

УДК 523.9-327:519.246.8:517.443:519.71

Я. І. Зєлик¹, Н. М. Степанян², О. А. Андреєва²

¹Інститут космічних досліджень НАН України та НКА України, Київ

²НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія», Научний, Крим

Часові зміни диференціального обертання активних ділянок та корональних дір і їхній зв'язок з рівнем сонячної активності

Надійшла до редакції 23.01.08

Встановлено закономірності часових змін з ходом сонячного циклу диференціального обертання таких сонячних утворень, як активні ділянки та корональні діри за спостереженнями їх у верхній хромосфері та виявлено закономірності змін обертання цих структур від рівня сонячної активності.

В атмосфері Сонця спостерігаються швидко-плинні явища, які називаються сонячною активністю. Мінливість Сонця виявляється у зміні рівня сонячної активності. Крім великого теоретичного значення, вивчення еволюції сонячної активності набуває і практичного інтересу, тому що є основою прогнозування геoeffективних сонячних впливів. Такі прояви сонячної активності, як спалахи, сонячний вітер, корональні викиди мас призводять до значних варіацій радіаційного фону у космосі, впливають на магнітосферу і верхню атмосферу Землі.

Існуючі методи прогнозу сонячної активності засновані переважно на статистичних підходах. Більшість з них з великою імовірністю визначають лише необхідні умови здійснення прогнозу. Достатні умови спрощування прогнозу сонячної активності на сьогодні в загальному випадку не знайдені. Вихід з цього становища може полягати у вивчені фізичних процесів і їхніх взаємодій, які визначають зміни, що відбуваються в активних сонячних утвореннях. Таким чином, необхідно шукати фізичні основи вірогідного прогнозу сонячної активності.

У сучасній фізиці Сонця вважається, що основою сонячної активності та її змін є винесення

магнітних потоків із внутрішніх шарів Сонця. Взаємодія цих потоків на різних глибинах у внутрішніх шарах і висотах в атмосфері Сонця призводить до розмаїтості активних спостережуваних утворень. Залежність взаємодій від умов середовища, де існують сонячні утворення, дуже сильна. Тому необхідно комплексно розглядати різні види прояву сонячної активності — від одинадцятирічного циклу до окремих спалахів на висотах від конвективного шару до корони у часових масштабах від секунд до десятиріч.

Зміни характеристик активності Сонця, а отже, і їхні прогнози, за масштабом часу умовно поділяються на три типи: довготермінові, середньотермінові і короткотермінові. Зокрема, у межах середньотермінового прогнозується в основному появу окремих активних ділянок, корональних дір і великомасштабних магнітних полів, особливості їхнього розвитку, час життя і зв'язок з глобальними характеристиками Сонця. Середньотерміновий прогноз розрахований на кілька обертів Сонця і може бути використаний для геофізичних прогнозів. Оскільки дотепер немає ясних фізичних уявлень про природу нестаціонарних явищ в атмосфері Сонця, використовувані методи, що базуються на статистич-

ному підході, у силу своєї суб'ективності і неоднозначності не дозволяють робити обґрутовані вірогідні прогнози сонячної активності.

Для вірогідного середньотермінового прогнозу сонячної активності необхідно розглядати процеси в окремих активних сонячних утвореннях на основі багатохвильових сонячних спостережень. Зокрема, повинна бути досліджена еволюція характеристик обертання (основного руху), їхній взаємозв'язок та зв'язок обертання з сонячною активністю для таких сонячних утворень, як активні ділянки з групами сонячних плям, корональні діри, волокна, фонові магнітні поля у різних шарах атмосфери Сонця. Це зумовлене тим, що, як було вже зазначено, вказані сонячні утворення є наслідком взаємодії магнітних потоків, що виносяться із внутрішніх шарів Сонця і проходять через його атмосферу, а ці магнітні потоки і їхні зміни є основою сонячної активності.

Обертання сонячних структур та його зміна з часом зумовлена обертальним рухом їхніх джерел, що знаходяться у внутрішніх шарах Сонця, зокрема у конвективній зоні, променистій зоні і ядрі енерговиділення. Обертання сонячних структур кожного роду має свій характер і навіть для одного роду утворень, і більш того, дляожної протяжної структури одного роду, характеризується своїми закономірностями змін швидкості обертання в залежності від геліографічної широти, що визначає диференціальне обертання Сонця. Диференціальне обертання Сонця входить як необхідна характеристика у моделі будови Сонця та теорії Сонячного циклу [3, 5, 16–19].

Ранні дослідження часових варіацій диференціального обертання Сонця проводились за так званими трасерами (слідами на послідовних знімках диску Сонця) сонячних плям та швидкостями зміни цих слідів, у пізніших дослідженнях вимірювались так звані зміни променевих швидкостей [5, 19]. Переважна більшість досліджень диференціального обертання стосувалась сонячних плям та різних структур магнітного поля Сонця [5, 16–19].

