця під час потужних сонячних спалахів, які сталися протягом проведення космічних спостережень.

Метод дослідження – 1) аналіз спектрів потужності та фазових спектрів побудованих за допомогою Фур'є-перетворень для тривалих рядів спостережних даних; 2) кореляційний аналіз для рядів даних, що мають розриви в часі; 3) співставлення даних наземних спостережень для активних і спокійних ділянок сонячної поверхні для вивчення впливу магнітного поля на акустичні хвилі; 4) співставлення змін параметрів п'ятихвилинних коливань під час сонячних спалахів з моніторинговими даними рентгенівського випромінювання Сонця (GOES) та іншими індексами сонячної активності.

Результати та їх новизна – Проведена систематизація даних спостережень космічних експериментів Коронас-ДИФОС-Ф, SOHO/Virgo та SOHO/Golf., первинна обробка даних, аналіз похибок. Досліджено вплив найпотужніших сонячних спалахів на характеристики глобальних п'ятихвилинних коливань сонячної фотосфери. Аналіз одночасних комплексних наземних спостережень спокійної та факельної ділянок сонячної поверхні показав, що бігучі звукові хвилі зароджуються в нижній фотосфері як в активній, так і в спокійній ділянках сонячної поверхні, але досягнути та нагріти хромосферу ці хвилі здатні лише в активній ділянці, де присутні помірні магнітні поля.

## ЗМІСТ

	С.
Передмова	5
Вступ	6
1 Обробка даних експерименту КОРОНАС-ДИФОС-Ф.	7
1.1 Обробка телеметричних даних	7
1.2 Попередня обробка перших даних спостережень	8
1.3 Підготовка даних до обробки	10
1.4 Методи аналізу частково заповнених рядів спостережень	11
1.5 Спектри потужності 5-хвилинних осциляцій в різних спектральних каналах з помірною роздільною здатністю та їх порівняння з даними наземних досліджень.	14
2. Збір та аналіз даних експериментів SOHO/Virgo/SPM та SOHO/Golf	16
3. Порівняння даних експериментів КОРОНАС-ДИФОС-Ф та SOHO/Virgo/SPM.	18
3.1 Дослідження амплітудних характеристик коливань яскравості	18
3.2 Дослідження фазових залежностей коливань між різними спектральними каналами.	19
4 Вплив сонячних спалахів на спектри потужності та на фазові спектри п'ятихвилинних коливань Сонця	24
5 Порівняння амлітудно-фазових характеристик локальних коливань в спокійних та активних утвореннях в сонячній атмосфері за даними наземних спостережень.	28
Висновки	31
Перелік джерел посилань	32
Список публікацій	33

## ПЕРЕДМОВА

В 1994–2005 рр. були успішно проведені дослідження Сонця космічними апаратами КОРОНАС-І та КОРОНАС-Ф. Орбітальні платформа для них (АУОС-СМ-КФ) була розроблена в КБ Південне та виготовлена на Південному машзаводі м. Дніпро. Обидві орбітальні обсерваторії були виведені на орбіту українськими ракетами Циклон-3. До складу наукової апаратури на борту входив і українсько-російський телескоп ДИФОС (ДИфракційний ФОтометр Сонця), який був створений в ГАО НАНУ (Київ), ФМІ НАНУ (Львів) та ИЗМИРАН (Троїцьк). Фотометр ДИФОС з високою точністю реєстрував зміни яскравості всього диска Сонця в трьох (КОРОНАС-І) і шести (КОРОНАС-Ф) спектральних каналах. Такі коливання мають незначну амплітуду ( $\sim 1/100000$ ) і можуть досліджуватись лише позаатмосферними космічними апаратами. [1,2,3]

Орбітальна обсерваторія КОРОНАС-І досліджувала Сонце в епоху зростання сонячної активності, а час дії обсерваторії КОРОНАС-Ф припав на фазу затухання активності Сонця (рис.1.). Експеримент ДИФОС за своєю конструкцією і завданням виявився дуже близьким до експерименту SOHO/VIRGO-SPM [6], який розпочався кількома роками пізніше.

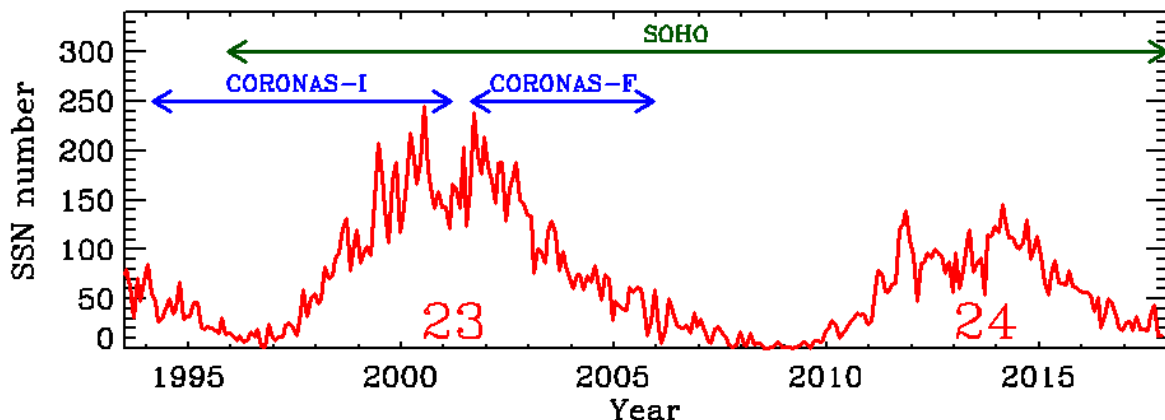


Рис.1. Експерименти КОРОНАС та SOHO на шкалі 23-го і 24-го циклів сонячної активності.

Фотометр ДИФОС обсерваторії КОРОНАС-І, внаслідок виходу з ладу АЦП, пропрацював лише 52 дні. Місія ДИФОС-Коронас-Ф була більш

успішною – фотометр штатно пропрацював весь період існування станції (1588 діб з 15 серпня 2001 р. до 5 грудня 2005 р.). На наземні приймальні антени передавались дані глобальних коливань яскравості Сонця в шести спектральних каналах (350 нм, 500 нм, 650 нм, 850 нм, 1.1 мкм та 1.5 мкм).

Обидва супутники КОРОНАС запускались на полярну орбіту з висотою біля 500 км і нахилом 83 градуси. Така квазісинхронна орбіта забезпечувала наявність періодів тривалістю до 20 днів, під час яких супутник знаходився поза межами тіні від Землі.

На відміну до КОРОНАСів, сонячна космічна обсерваторія SOHO була розташована в точці Лагранжа, що забезпечило неперервне освітлення приладів Сонцем. Другою принциповою відмінністю телескопа SOHO/Virgo-SPM (аналога ДИФОС) була оснащеність тільки трьома спектральними каналами (402 нм, 650 нм і 862 нм), які були значно вузкими ніж аналогічні у ДИФОС. Вкрай цікаво було порівняти дані цих експериментів.

## **ВСТУП**

Проект спрямовано на дослідження частотно-амплітудно-фазових характеристик глобальних п'ятихвилинних коливань Сонця. На першому етапі такий аналіз проводився для р-мод застосовуючи Фур'є-перетворення тривалих рядів спостережних даних отриманих з космічних фотометрів Коронас-ДИФОС-Ф, SOHO/Virgo та SOHO/Golf. Проведено систематизацію спостережень, первинну обробку даних, аналіз похибок. Розроблені методи та алгоритми досліджень та створені програмні коді для комп'ютерних обчислень. Для рядів даних, що мають розриви в часі, додатково застосовувався кореляційний аналіз. Результати космічних спостережень співставлено з даними наземних спостережень отриманими на телескопі VTT (Іспанія), які мають високу просторову роздільну здатність. Досліджено вплив найпотужніших сонячних спалахів на характеристики п'ятихвилинних коливань сонячної фотосфери.

## 1. ОБРОБКА ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТУ КОРОНАС-ДИФОС-Ф.

31 липня 2001 р. було успішно виведено на орбіту станцію КОРОНАС-Ф. Фотометр ДИФОС-Ф [1-3] почав працювати 15 серпня. Всі випробування апаратури пройшли успішно. 22 серпня були відкриті вхідні вікна фотоприймачів і розпочались активні спостереження Сонця. Практично одночасно з цим розпочався перший неперервний 20-денний період освітлення станції Сонцем.

### 1.1. ОБРОБКА ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ ДАНИХ

Під час роботи проаналізовані дані ДИФОС-Ф отримані через телеметричну систему RTS. В таблиці наведена схема кодування телеметричних даних. Написана відповідна комп'ютерна програма розкодування, яка враховує збої у передачі окремих байтів або груп байтів даних.

Структура інформації фотометра ДИФОС, яка виводиться до РТС

Номер відліку	ЦК № 152 МБ1	ЦК № 153 СБ1	ЦК № 154 МБ2	ЦК № 155 СБ2	Приміт.
n + 1	номер циклу байт 1	номер циклу байт 2	номер циклу байт 1	номер циклу байт 2	
n + 2	код часу байт 1	код часу байт 2	код часу байт 1	код часу байт 2	
n + 3	канал 1 байт 1	канал 1 байт 2	канал 2 байт 1	канал 2 байт 2	
n + 4	канал 3 байт 1	канал 3 байт 2	канал 4 байт 1	канал 4 байт 2	
n + 5	канал 3 байт 3	канал 1 байт 3	канал 4 байт 3	канал 2 байт 3	
n + 6	канал 5 байт 1	канал 5 байт 2	канал 6 байт 1	канал 6 байт 2	
n + 7	канал 7 байт 1	канал 7 байт2	канал 8 байт 1	канал 8 байт 2	
n + 8	канал 7 байт 3	канал 5 байт3	канал 8 байт 3	канал 6 байт 3	
n + 9	температура 1 байт 1	температура 1 байт 2	координата X байт 1	координата X байт 2	
n + 10	температура 2 байт 1	температура 2 байт 2	координата У байт 1	координата У байт 2	
n + 11					Далі інформація повторюється

Проведено порівняння якості даних під час різних епох орбіти, як безперервних 20-денних періодів освітлення станції Сонцем (епоха А), так і періодів з заходом станції у тінь від Землі (епоха В).

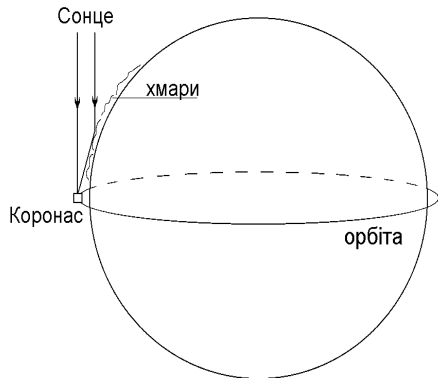


Рис.2а.