В останні десятиріччя при оцінюванні диференціального обертання Сонця та його часових змін, а також при вивчені такої важливого, більш загального, ніж диференціальне обертання, феномену фізики Сонця, як північно-

південна асиметрія сонячної активності, широко використовуються методи різноманітних функціональних перетворень (аналізу у спектральній області). Цей аналіз проводиться для рядів спостережень певних широтних зон диску Сонця чи для вихідних зображень диску Сонця у різноманітних лініях з виділенням чи без певних зон на зображені. Зокрема, застосовують спектральний аналіз у базисі Фур'є, інших базисах функцій у ковзних по тривалому інтервалу спостережень коротких часових вікнах (частотно-часовий аналіз) [3, 5, 16, 19], вейвлет-аналіз [3] у виділених широтних зонах. Використання методів частотно-часового аналізу дозволяє отримати об'єктивні індекси обертання Сонця у певних широтних зонах у певні моменти часу і пов'язати їх з індексами сонячної активності, відмінними від чисел Вольфа, які характеризують активність Сонця не інтегрально, а у кожній широтній зоні у відповідний момент часу. Зокрема, у [5, 19] отриманий індекс обертання структур великомасштабного магнітного поля Сонця у вигляді суми спектральної густини поля у різних характерних діапазонах періодів, що характеризує швидкість обертання структур поля (двосяекторної та чотирисекторної), у різних широтних зонах у залежності від часу та пов'язаний із змінами активності у ході сонячного циклу. У [3] методи спектрального аналізу використано для оцінювання північно-південної асиметрії сонячної активності і її часових змін дляожної широтної зони Сонця на тривалих часових інтервалах за спектрами кількох індексів сонячної активності. Отже, в роботах [3, 5, 19] отримано результати, що підтверджують важливість досліджень часових варіацій обертання і його широтного розподілу для магнітних полів Сонця, а також широтно-часових змін північно-південної асиметрії сонячної активності для виявлення і розуміння механізмів генерування магнітних полів у внутрішніх шарах Сонця.

Таким чином, актуальною є проблема оцінювання диференціального обертання та його часових варіацій для сонячних структур, спостережуваних у різних шарах атмосфери Сонця, та встановлення закономірностей змін обертання з рівнем сонячної активності на тривалих часових інтервалах у ході сонячного циклу. Як вже було зазначено, результати вирішення цієї проблеми

є важливими для пошуку фізичних основ короткотермінового прогнозу сонячної активності. На даний час публікацій стосовно оцінювання обертання утворень, що спостерігаються в атмосфері Сонця, значно менше, ніж публікацій, присвячених дослідженням сонячних магнітних полів (зокрема, їхнього обертання).

Метою роботи є встановлення закономірностей широтно-часових змін з ходом сонячного циклу обертання таких сонячних утворень, як активні ділянки та корональні діри за спостереженнями їх у верхній хромосфері та встановлення закономірностей змін обертання цих структур від рівня сонячної активності.

Спостережний матеріал та побудова часових рядів даних. Вихідним матеріалом для опрацювання були дані комбінованих наземних та супутниковых спостережень Сонця у лінії He I λ 1083 нм, отримані у Національній обсерваторії Kitt Пік (США) (Kitt Peak National Observatory (KPNO), (<http://www.noao.edu/kpno/>)), яка є частиною Національної оптичної астрономічної обсерваторії США (National Optical Astronomy Observatory (NOAO), (<http://www.noao.edu/>)). Ці дані були здобуті у рамках спільніх фундаментальних досліджень Національної обсерваторії Kitt Пік з іншими організаціями Національної оптичної астрономічної обсерваторії США NOAO за підтримки Національної наукової фундації США (National Science Foundation (NSF), <http://www.nsf.gov/>), з Центром космічних польотів імені Годдарда (Goddard Space Flight Center (GSFC), <http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html>) за підтримки Національного космічного агентства США (NASA), з Лабораторією космічного навколошнього середовища (Space Environment Laboratory (SEL), <http://www.swpc.noaa.gov/AboutUs/93review.pdf>) за підтримки Національного агентства з океану та атмосфери (США) (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), <http://www.noaa.gov/>). Вказані дані були люб'язно надані авторам цієї статті паном Харві після смерті його дружини пані Карен Харві — співробітниці обсерваторії Kitt Пік, одному з головних дослідників цього спостережного матеріалу.

Як відомо, регулярне отримання зображень Сонця в лінії He I λ 1083 нм надає виняткову можливість мати одночасно інформацію про яс-

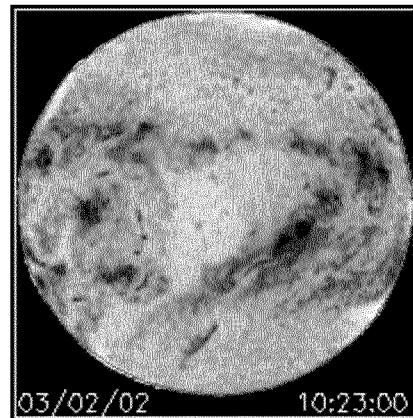


Рис. 1. Зображення диску Сонця у лінії He I λ 1083 нм.

Рис. 1. Зображення диску Сонця у лінії He I λ 1083 нм

кравість і положення на диску відразу декількох видів сонячних утворень: потужних активних ділянок з групами сонячних плям (AR) корональних дір (CH), флокулів (FL), незбурених ділянок (BG). Спостереження вказаних структур у лінії He I λ 1083 нм стосуються певного рівня в атмосфері Сонця, а саме верхньої хромосфери.

Дані відповідають часовому інтервалу від початку січня 1977 р до кінця вересня 2003 р. Це відповідає 357 каррінгтонівським обертам Сонця №№ 1650—2006. Дані охоплюють три сонячні цикли, починаючи з фази росту 21-го і закінчуючи спадом 23-го циклу. Матеріал спостережень являє собою синоптичні карти (СК), кожна з яких складена з зображень Сонця у лінії He I λ 1083 нм протягом одного оберту Сонця. Зображення диску Сонця у лінії He I λ 1083 нм представлена на рис. 1, а синоптична карта — на рис. 2. По осі X синоптичної карти відкладена геліографічна довгота від 0° до 360° , а по осі Y — $\sin\varphi$ від -1 до +1, де φ — геліографічна широта. Просторова роздільна здатність таких карт 1° по X і $1/90^\circ$ по Y. Таким чином, кожній СК відповідає двовимірний масив 180×360 пкл, що містить інтенсивності спектра Сонця в центрі лінії He I λ 1083 нм для всіх точок поверхні Сонця. Далі виконано переход від центральних інтенсивностей до так званих еквівалентних ширин W лінії He I λ 1083 нм за співвідношеннями, виведеними для даного спо-

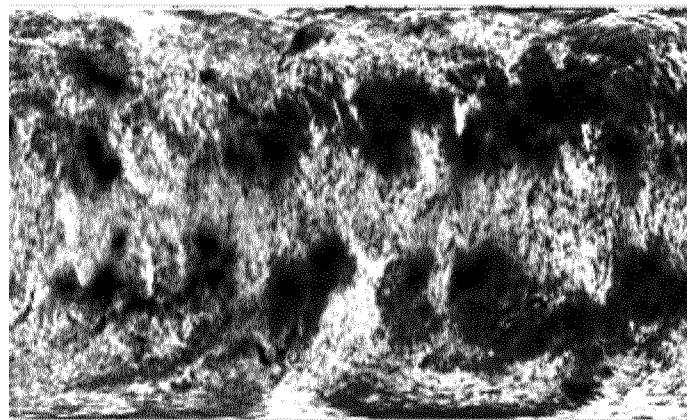


Рис. 2. Синоптична карта у лінії Не I λ 1083 нм

стережного матеріалу в обсерваторії Кітт Пік, і нормування даних масивів кожної перетвореної карти до максимуму гістограми розподілу числа пікселів у залежності від значень еквівалентної ширини. На нормованих СК були виділені за-значені вище сонячні структурні утворення, яким відповідають різні інтервали значень еквівалентної ширини W : AR: $2 < W < 10$; CH: $0.1 < W < 0.95$ FL: $1.05 < W < 2$; BG: $0.95 < W < 1.05$. Далі у масивах нормованих даних СК були виділені блоки за рядками, що відповідають 5-град широтним смугам. Усередині кожного блоку відбувалося виділення за-значених чотирьох типів утворень і підсумо-вування за стовпцями елементів кожного типу. Таким чином, для кожного типу утворень для кожної СК були отримані елементи часових рядів для кожної широтної зони. Спостережний матеріал з вихідного виду синоптичних карт Сонця у лінії Не I λ 1083 нм на кожному з 357 каррінгтонівських обертів був перетворений у 4 типи (за типами спостережуваних сонячних утворень) по 32 часових рядів, що відповідають 5-градусним широтним зонам. Елементи 4 типів цих рядів — сумарні (за широтою) значення еквівалентної ширини лінії Не I λ 1083 нм, пропорційні енергії, поглиненої (активними ділянками, флокулами, незбуреними ділянками) і випромінюваної (корональними дірами) у даній 5-градусній широтній зоні Сонця. Отримані ча-сові ряди для окремих карт були спеціальним чином об'єднані у ряди для всього спостережно-

го матеріалу з початку січня 1977 р. до кінця вересня 2003 р. Для кожного з 4 типів сонячних утворень було побудовано по 32 часових ряди довжиною 128520 елементів кожен.

На рис. 3 і 4 відображені елементи вказаних 32 часових рядів, що є значеннями еквівалентної ширини лінії Не I λ 1083 нм W для активних ділянок (AR) і корональних дір (CH) у геліографічному широтному діапазоні $[-80^\circ; 80^\circ]$ або [S80; N80]. Ці зображення представляють часові розгортки широтного розподілу енергії випромінювання для AR і поглинання для CH у лінії Не I λ 1083 нм у південній і північній півкулях Сонця і ілюструють диференціальне обертання AR і CH та його зміни з часом. На рис. 3 і 4 проявляються три цикли активності на 26-річному інтервалі спостережень.