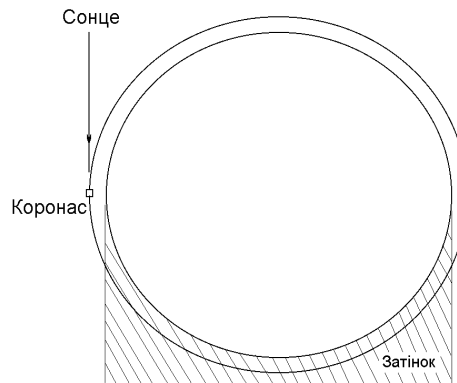


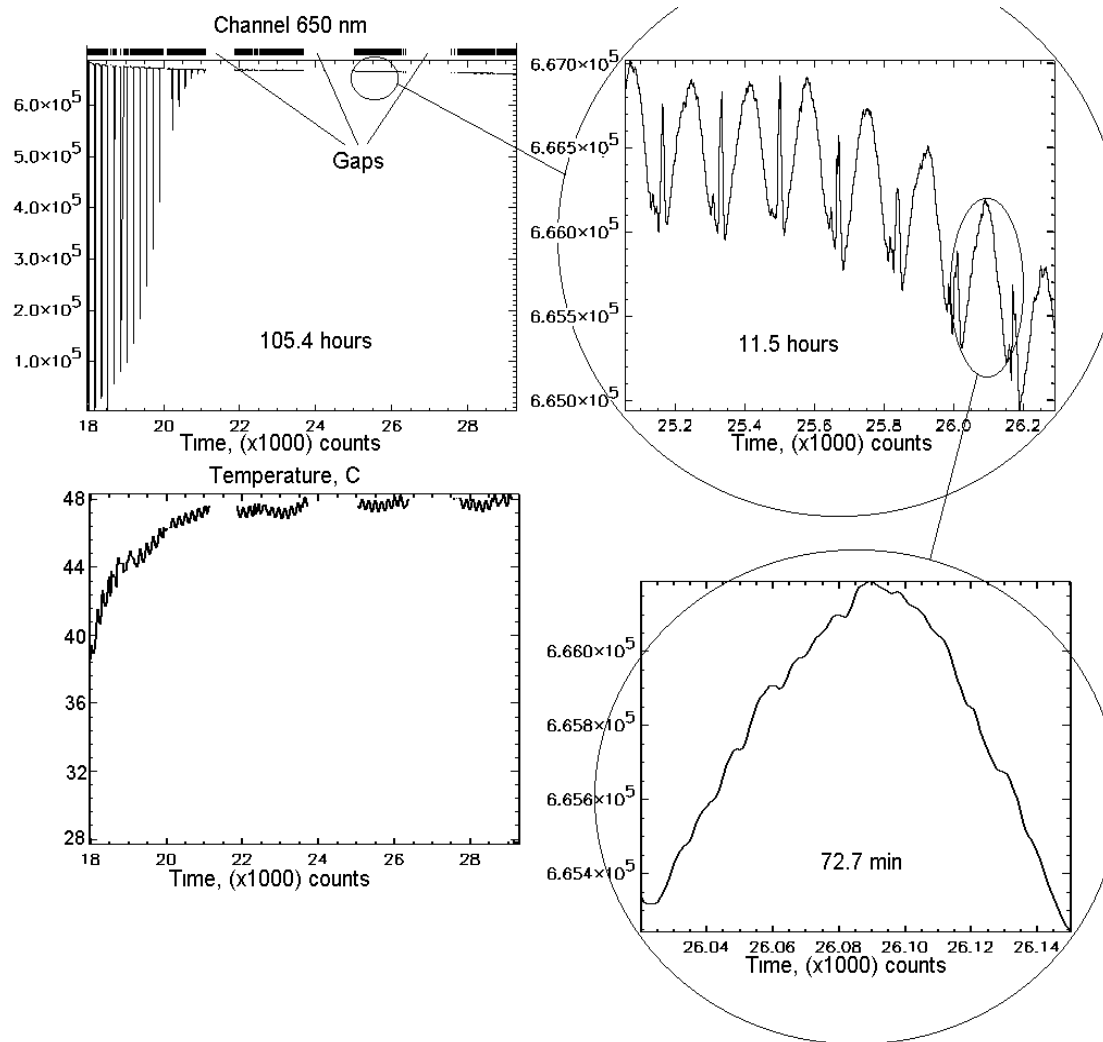
Рис.2б.

На рис.2 наведено принципову схему освітлення станції в різні епохи. Видно (рис.2а), що протягом 20-денного безперервного періоду якість даних постійно спотворюється бликами від поверхні океану, хмар, тощо. Стадія циклічного освітлення (рис.2б) спотворюється тільки в короткі моменти часу. Досвід обробки даних епохи А показав, що безперервний 20-денний ряд даних через наявність бликів перетворюється на ряд з розривами, які мають добову періодичність, тобто таку саму періодичність як і дані епохи В. Довжина “корисних” рядів (між розривами) епохи А дещо більша ніж відповідна довжина рядів даних епохи В, однак дані епохи В менш засмічені шумами. З цих міркувань ми схиляємося до того, що дані епохи В більш перспективні для наукового аналізу.

## 1.2. ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА ПЕРШИХ ДАНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

На рис. 3 показані перші дані спостережень у спектральному каналі 650 нм. У перші години спостережень можна побачити сильну періодичність пов’язану з заходами станції у тінь від Землі.





*Рис. 3. Перші чотири доби спостережень у каналі 650 нм.*

На етапі безтіньових спостережень ця ж сама періодичність (94.5 хвилини – період обертання навколо Землі) зберігається, однак амплітуда коливань сигналу незначна ( $\sim 0.1\%$ ). Ці коливання пояснюються зміною оптичної товщини шару земної атмосфери через який проходить випромінювання від Сонця. На етапі знаходження Землі під найгострішим кутом до напрямку станція-Сонце існують відблиски від диску Землі, які сильно спотворюють картину спостережень. Величина цих відблисків сильно залежить від довжини хвилі спектрального каналу (зростає у інфрачервоній області). З малюнка видно загальний дрейф сигналу та 5-ти хвилинні осциляції яскравості, які треба досліджувати. Зміни температури фотодіодів (в цей період ніякого термостатування не проводилось) також виявляють 95-ти хвилинну

періодичність. Канал 350 нм демонструє деяку деградацію з часом (чутливість зменшується). Це можна пояснити сильним старінням скляних фільтрів під дією сильного УФ-випромінювання.

Надходження даних зі станції КОРОНАС-Ф спотворювались збоями телеметрії. На лівій верхній панелі рис.3 чорна смуга відповідає періодам часу, коли дані надходили без будь яких ушкоджень, проміжки на смузі (Gaps) відповідають збойним періодам часу. Дані першого періоду спостережень використовувались для розробки алгоритмів програм для автоматизованого видалення дрейфів сигналу внаслідок поглинання та розсіяння світла в земній атмосфері, трендів внаслідок природного старіння світлофільтрів та фотодіодів у космосі, вирізання ділянок спотворених відблесками від диску Землі та збоями телеметрії.

### 1.3. ПІДГОТОВКА ДАНИХ ДО ОБРОБКИ

Проведений нами аналіз даних фотометра на основі перших днів роботи станції показав, що сплески сигналу між витками можуть пояснюватись відблесками сонячного світла від хмар чи від поверхні океану в моменти коли промінь зору від фотометра є практично дотичний до земної поверхні. Оскільки поглинання і розсіювання світла назад пропорційне четвертій степені довжини хвилі, те цей ефект збільшується від ультрафіолетового діапазону до інфрачервоного. При обробці ділянки зі сплесками вирізалися.

Вплив спільного ефекту розсіяного світла та коливань прозорості земної атмосфери було вирішено моделювати методом підгонки поліномів 3-го ступеня до сигналів на кожному витку супутника. Бліки від земної поверхні визначались за аналізом другої похідної в зонах найменшого сигналу у витку і, пізніше, вирізались з початкового сигналу. Позиціонування зони найменшого сигналу контролювалось температурним каналом, дані якого були не чутливими до бліків сигналу. Ділянка вирізання визначалась як сума ділянок у перших п'яти каналах (поки що незрозуміло чому міжвиткові сплески у каналі

1500 нм не співпадають з мінімумами 95-хвилинних періодичностей). Що стосується телеметричних збоїв, то поки що вирішено для остаточної обробки лишати ті фрагменти даних, які мають довжину не меншу 30 хвилин, причому цей інтервал має бути узгодженим у всіх каналах даних.

Інші дні спостережень (на третьому місяці польоту) продемонстрували наявність бліків не у міжвиткових зонах, а на найбільш інтенсивних ділянках витків. Це може свідчити, що причиною бліків є якісь елементи станції. Це питання поки ще відкрите, але зрозуміло, що алгоритм вирізання бліків не може бути пов'язаний з якоюсь конкретною фазою витка і зона вирізання має визначатись безпосередньо з місця положення бліка.

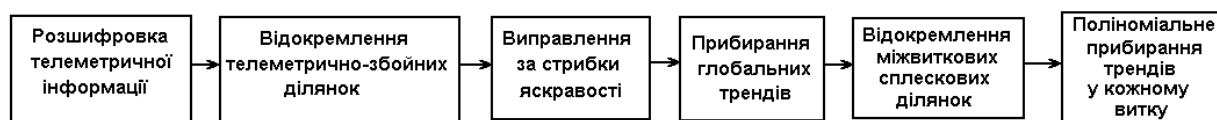


Рис.4. Блок-схема попередньої обробки даних ДИФОС-Ф.

Згідно цим принципам створені відповідні алгоритми та комп'ютерні програми для первинної обробки інформації з телескопа ДИФОС. На виході цих програм отримуються послідовні часові серії даних коливань яскравості довжиною 30-90 хвилин узгоджені для різних спектральних каналів і придатні для спектрального аналізу коливань, досліджень фазових зсувів тощо.

#### 1.4. МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНИХ РЯДІВ ПОСТЕРЕЖЕНЬ

Під час роботи нами розроблювались та аналізувались різні методи обробки частково заповнених рядів спостережень призначених для оцінок спектрів потужності сигналу. Відразу треба зауважити, що тут ми не розглядали синтетичні методи, які, в принципі, можуть бути найкращими при відтворенні амплітуд та позицій окремих мод коливань при умові симетричного розподілу потужності в моді. Зараз вже добре відомо, що профілі сонячних мод є асиметричними, тому ми розглядали методи, які *a priori* не вводять ніяких додаткових припущень, а саме

а) прямий метод при заповненні міжінформаційних ділянок нулями;

б) прямий метод при заповненні міжінформаційних ділянок регресійними даними; робилось припущення про стаціонарність коливального процесу, авторегресійні оцінки виконувались на основі багатопараметричних моделей, у зонах відсутності сигналу проводилось відповідне усереднення з різною вагою оцінок для передбачень вперед і назад. По відношенню до методу а) суттєво зменшувалась швидкість обрахунків;

в) метод усереднення спектрів на окремих виткових ділянках. При низькій роздільній здатності забезпечує дуже високу точність;

г) комбінований (періодограмно-корелограмний) метод, запропонований Натолом та Картером у 1988 р. Цей метод складався з чотирьох етапів: 1. Обчислювалась звичайна періодограма (Уелча або Бартлета). 2. Обчислювалось зворотне перетворення Фур'є для отримання симетричної оцінки автокореляції. 3. Ця оцінка оброблювалась симетричним кореляційним вікном для отримання зваженої автокореляційної оцінки. 4. Обчислювалось пряме перетворення Фур'є для оцінки спектру потужності. Таким чином вдавалось керувати рівнем бокових пелюстків (придушувати просочування), а також отримувати досить високу спектральну роздільну здатність.

В методах а-в ряди даних оброблювались аподизуючими спектральними вікнами Хемінга або Натола. Розроблені відповідні алгоритми та складені комп'ютерні програми для обрахунків.

Для порівняння цих методів між собою ми провели математичне моделювання відтворювання заданого спектру різними методами при параметрах коливань близьких до тих, що отримуються з фотометра ДИФОС.

Початковий спектр являв собою сукупність чотирьох мод різної амплітуди (10, 3, 5 та 10) на частотах 2.865, 2.993, 3.140 та 4.499 мГц. Ці частоти вибрані тому, що вони відповідають вузлам частотної шкали для тестового 10-ти виткового ряду даних і, крім того, відстань між першими трьома близька до величини великого сонячного розщеплення (136 мкГц). На

додаток дані були спотворені гаусовим шумом різної величини та додано залишковий тренд на частоті 100 мкГц. Для довжини ряду даних, що відповідає 10 орбітальним виткам при малому рівні шумів, результати наведені на рис. 5. Панель *a* демонструє вихідний ряд даних і, відповідно, його спектр потужності. Відразу треба зауважити, що тут і надалі заштриховані кружечки показують амплітуди коливань не в екстремумах, а у вузлах частотної шкали. Тому деякі відмінності у видимих максимумів мод є презентаційним ефектом. На панелі *b* можна побачити ряд даних доступний для обробки (з розривами) і обрахований спектр потужності за умови заповнення розривів нулями.

На панелі *c* те ж саме, але при аподизації даних кожного витка. Така аподизація приводить до зменшення витікання потужності (видно ефект зменшення хибної потужності в зоні 3.5-4.0 мГц), але приводить до зростання хибних обертонів  $(\sin x)/x$  пов'язаних з витковою періодичністю  $P$  (хибні максимуми відстоять від справжніх мод на відстанях  $1/P$ ). На панелі *d* представлені результати регресійного метода. Регресія (відтворення) даних проводилась на основі даних показаних на лівій частині панелі *b*. Панель *e* демонструє результати комбінованого метода.

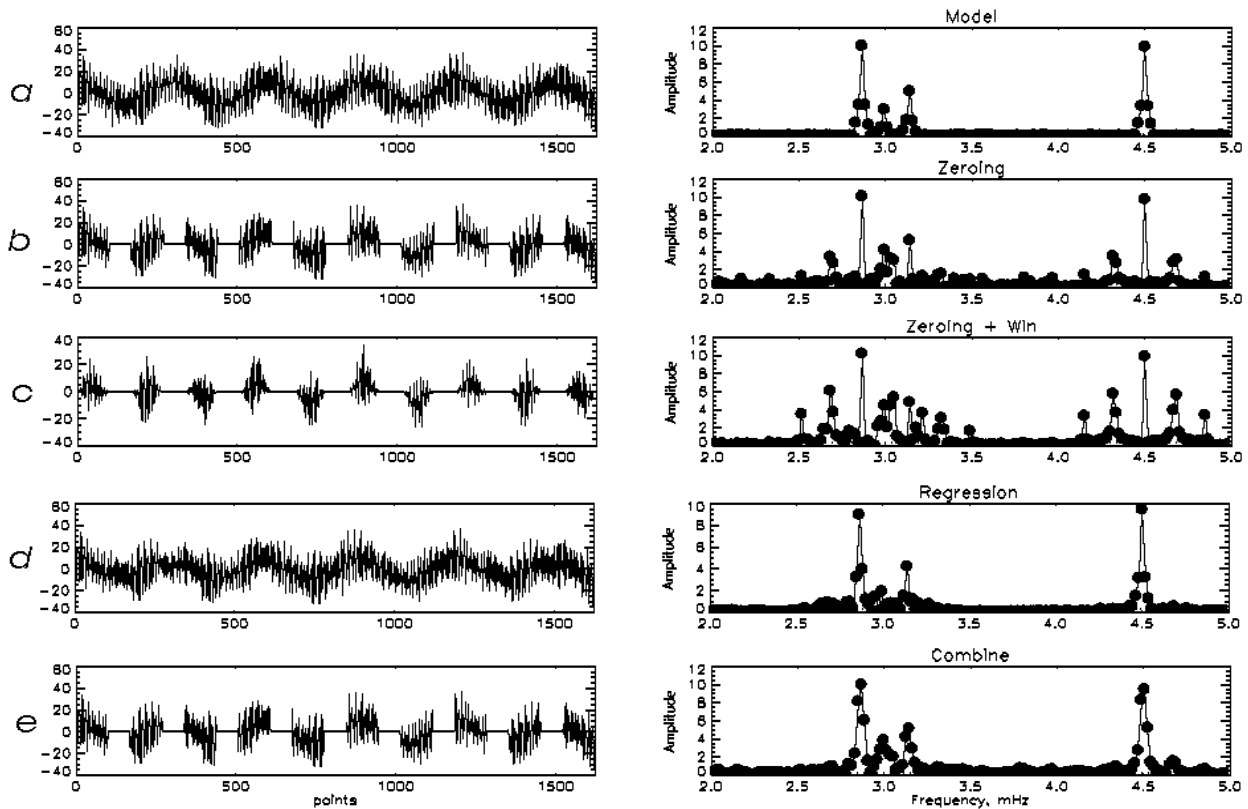


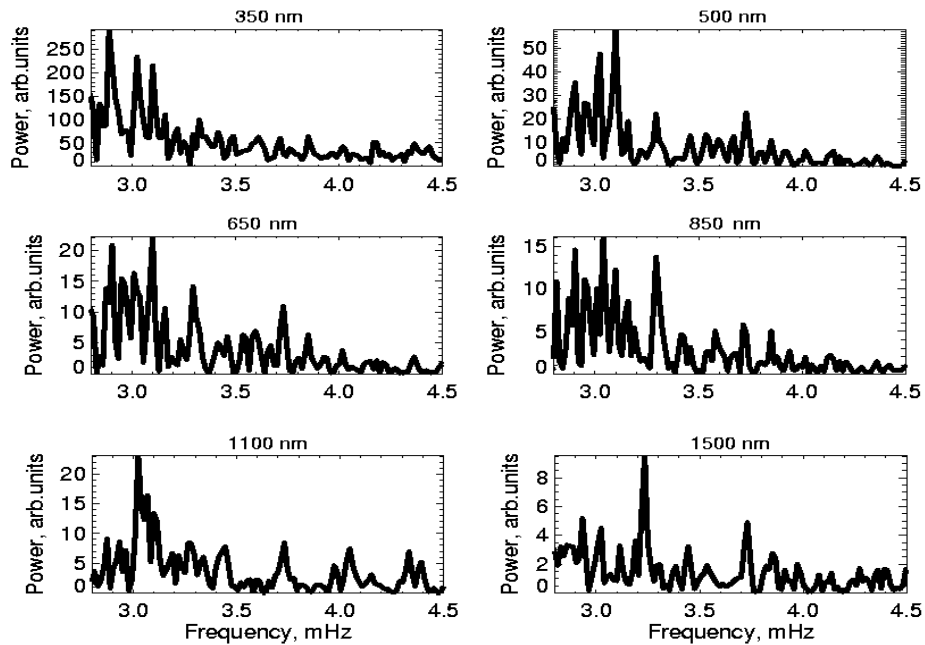
Рис. 5. Моделювання рядів при низьких шумах.

У комбінованому методі найкраще відтворюється стартовий розподіл тестових амплітуд і він є найбільш стійким до впливу шумів, проте, з іншого боку, регресійний метод є найменш чутливим до впливу хибних обертонів. Взагалі тандем цих двох методів є гарним інструментом для дослідження даних фотометра ДИФОС. Комбінований метод виглядає кращим при ідентифікації мод.

#### 1.5. СПЕКТРИ ПОТУЖНОСТІ 5-ХВИЛИННИХ ОСЦИЛЯЦІЙ В РІЗНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛАХ З ПОМІРНОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ ТА ЇХ ПОРІВНЯННЯ З ДАНИМИ НАЗЕМНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Оцінювались спектри потужності різними методами і для різних періодів роботи фотометра. На рис. 6. приводяться отримані комбінованим методом спектри потужності з помірною роздільною здатністю за даними експерименту ДИФОС для різних спектральних каналів для відліків 25154-26188 (витки 363-372). Для спектральних вікон 650 нм і 850 нм, в яких дані вимірювань дублювались, проводилось усереднення спектрів. З рисунку видно, що

потужність п'ятихвилинних коливань в ультрафіолетовій частині спектру зростає. Це пояснюється і підвищеною чутливістю коливань інтенсивності УФ-діапазону до температури і зростанням потужності коливань з висотою атмосфери.



*Рис. 6. Спектри потужності в різних каналах за даними фотометра ДИФОС.*

Дводенні амплітудні спектри використовувались для визначення залежності відносної амплітуди коливань від довжини хвилі. Усередненна амплітуда р-мод в інтервалі 2.5-3.5 мГц. обраховувалась для кожного такого спектру. Після цього ці величини усереднювались по всім дводенним спектрам. Така процедура була зроблена для всіх шести каналів. Отримана таким чином залежність відносної амплітуди коливань від довжини хвилі спостережень приведена на рис. 7. Привертає увагу значне збільшення амплітуд в короткохвильовій ділянці спектру, що узгоджується з теоретичними розрахунками. Порівняння цього результату з даними наземних спостережень [4] і спостережень проведених на космічній обсерваторії SOHO [5] дає гарне узгодження.