Спектральні методи оцінювання обертання сонячних структур і типи задач оціню-вання. При оцінюванні обертання сонячних структур визначалися періоди обертання і роз-поділ піків спектральної густини потужності при знайдених періодах, а також сумарної потуж-ності в заданих інтервалах періодів у залежності від геліографічної широти та їхні часові зміни для кожного типу сонячних утворень. Стосовно вирішення проблеми оцінювання диференціаль-ного обертання і його часових змін авторами використовувалися методи спектрального ана-лізу, розглянуті у публікаціях [1, 2, 6—15]. При реалізації цих методів мали місце такі

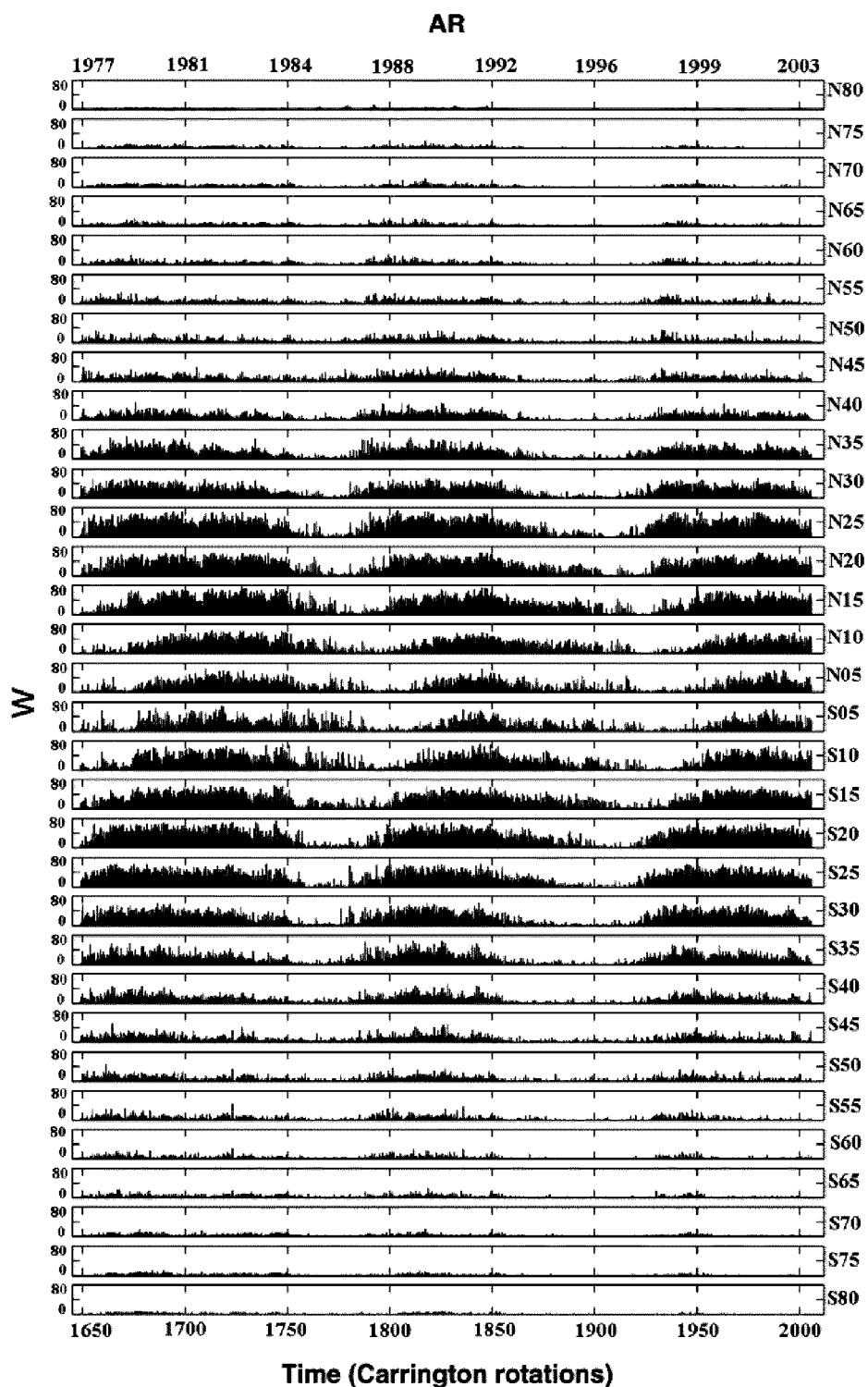


Рис. 3. Часові ряди сумарної еквівалентної ширини лінії Не I λ 1083 нм у п'ятиградусних широтних зонах Сонця для активних ділянок

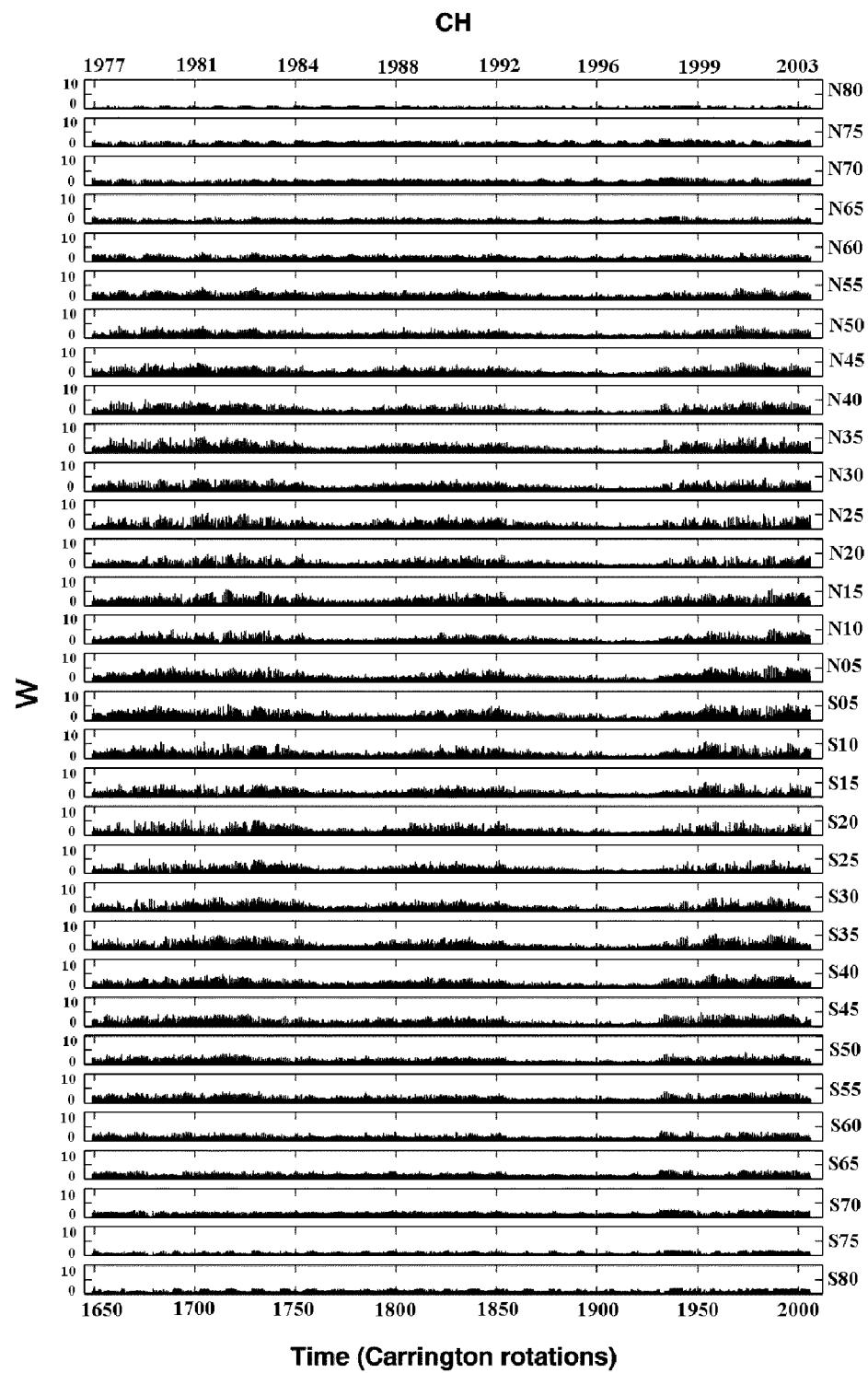


Рис. 4. Часові ряди сумарної еквівалентної ширини ліній Не I λ 1083 нм у п'ятиградусних широтних зонах Сонця для корональних дір

параметри дискретизації й аналізу:

кількість відліків у кожному часовому ряді — $N = 357 \times 360 = 128520$;

крок дискретизації за часом — $dt = 27.2753 / 360 = 0.07576572$ діб;

частота дискретизації — $fs = 1/dt = 13.19875491$ діб⁻¹;

частота Найквіста — $nyquist = 1/2fs = 6.599377$ діб⁻¹;

кількість часових відліків, над якими виконується ШПФ — $nfft = 262144$;

кількість частотних відліків (коєфіцієнтів Фур'є або інших функціональних перетворень) — $M = nfft/2 + 1 = 131073$.

Для часових рядів, що відповідають чотирьом типам сонячних структур, було виконано три типи спектрального аналізу:

1) на всьому часовому інтервалі спостережень тривалістю близько 26 років [1, 2, 6—10, 13];

2) на п'яти часових інтервалах, що відповідають епохам максимумів і мінімумів сонячної активності [2, 11—15];

3) ковзний спектральний аналіз у часовому вікні довжиною 1 рік зі зсувом на півроку на всьому 26-річному інтервалі спостережень [2, 11—15].

У кожному із трьох типів спектрального аналізу застосовувався свій метод з таких трьох апробованих методів: Shuster Periodogram Method [9, 10, 13, 23, 24], Welch Method [1, 4, 9, 11, 12—15, 23, 25], Multitaper Method [11—13, 22] — і вибиралася адекватний метод з погляду одержання реалістичних оцінок спектральної густини потужності.

У випадках 1) і 2) був вибраний Welch Method [4, 13, 25]. Ефективність застосування Welch Method була зумовлена значною довжиною часових рядів на зазначених п'яти інтервалах спектрального аналізу (на всьому 26-річному інтервалі спостережень довжина ряду складала 128520 відліків). Welch Method полягає у розбитті всього часового ряду на пересічні часові сегменти, в обчисленні у кожному із сегментів модифікованих періодограм зі згладжуванням вікном і отриманні як оцінки спектральної густини усереднених згладжених періодограм за всіма сегментами. Використовувалося розбиття кожного часового ряду на три на 50 % пересічні часові сегменти і виконувалося згладжування у кожному сегменті з застосуванням вікна Гемінга.