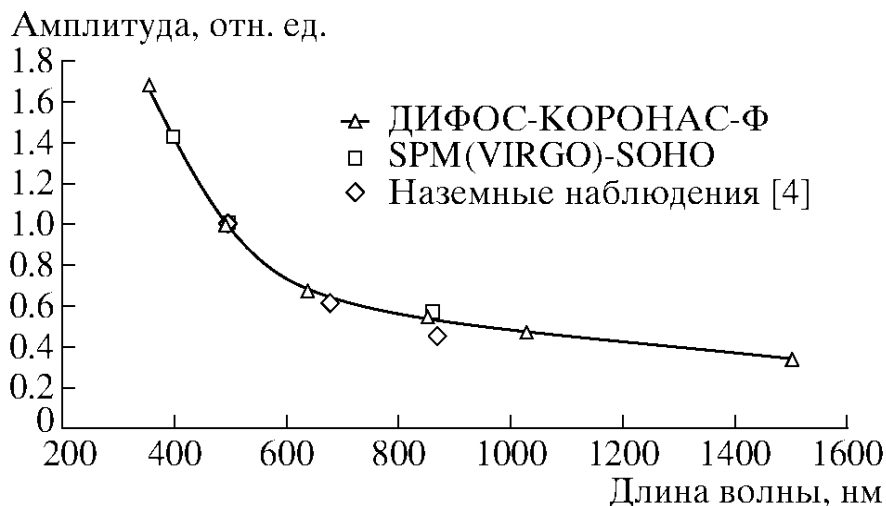


Рис. 7.

Амплітуда коливань кожної окремої моди залежить від довжини хвилі, на якій вона спостерігалась, і визначається глибиною формування випромінювання в сонячній атмосфері на цій довжині хвилі. Отримана залежність є експериментальною базою для перевірки результатів теоретичних розрахунків і моделювання умов в області формування випромінювання в діапазоні хвиль 350-1500 нм.

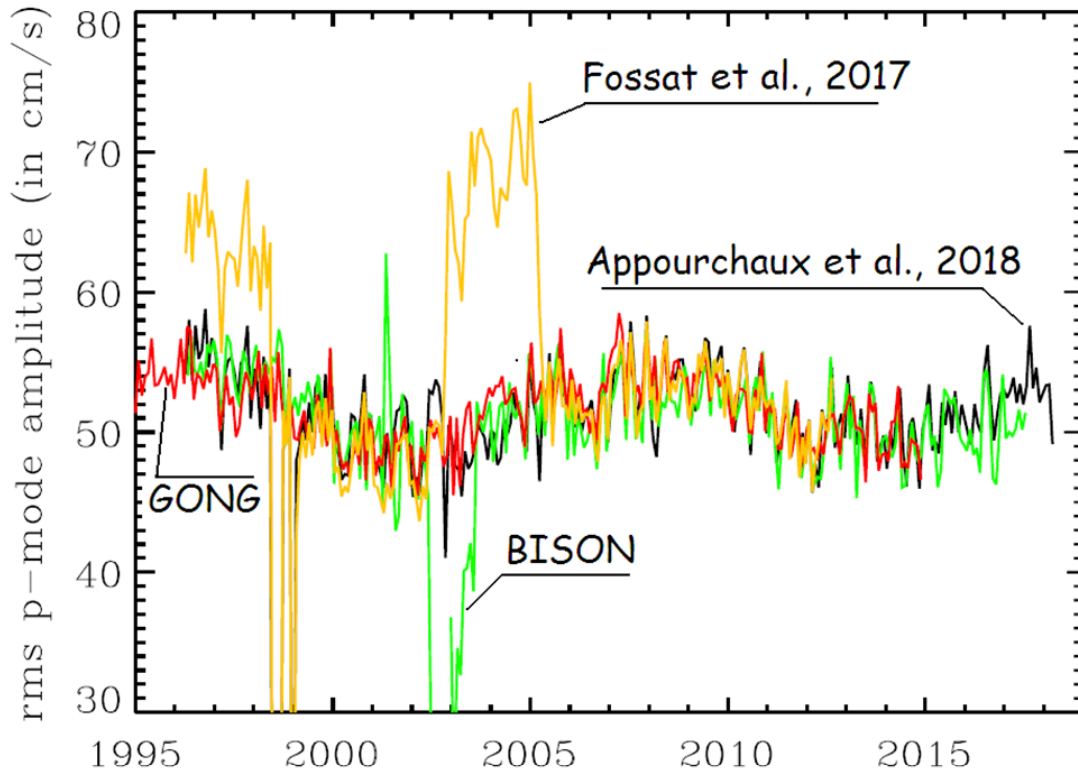
## 2. ЗБІР ТА АНАЛІЗ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ SOHO/VIRGO/SPM ТА SOHO/GOLF

Проведено збір даних експериментів SOHO/VIRGO/SPM та SOHO/GOLF, які є у відкритому доступу.

Наразі дані отримані з фотометра VIRGO/SPM найбільш повно представлені в паризькому центрі обробки інформації – тривалість рядів даних всіх трьох каналів досягла майже 18 років (до 30 березня 2014р.) [17]. Слід зауважити, що на відміну від більш ранніх версій таких пакетів даних, останній випуск містить дані, з яких видалено загальні тренди змін яскравостей. Це суттєво підвищує точність подальшої обробки, тому що видалення трендів із загальних міркувань не може врахувати специфічні низькочастотні збурення даних, відомі тільки членам команди супроводу космічного експерименту.



Проаналізовані нові літературні дані отримані в експерименті SOHO/GOLF) [14, 15]. Дані [14] мають більшу тривалість і, головне, в порівнянні з [15] мають менші шуми та містять менше збоїв (рис.8).



*Рис. 8. Середнє квадратичне амплітуд коливань швидкості за даними [14, 15] та їх порівняння з даними інших експериментів.*

Дані [14] на відміну від [15] зберегли вихідний 20-секундний каданс вимірів, що важливо при дослідженнях НІРs-мод. Слід наголосити, що внаслідок технічних проблем, які виникли протягом експерименту SOHO/GOLF, калібровка цих даних можлива лише внутрішньою командою GOLF. Під час такої калібровки враховуються навіть дані температурного датчика приймача даних. Загалом дані [14] довели загальну тривалість рядів спостережень до 22 років. Вони мають менше пропусків в порівнянні з даними, які ми використовували для обчислень в минулі роки [16], що дає підстави для певних переобрахунків наших результатів отриманих раніше.

### 3. ПОРІВНЯННЯ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ КОРОНАС-ДИФОС-Ф ТА SOHO/VIRGO/SPM.

В експерименті VIRGO-SPM два з трьох канали практично співпадають з каналами ДИФОС. На рис.9 для цих двох каналів порівнюються спектри в області двох мод для вибраного ряду даних одночасно вимірюваних із станцій КОРОНАС і СОХО.

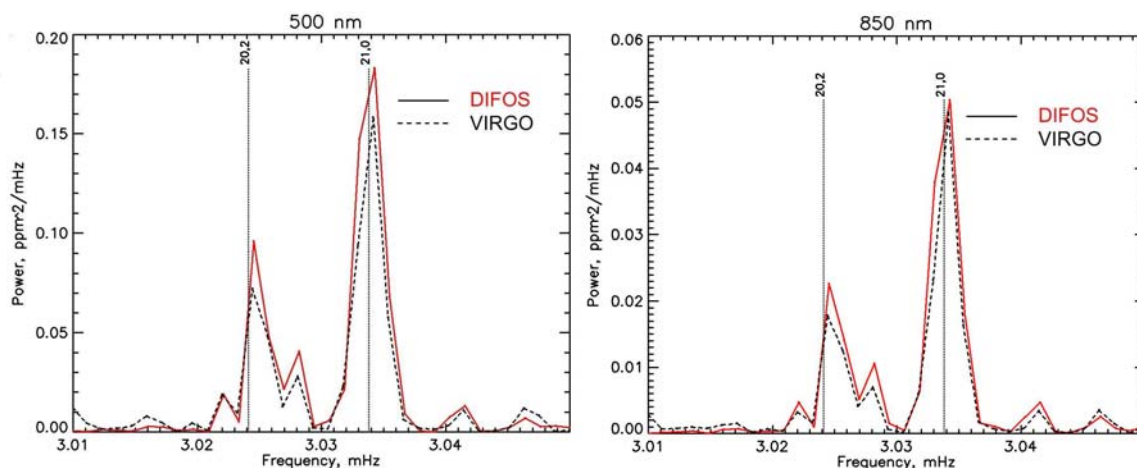


Рис.9. Спектри потужності коливань в області р-мод (20,2) та (21,0), отримані за даними фотометрів ДИФОС (суцільна лінія) та VIRGO (пунктир).

Видно, що результати чудово узгоджуються як за потужністю так і за спектральним профілем. Тому, дуже цікавим і актуальним є порівняння результатів VIRGO-SPM і ДИФОС між собою.

#### 3.1 Дослідження амплітудних характеристик коливань яскравості.

З отриманих спостережних рядів фотометру ДИФОС для аналізу вибрано найбільшу ділянку вільну від телеметричних збоїв. Вона відповідає проміжку часу від 15<sup>h</sup>34<sup>m</sup> UT 19.02.2002р. до 3<sup>h</sup>44<sup>m</sup> UT 1.03.2002р. Загалом це більш ніж 228 годин безперервних спостережень. Попередня обробка даних починалась з прибирання лінійних трендів. Після цього тренди, пов'язані з коливанням прозорості внаслідок обертання супутника навколо Землі, видалялись шляхом віднімання середнього розподілу яскравості під час витка, який визначався за

вісьмома витками (бігуче середнє). Такий підхід не є ідеальним, бо періоди мод, які є кратними періоду обертання супутника навколо Землі, штучно придушуються. Далі ми виключаємо такі моди з наших аналізів. Відліки, що виходили за межі  $3\sigma$ , замінювались на проінтерпольовані, виходячи з сусідніх даних.

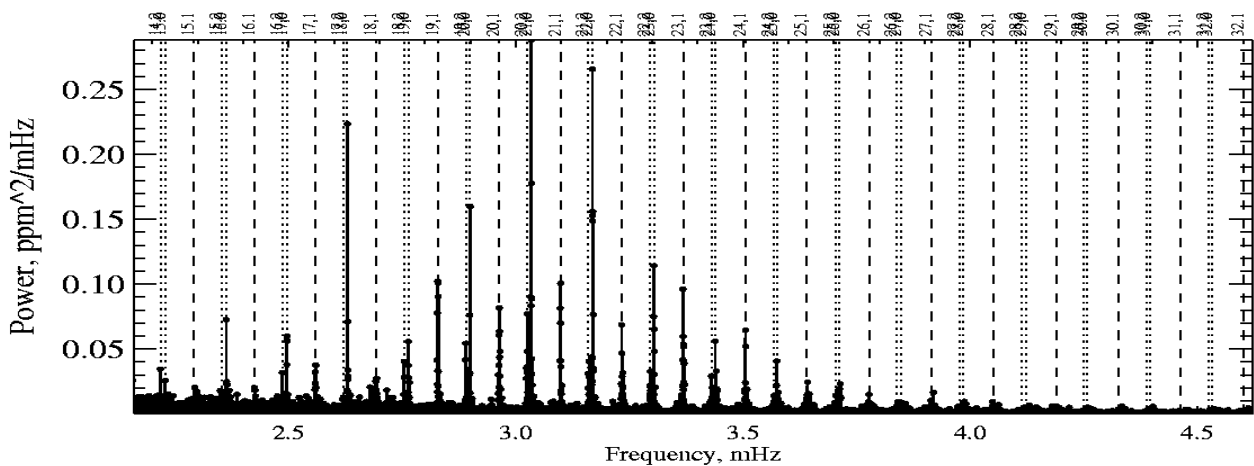


Рис.10. Спектр потужності коливань і теоретичні позиції  $p$ -мод.

Фур'є-аналіз рядів даних дозволив побудувати спектри потужності коливань яскравості з роздільною здатністю 1.2 мкГц. На рис.10 приведено такі спектри для п'ятихвилинних коливань. Вертикальними штрих-лініями відмічені табличні дані для  $p$ -мод взяті з [7].

### 3.2 Дослідження фазових залежностей коливань між різними спектральними каналами.

Наразі проведено кілька експериментів, в яких досліджувались зсуви фаз. Цікаво, що серед спектральних каналів кожного експерименту є канали 500 нм та 850 нм. Тобто дані експериментів можна порівнювати між собою. У кожному експерименті був задіяний великий колектив дослідників. Однак у всіх роботах присутній Антоніо Джіменес. Ще у 1986 році Джіменес розробив унікальний фотометр для наземних спостережень коливань яскравості усього Сонця і були проведені спостереження на протязі 15 днів по 8.5 годин кожного

дня. У 1988р. були опубліковані дані про фазові зсуви [8]. Ніякого достовірного зсуву фаз виявлено не було.

Під час місії ФОБОС у 1988р. було проведено космічний експеримент ІФІР. Спостереження тривали 155 днів. Обробка цих даних [9] показала наявність помітних фазових зсувів. Дискутувалась лише залежність величини цих зсувів від частоти коливань.

Спостереження з геліосейсмологічної обсерваторії SOHO тривають з 1996 року. Обробка рядів даних фотометру Virgo/SPM тривалістю 29 діб [10] підтвердила наявність фазових зсувів. Показано, що ці зсуви досягають максимуму на частотах 3.5-3.7 мГц. Крім того, виявлено, що коливання яскравостей мод різних ступенів  $l$  мають різні фазові зсуви.

За стандартною процедурою обчислення зсувів фаз  $\varphi(\nu)$  між коливаннями  $A(n)$  і  $B(n)$  визначається так

$$\mathbf{P}_A = \text{FFT}^{-1}(A(n) \cdot W(n)),$$

$$\mathbf{P}_{AB} = \mathbf{P}_A \cdot \mathbf{P}_B^*,$$

$$\Delta\varphi(\nu) = \text{arctg}(\text{Im}(\mathbf{P}_{AB}(\nu)) / \text{Re}(\mathbf{P}_{AB}(\nu))),$$

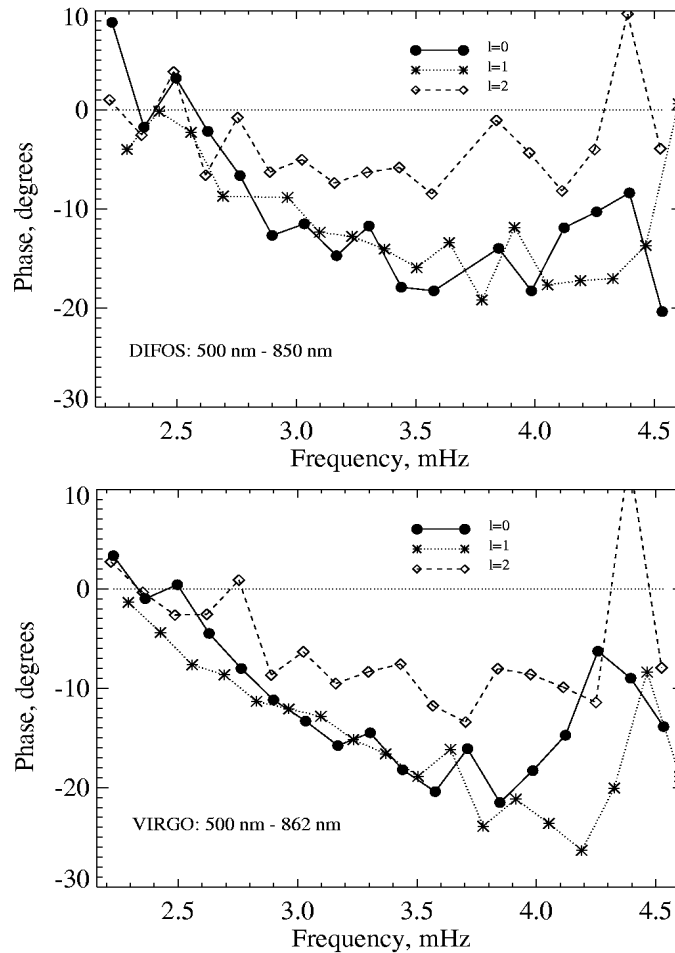
де  $\text{FFT}^{-1}$  – зворотнє перетворення Фур'є,  $W(n)$  – косинусне аподизуюче вікно.

Жирним шрифтом позначені комплексні числа,  $\mathbf{P}_B^*$  - комплексне сопряжене.

Зрозуміло, що фази можливо точно визначити лише безпосередньо в модах. Між модами вимірювана потужність не тільки мала за величиною, але й відображає шуми різної природи, які аж ніяк не можуть бути предметом вимірювань. Ситуація ускладнюється тим, що мода змінна в часі і її спектральний профіль та його точне положення також змінні. Тому для кожної моди її фазові характеристики визначались у спектральному інтервалі шириною біля 4 мГц, причому усереднення значень всередині інтервала проводилось таким чином

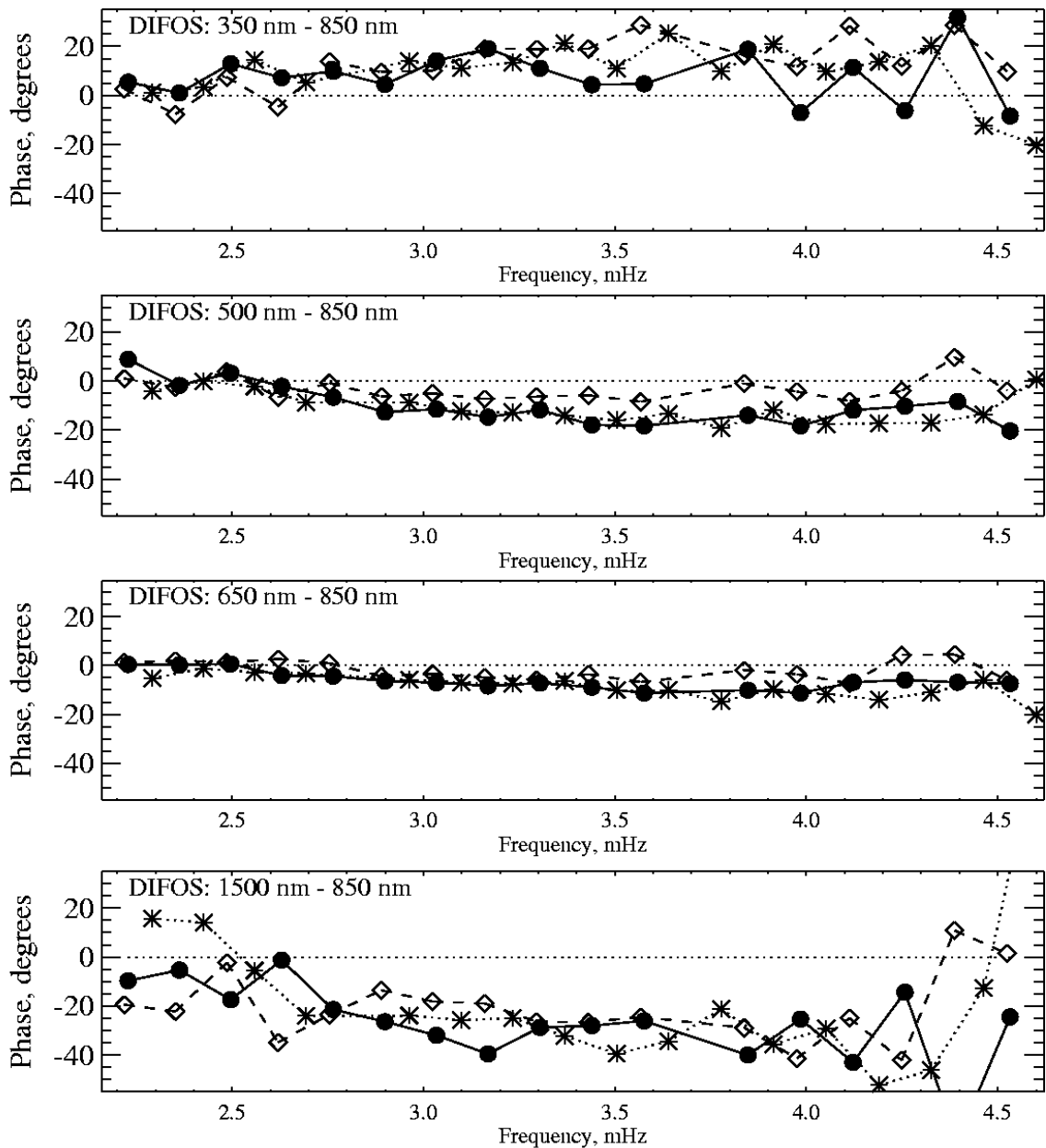
$$\Delta\varphi_{\text{mode}} = \sum_i (|\mathbf{P}_{ABi}| \cdot \Delta\varphi(\nu_i)) / \sum_i (|\mathbf{P}_{ABi}|).$$

Виходячи із кращого відношення сигнал/шум для VIRGO ми порахували зміну фаз між каналами для того ж самого 228-годинного ряду даних і для значно довшого 41-денного періоду спостережень (рис.11).