Перевага у випадку 1) Welch Method порівняно Shuster Periodogram Method була зумовлена істотно меншою дисперсією (істотно більшою гладкістю) отриманих за Welch Method оцінок спектральної густини потужності, ніж за Shuster Periodogram Method. При цьому періоди, які відповідали достовірним пікам оцінки спектральної густини, що перевищували потроєне значення середнього квадратичного відхилення $3\sigma_{Sp}$ спектральної густини потужності як випадкової функції, знайдені за Welch Method, практично збігалися з періодами, виявленими на сильно порізані оцінці спектральної густини, оцінений за Shuster Periodogram Method. Сумарні ж потужності у заданих інтервалах періодів, знайдені за оцінками спектрів потужності по Welch Method і по Shuster Periodogram Method, також практично збігалися.

З метою забезпечення компромісу між вимогами високої роздільної здатності, що дозволяє виявити тонку структуру істинного спектру (вузькі викиди) і вимогами низької дисперсії оцінки спектральної густини був досліджений і застосований у випадках 2) і 3) Multitaper Method [13, 22]. У цьому методі при оцінюванні спектру використовуються групи лінійних або нелінійних комбінацій модифікованих періодограм (комбінації оптимальних фільтрів у частотній області) і не використовуються часові вікна згладжування, вибір яких досить суб'єктивний. Ці періодограми обчислюються на основі даних часового ряду з використанням його розкладу за ортогональними дискретними протяжними сфероїдальними послідовностями (DPSS, інакше — Slepian-sequences). Використовувалося розкладання не по одній (як у традиційному фур'є-аналізі), а по 15, 7, 5, 2 послідовностях таких базисних функцій. За оцінку спектральної густини при реалізації Multitaper Method був взятий результат усереднення за кількістю застосовуваних дискретних сфероїдальних послідовностей періодограм, кожна з яких обчислена за своєю послідовністю базисних функцій. Природно, через усереднення така оцінка має малу дисперсію, тобто є гладкою, і немає потреби у її згладжуванні. Однак оцінка за Multitaper Method є зручною для дослідження яких-небудь глобальних властивостей спектральної густини, зокрема для оцінювання сумарної потужності у деякому діапазоні періодів. Для

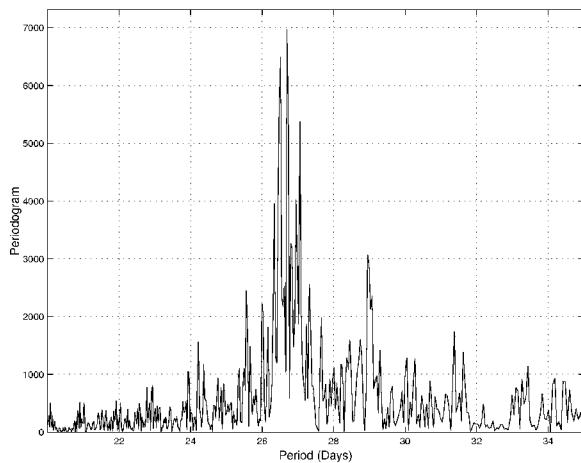


Рис. 5. Оцінка спектральної густини потужності за Shuster Periodogram Method в інтервалі періодів [20; 35] діб у широтній зоні N20 для активних ділянок

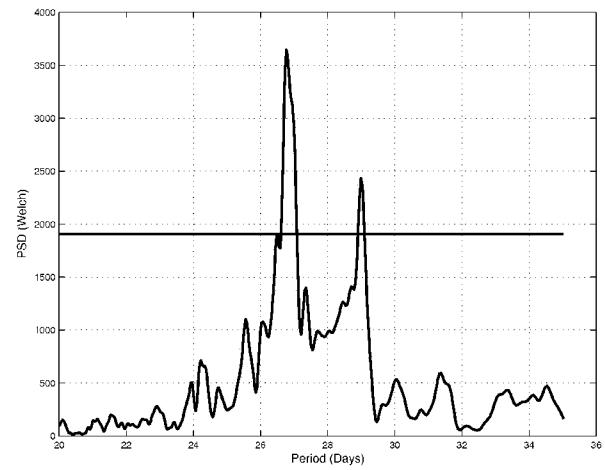


Рис. 6. Оцінка спектральної густини потужності за Welch Method в інтервалі періодів [20; 35] діб у широтній зоні N20 для активних ділянок

виявлення періодичностей, що відповідають пікам оцінки спектральної густини, оцінка за Multitaper Method мало придатна. Тому у випадку 2) перевага була надана Welch Method.

На рис. 5—7 відображені оцінки спектральної густини потужності за Shuster Periodogram Method (рис. 5), за Welch Method (рис. 6) — у залежності від періоду, а на рис. 7 — за Multitaper Method — у залежності від частоти в інтервалі періодів [20; 35] діб у широтній зоні N20 для активних ділянок. На рис. 6 горизонтальною лінією відображене потроєне значення середнього квадратичного відхилення $3\sigma_{Sp}$ спектральної густини потужності як випадкової функції за Welch Method, а на рис. 7 пунктирними лініями відображені залежності від частоти довірчих інтервалів оцінювання з ймовірністю 0.9 спектральної густини потужності за Multitaper Method.