*Рис.11. Зсуви фаз між каналами 500 нм та 850 нм для однакового 228 годинного ряду даних по даним ДИФОС та VIRGO/SPM.*

Видно, що дані чудово збігаються. Тобто “короткий” 228-годинний ряд є репрезентабельним для такого роду досліджень. Крім того, результати, отримані з обробки “коротких” рядів даних в каналах 500 нм і 850 нм з фотометрів ДИФОС і Virgo/SPM також добре узгоджуються. Це означає, що ми можемо з впевненістю довіряти результатам обробки всіх каналів ДИФОС у “короткому” ряді.



*Рис.12. Зсуви фаз між каналами фотометру ДИФОС відносно реперного каналу 850 нм.*

З проаналізованого нами 228-годинного ряду даних видно, що фазові зсуви досягають максимуму для частот 3.5-3.8 мГц (рис.12). Це є наслідком покращення “прозорості” сонячної фотосфери для акустичних хвиль. Видно, що існує залежність фазових зсувів між коливаннями в різних каналах від степені мод. На рис.13 ми привели дані змін фаз у діапазоні 3-4 мГц, тобто для частот, де відбуваються найсильніші зміни. Виявлено, що на монотонному ході змін фаз з висотою існують невідомі раніше фазові злами в спектральних

ділянках 350-450 нм і 800-1500 нм, тобто в нижній фотосфері і на висотах порядку 150-200 км.

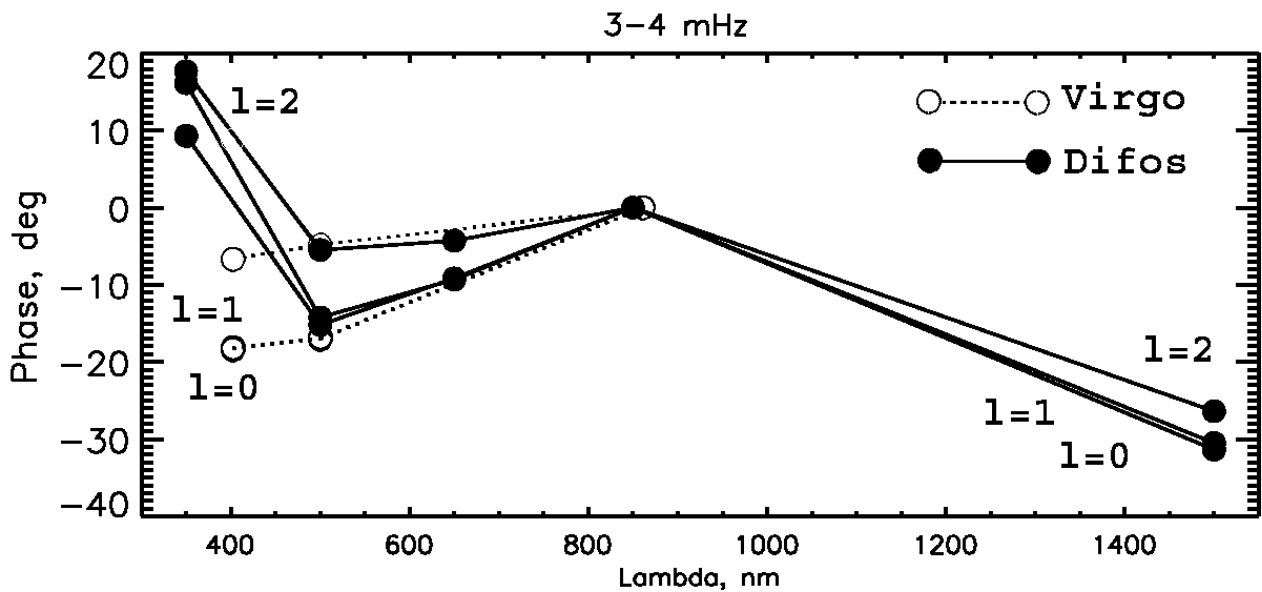


Рис.13. Фазові залежності коливань яскравості в різних каналах для різних мод по даним ДИФОС та VIRGO/SPM.

Причиною таких фазових зламів в області 800-1500 нм, що відповідає випромінюванню з висот граничних між конвективною зоною і фотосферою, є зміна характеру розповсюдження хвилі (перехід від бігучих до еванесцентних хвиль). Залежність фазових зсувів від степені мод викликана швидше за все взаємодією між резонансними та фоновими хвилями.

#### **4. ВПЛИВ СОНЯЧНИХ СПАЛАХІВ НА СПЕКТРИ ПОТУЖНОСТІ ТА НА ФАЗОВІ СПЕКТРИ П'ЯТИХВИЛИННИХ КОЛИВАНЬ СОНЦЯ**

Дослідження амплітудно-фазово-частотних (АФЧ) параметрів акустичних п'ятихвилинних хвиль у сонячній атмосфері важливі для розуміння процесу розповсюдження таких хвиль і допомагають уточнити фізичні параметри атмосфери. Існує низка робіт присвячених вивченню зміни характеристик таких хвиль з 11-річним циклом сонячної активності, в яких доведено зменшення потужності і збільшення частоти мод коливань при зростанні активності Сонця. Однак на менших шкалах часу (тижні і місяці) таких досліджень практично не існує. В цьому ряді стоїть і проблема дослідження впливу спалахів на АФЧ- характеристики акустичних сонячних хвиль. З робіт Амбаста, Басу, Антіа [12] та Кумар, Равіндра [13] відомо, що спалахи впливають на характеристики коливань високих просторових степенів. Однак досі невідомий вплив спалахів на коливання низьких степенів. Що стосується фазових характеристик коливань, то дослідження їх змін з часом взагалі не проводилось. Пояснюється це складністю отримання експериментальних даних з необхідною точністю. Тільки тривалі позаатмосферні спостереження дозволяють отримати такі дані. Великою проблемою при таких дослідженнях є те, що дослідження поведінки окремих мод вимагає аналізу тривалих рядів спостережень, а власне сама тривалість сонячного спалаху є короткочасною. Крім того, дослідження можуть бути проведені не для всіх мод, а лише для тих, які не затухали під час спалаху, внаслідок обмеженої тривалості свого життя

На основі даних отриманих на фотометрі VIRGO/SPM космічної лабораторії SOHO для чотирьох потужних спалахів останніх років пораховані амплітудно-фазові параметри акустичних коливань для інтервалів часу тривалістю два-три тижні до, під час і після спалахів. Для аналізу використовувались надкороткі ряди даних (4-7 діб). Основні результати таких досліджень приведені в роботі [11]:



1. Амплітуди мод можуть як підвищуватись так і спадати під час спалахів.

2. Відношення потужності коливань між каналами 402 і 862 нм спадає протягом спалаху, тобто зменшується градієнт зміни потужності коливань з висотою.

3. Зсуви фаз коливань між каналами 402 і 862 нм збільшувались під час спалаху, а після спалаху поновлювали своє попереднє значення.

4. Частота мод малочутлива до спалахів. Під час спалаху частота мод зменшується.

Однак тепер, після доступу до нових даних [14,17], є нагода дослідити жовтнево-листопадовий період 2003р., раніше недоступний внаслідок збоїв даних. Цим дням була притаманна надзвичайно висока спалахові активність Сонця (“події Хелоуін”). 28 жовтня прямо по центру диска Сонця в активній групі AR486 відбувся спалах класу X17, а через тиждень, 4 листопада відразу після того, як ця група сховалась за лімбом стався рекордний за силою спалах останнього часу. Виникли проблеми в оцінюванні сили цього спалаху – за найнижчою оцінкою така сила була оцінена як X28.

Нами досліджена зміна різних параметрів п’ятихвилинних коливань в залежності від часу на фоні розвитку цих двох спалахів. Для можливості досягнення роздільної здатності достатньої для аналізу окремих мод спектри будувались при обробці рядів даних довжиною 7 днів. Саме цим була викликана низька часова роздільна здатність на рисунках, яку треба пам’ятати при інтерпретації результатів.

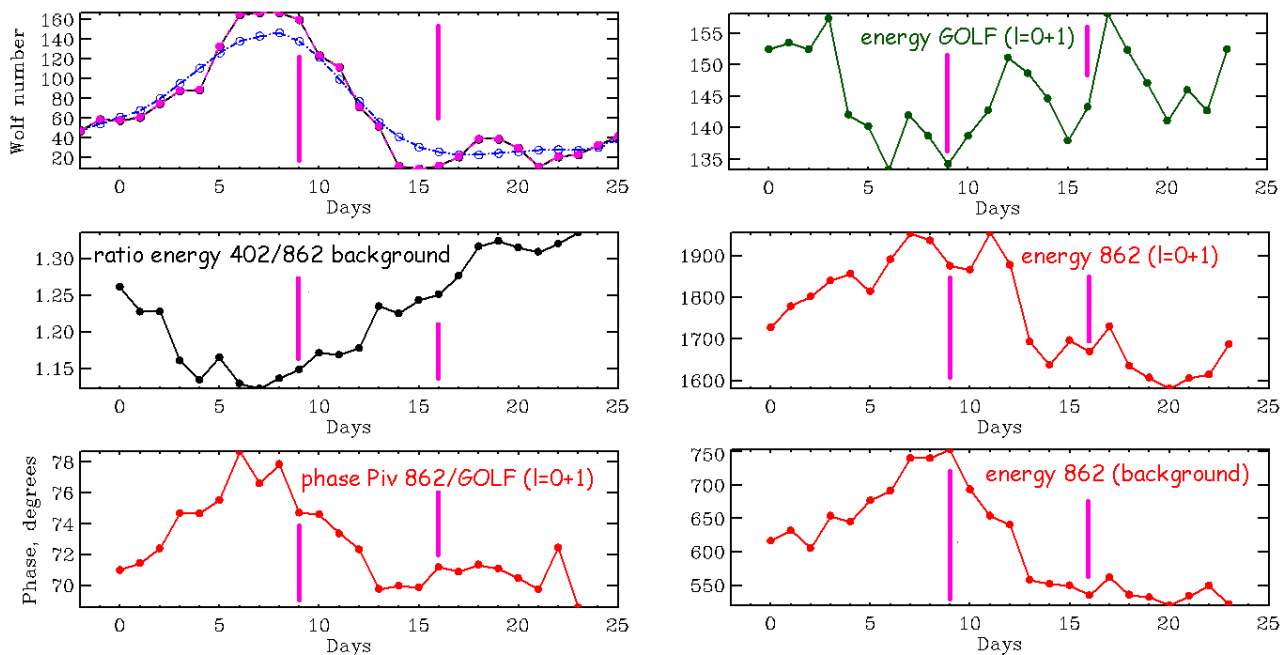


Рис.14. Спалаховий Хелуоїн 2003р. Вертикальними рисками позначені спалахи 28.10.03 і 4.11.03. Ліворуч: зверху – Числа Вольфа, посередині – відношення енергії мод в каналах яскравості 402 і 862 нм, знизу – зсув фаз між яскравістю 862 і швидкістю. Праворуч: зверху – зміни енергії мод коливань швидкості, посередині – зміни енергії мод коливань яскравості (862 нм), знизу – зміни енергії міжродових ділянок для коливань яскравості (862 нм).

Загалом, виходячи з результатів наведених на рис.14, ми підтверджуємо всі чотири висновки попередніх досліджень. Фазові зміни можуть бути проінтерпретовані змінами акустичної прозорості для хвиль в сонячній атмосфері за межами резонатору, зміни потужностей можуть бути проінтерпретовані як змінами самого сонячного резонатору, так і змінами сонячної атмосфери. А от зміни частот мод інтерпретуються тільки змінами резонатору.

Ми проаналізували дві найсильніших моди, які існували в цей час:  $l=(20,1)$ , 3.2332 мГц та  $l=(21,1)$  3.0987 мГц. Час активної фази спалахів 28.10.03 та 4.11.03 локалізується на кривих змін частот мод. Причому перший спалах проявляється акцентованіше для моди  $l=(21,1)$ , а другий спалах для моди  $l=(20,1)$  (рис.15).

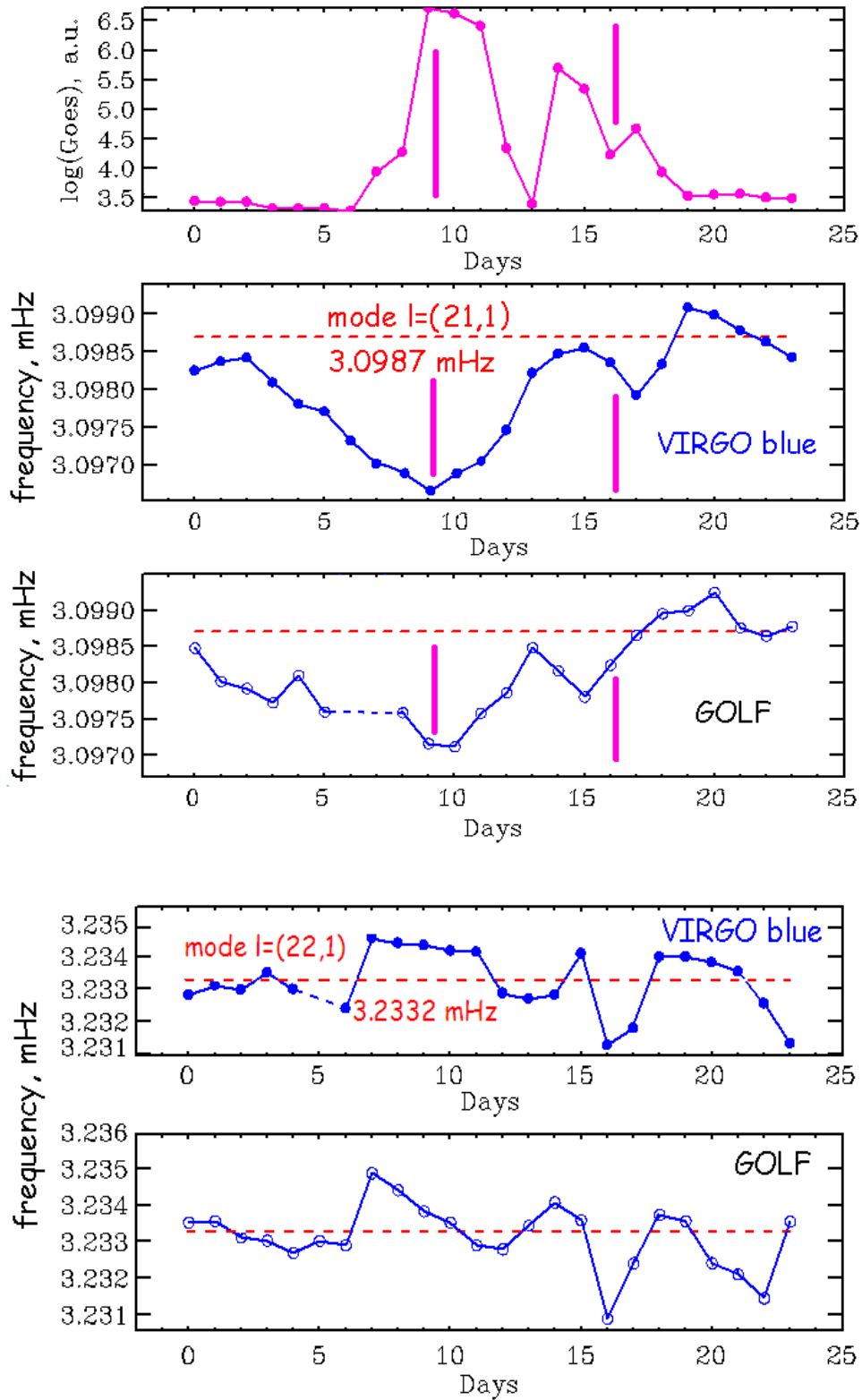


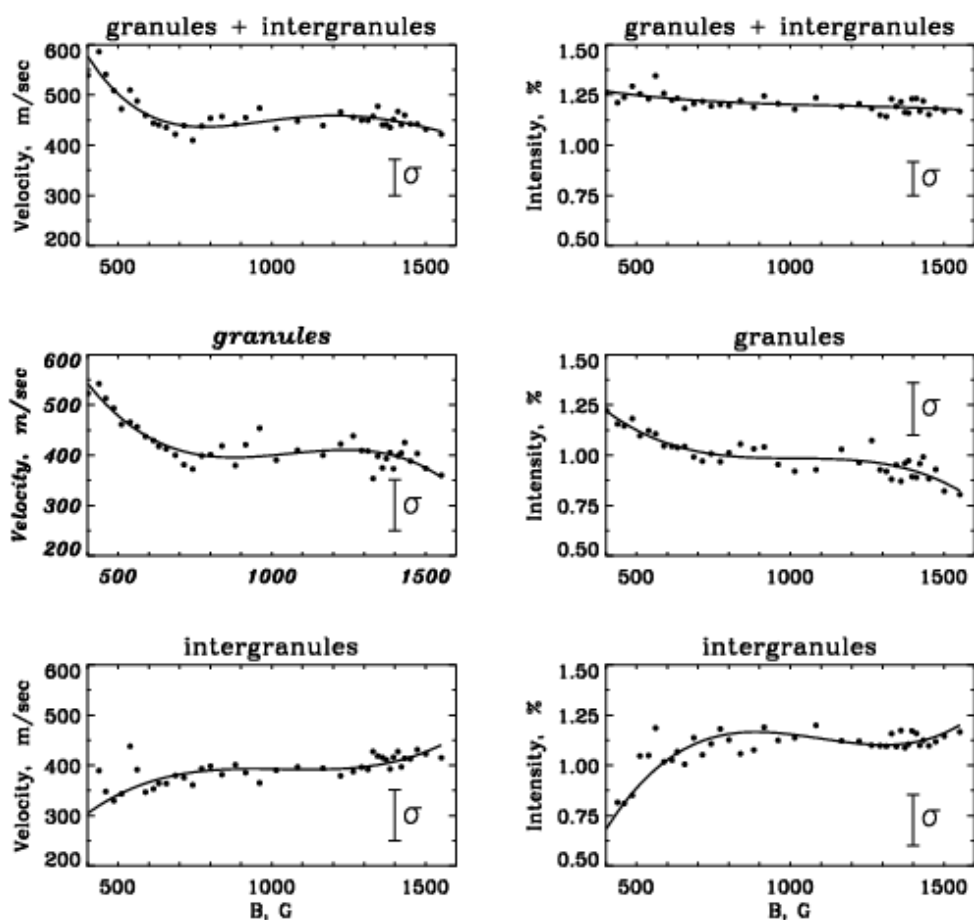
Рис.15. Спалаховий Хелоуїн 2003р. Зверху – зміни з часом рентгенівського випромінювання за даними GEOS. Панель 2 і 3 – зміна частоти моди  $l=(21,1)$  за даними VIRGO(402 nm) та GOLF. Панель 4 і 5 – зміна частоти моди  $l=(22,1)$ .

## **5. ПОРІВНЯННЯ АМЛІТУДНО-ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ В СПОКІЙНИХ ТА АКТИВНИХ УТВОРЕННЯХ В СОНЯЧНІЙ АТМОСФЕРІ ЗА ДАНИМИ НАЗЕМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ.**

Можна назвати декілька причин, чому важливо досліджувати хвильові рухи в спокійних та активних ділянках сонячної атмосфери: 1) як магнітне поле (в активних ділянках) модифікує властивості хвиль?; 2) в яких випадках хвилі здатні переносити енергію і тим самим нагрівати матерію в активній ділянці? Для отримання відповіді на ці питання ми провели комплексні спостереження спокійної та активної (факел) ділянок сонячної поверхні на німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT Інституту астрофізики на Канарах (о. Тенерифе, Іспанія) одночасно в трьох ділянках довжин хвиль: FeI  $\lambda\lambda$ 15643-15658А - спектрополяриметричні, BaII 4554А - спектральні, CaII 3968А - фільтрові. Після обробки цих спостережень в нашому розпорядженні були: 1) величини напруженості магнітного поля на висоті  $h=0$  км в атмосфері Сонця на площі розмірами  $5.5 \times 18.5$  кутових секунд, яка сканувалась протягом 34 хвилин; 2) флуктуації інтенсивності та швидкості на 14 висотах в атмосфері Сонця в діапазоні  $h=0-650$  км; 3) флуктуації інтенсивності на висоті  $h=1600$  км в сонячній атмосфері.