Для оцінювання спектральної густини у випадку 3) був вибраний Shuster Periodogram Method. У цьому методі масив періодограм ряду (квадратів модулів коефіцієнтів Фур'є) на всіх частотах обчислюється за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) або дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) [4, 20, 21]. З метою підвищення роздільної здатності за частотою кожна реалізація часового ряду довжиною N відліків «розчиняється нулями» до реалізації

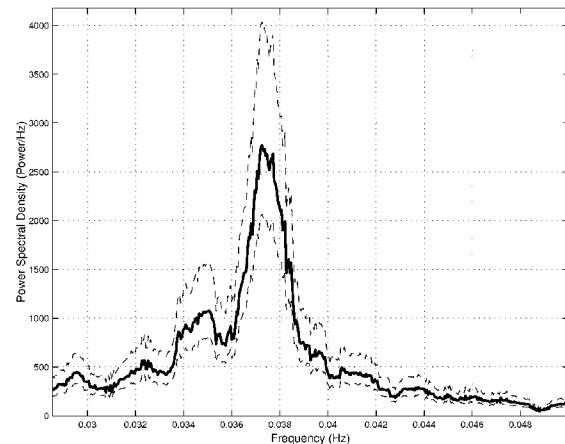


Рис. 7. Оцінка спектральної густини потужності за Multitaper Method в інтервалі періодів [20; 35] діб у широтній зоні N20 для активних ділянок

більшої довжини $nfft$, рівної цілому степеневі числа 2. Над продовженою у такий спосіб часовою реалізацією виконується ШПФ. Для зменшення ефекту просочування енергії з частот, далеких від головного максимуму часового прямокутного вікна у спектральній області, через так звані бічні максимуми при оцінюванні спек-

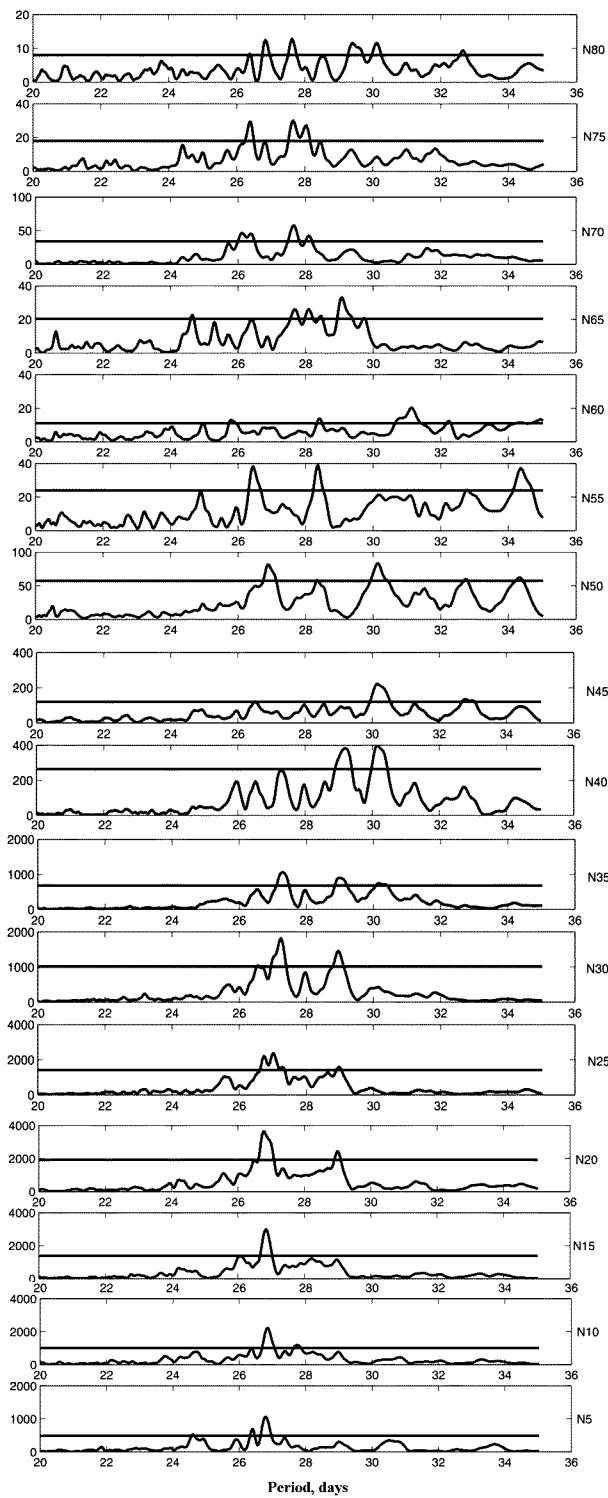


Рис. 8. Спектри потужності PSD в інтервалі періодів 20—35 діб для активних ділянок всіх широтних зон N-півсфери