На рис.16 приведені амплітуди хвильових коливань швидкості та інтенсивності на висоті  $h=650$  км, а також окремо над гранулами та міжгранулами. Їх реакція на магнітне поле прямо протилежна:

*Ball, h=650 km*



*Рис.16. Амплітуди хвильових коливань швидкості (ліва колонка) та інтенсивності (права колонка) на висоті  $h=650$  км ( верхня панель), а також окремо над гранулами (середня панель) та міжгранулами (нижня панель).*

Над гранулами амплітуди коливань інтенсивності та швидкості зі збільшенням напруженості магнітного поля зменшуються, а над між гранулами навпаки – збільшуються. Нам важко зараз назвати причину такої несподіваної для нас залежності.

Багато корисної інформації про хвильові рухи та характер їх розповсюдження можна одержати з досліджень зсув фаз між коливаннями швидкості та температури (інтенсивності) на різних висотах в атмосфері Сонця ( $T_V$  зсуви фаз).

## Ball

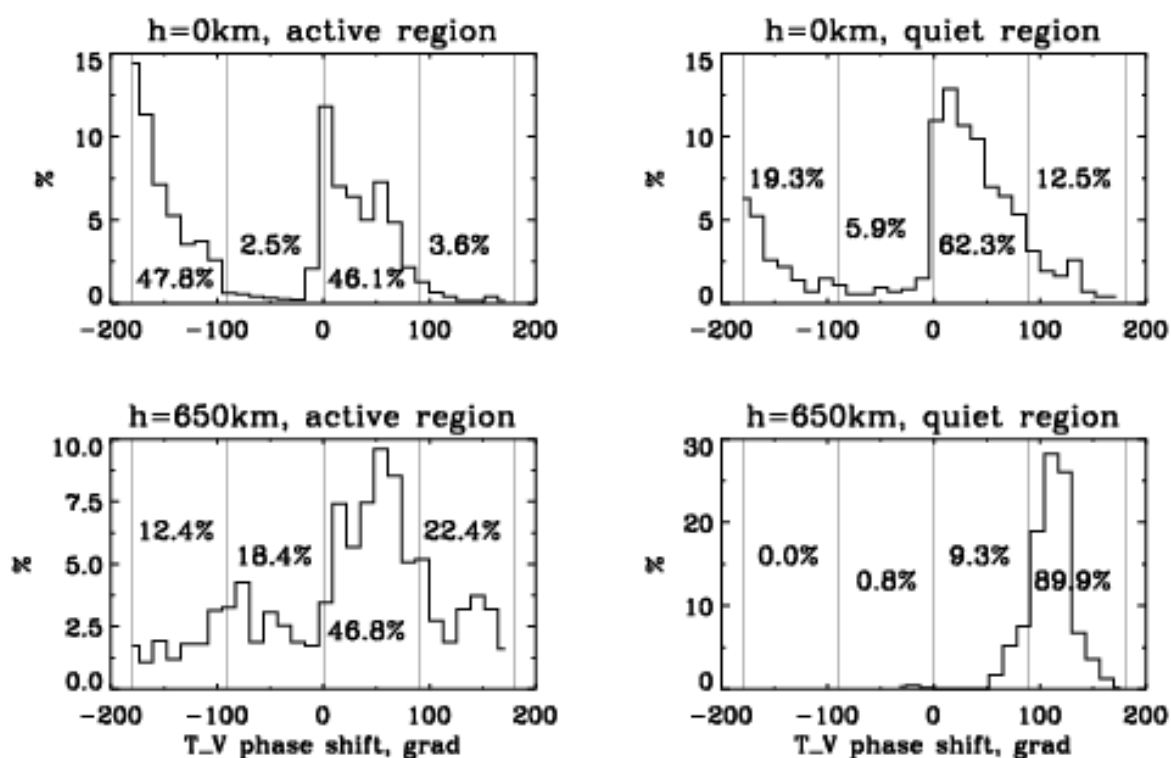


Рис.17. Гістограми розподілу  $T_V$  зсувів фаз

На верхній панелі рис.17 ми приводимо гістограму розподілу  $T_V$  зсувів фаз на висоті  $h=0$ км для активної (ліва колонка) та спокійної (права колонка) ділянок сонячної поверхні. Тонкі вертикальні лінії розділяють рисунки на 4 домени, по 90 градусів в кожному від -180 градусів до +180 градусів. В залежності від знаку та величини  $T_V$  зсувів фаз, кожному домену відповідає різний тип хвиль. Знак плюс означає, що коливання температури випереджають коливання швидкості, а знак мінус – навпаки: коливання швидкості випереджають коливання температури. З цієї гістограми слідує, що в активній ділянці на висоті  $h=0$ км розповсюджуються переважно бігучі вгору (~46%) та вниз (~48%) звукові хвилі. Приблизно така ж ситуація і для спокійної ділянки. На двох нижніх панелях рис.17 приведені відповідні гістограми, але вже для висоти  $h=650$ км. В активній ділянці (ліва нижня панель) всі бігучі вгору хвилі, які виникли в нижній фотосфері (~46%,  $h=0$ км) «добралися» до нижньої

хромосфери (~47%,  $h=650\text{км}$ ). А в спокійній ділянці (права нижня панель) тільки ~9% хвиль «проникли» до хромосфери.

З всього вищенаведеного можна зробити висновок, що бігучі звукові хвилі зароджуються в нижній фотосфері (або глибше) як в активній, так і в спокійній ділянках сонячної поверхні, але досягнути хромосфери ці хвилі здатні лише в активній ділянці, де присутні помірні магнітні поля. Як ці хвилі впливають на температурний режим хромосфери це – предмет наступних досліджень.

## **ВИСНОВКИ**

Проведено комплексне дослідження частотно-амплітудно-фазових характеристик глобальних п'ятихвилинних коливань Сонця, застосовуючи Фур'є-перетворення для тривалих рядів спостережних даних отриманих з космічних фотометрів Коронас-ДИФОС-Ф, SOHO/Virgo та SOHO/Golf. Проведена систематизація спостережень, первинна обробка даних, аналіз похибок. Вдосконалені методи та алгоритмів досліджень та створені програмні коди для комп'ютерних обчислень.

Досліджено вплив найпотужніших сонячних спалахів на характеристики п'ятихвилинних коливань сонячної фотосфери. Показано, що під час спалахів амплітуди мод можуть як збільшуватись так і зменшуватись, відношення потужності коливань між каналами SOHO/Virgo 402 і 862 нм спадає (зменшується градієнт зміни потужності коливань з висотою), зсуви фаз коливань між каналами 402 і 862 нм збільшуються, частота мод зменшується.

Проведені одночасні комплексні спостереження спокійної та факельної ділянок сонячної поверхні на німецькому телескопі VTT Інституту астрофізики на Канарах (Іспанія). Аналіз цих спостережень показав, що бігучі звукові хвилі зароджуються в нижній фотосфері (або глибше), в спокійній або в активній ділянках сонячної поверхні, але досягнути хромосфери ці хвилі здатні лише в активній ділянці, де присутні помірні магнітні поля.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Костык Р.И., Кесельман И.Г., Осипов С.Н., Лебедев Н.И., Ораевский В.Н., Жугжда Ю.Д., Копаев И.М. Космічна наука і технологія, Т.2, № 1-2, с.34-40, 1996.
2. Костик Р.І., Осіпов С.М., Лебедев М.І., Космічна наука і технологія, т.9, N 2/3, с. 10-12, 2003.
3. Н. И. Лебедев, В. Д. Кузнецов, Р. И. Костык и др., Астрон. журнал, т. 81, № 10, с. 956-960, 2004.
4. Frohlich C., Andersen B.N., Appourchauh T., et al., Solar Phys., v.170, 1, 1970.
5. Jimenez A., Palle P.L., Roca Cortes T., and Domongo V. Astron. And Astrophys., v.193, 298, 1988.
6. Frohlich C., Romero J. et al., Solar Ph., v.162, N1-2, 101-128, 1995.
7. “Вариации глобальных характеристик Солнца”, под ред. Э.А.Гуртовенко, Наукова думка, Киев, 1992, 304с.
8. Jimenez A., Palle P.L., Roca Cortes T., and Domongo V., Astron. And Astrophys., v.193, 298, 1988.
9. C.J. Schrijver, A. Jimenez, W. Dappen, Astron. Astropys, 251, 655-668, 1991
10. Jimenez A., Cortes T.R., Severino G., Marmolino C. Astrophys. J., v.525, 1042-1055, 1999.
11. Осіпов С.М., Маринець А.В., Вісник київського університету, серія: фіз.-мат. науки, вип..1, с.203-205 , 2009.
12. A. Ambastha, S. Basu, and H. M. Antia. – 2003ESASP.517.219A, 2003.
13. Kumar B. and Ravindra B., J. Astrophys. Astr. — 27. – P. 425-438, 2006.
14. T.Appourchaux, P.Boumier, J.W.Leibacher and T.Corbard, A&A, 617, A108, 2018.
15. Fossat, E., Boumier, P., Corbard, T., et al., A&A, 604, A40, 2017.
16. Garcia, R. A., Turck-Chieze, S., Boumier, P., et al., A&A, 442, 385, 2005.
17. [http://irfu.cea.fr/dap/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_visu.php?id\\_ast=3581](http://irfu.cea.fr/dap/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=3581).



## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ

за результатами виконання роботи у 2018 р.

1. *С. Н. Осипов, Р. И. Костык, Н. Г. Щукина*, Исследования гелиосейсмологических параметров Солнца по данным космических экспериментов КОРОНАС-ДИФОС-Ф и SOHO-GOLF-Virgo/SPM // Ukrainian Conference on Space Research, ISSN 2309-2130, Abstracts, Kyiv, September, 17–20, 2018, P.41.
2. *С. М. Осипов, Р. І. Костик, Н. Г. Щукіна, М. І. Стоділка*, Чи спокійне спокійне Сонце? Вибрані питання астрономії та астрофізики, 1–5 жовтня 2018р., с. 78–79, Львів.
3. *І. Васильєва, С. Осипов*, Дослідження поверхневих неоднорідностей сонячної атмосфери. Астрономія та фізика космосу в Київському університеті, 29 травня – 1 червня, 2018, С. 77.
4. *N. Shchukina, S. Osipov, R. Kostik, M. Stodilka*, Kyiv monitoring program of spectral line variations with the 11-year cycle. Quiet Sun // Proc. IAU Symposium No.340, – 2018.– p.31–34.
5. *Р.І. Костык* Влияние волновых движений в активной области солнечной поверхности на конвекцию. КФНТ, 2018, т.34, №2, с.46–54.
6. *Р.І Костик*. Чи впливають хвилі на конвекцію в сонячній атмосфері? Київ, Астрономія та фізика космосу, 29.05–31.05, 2018.