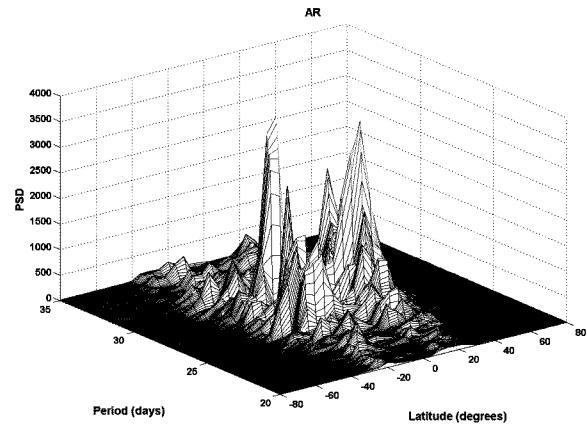


Рис. 9. Тривимірне зображення залежності спектральної густини потужності PSD від значень періоду і широти для активних ділянок (AR)

тримальної густини за Shuster Periodogram Method застосовується часове згладжування. Саме дії прямокутного часового вікна з його ефектами витоку енергії у ділянки бічних пелюсток у частотній області відповідає ДПФ (зокрема ШПФ) на обмеженому довжиною ряду кінцевому часовому інтервалі. Для зменшення ефектів зміщення періодограми і зменшення її дисперсії як оцінки спектральної густини, зумовлених зазначеними факторами, застосовувався метод модифікованих Shuster Periodogram. У цьому методі використовувалися часові вікна згладжування, зокрема, вікно Геммінга.

Оцінка значущості піків згладженої періодограми за Shuster Periodogram Method на основі порівняння значень піка з максимумом нормально розподіленого білого шуму [10], показала, що в усіх випадках головні піки періодограми в інтервалі найбільш потужних періодів обертання 20—35 доби не були породжені випадковими флюктуаціями на зразок білого шуму.

У порівнянні з Shuster Periodogram Method у випадку 3) при ковзному спектральному аналізі у часовому вікні довжиною 1 рік зі зсувом на півроку Welch Method і Multitaper Method виявилися непридатними через отримання за їхньою допомогою за цих умов нереально гладких оцінок спектральної густини потужності.

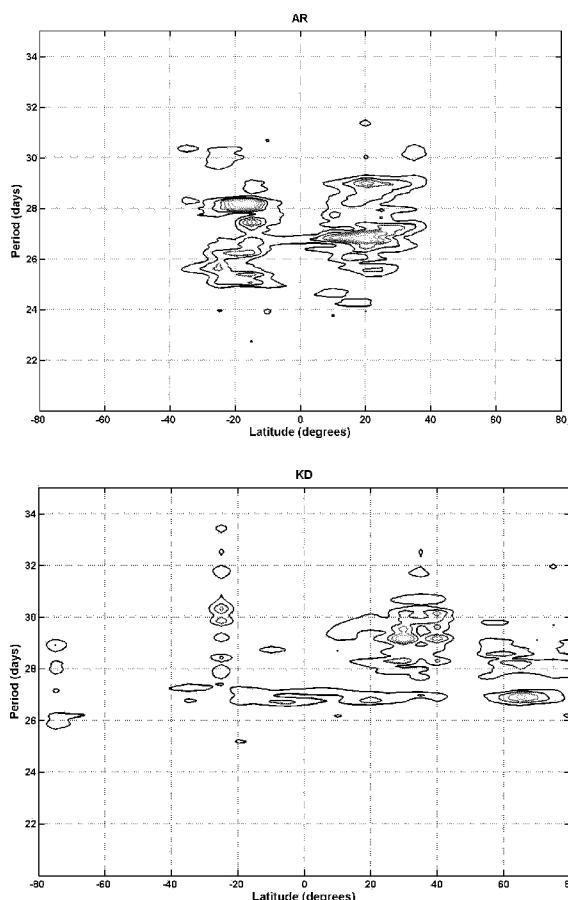


Рис. 10. Залежність PSD, представленої у вигляді ізоліній на площині, від широти і періоду: *a* — для активних ділянок (AR), *b* — для корональних дір (CH)

Задача 1. Усереднене обертання активних ділянок і корональних дір у трьох циклах активності.

Результати дослідження опубліковані у працях [1, 6—10, 13]. При оцінюванні усередненого обертання сонячних структур у трьох циклах активності виконувався спектральний аналіз типу 1) з використанням Welch Method. Спектральні густини потужності (PSD) в інтервалі періодів 20—35 діб для активних ділянок (AR) у 5-град широтних зонах з інтервалу [10°; 80°] N-півсфери представлени на рис. 8.

За спектральною густину потужності для всіх розглянутих типів сонячних утворень були побудовані тривимірні графіки залежності PSD

Таблиця 1. Широти найбільш потужних періодів у спектрах потужності двох типів сонячних утворень

P , діб	φ , град
Активні ділянки	
25.68	-25
28.18	-17.5
27.43	-16.2
25.4	-15.6
26.81	19.9
28.92	20
Корональні діри	
30.32	-24
29.25	+30
28.30	+64.8

від значень періоду і широти. Такий графік для активних ділянок наведений на рис. 9. На рис. 10 відображена залежність PSD, представлена у вигляді ізоліній (контурних графіків) поверхні PSD на площині, від широти і періоду: *a* — для активних ділянок (AR), *b* — для корональних дір (CH).

Далі розглянуто періоди обертання, для яких значення піків PSD перевищує $3\sigma_{Sp}$. Для AR це відповідає другим ізолініям на рис. 10, *a*.

Інтерпретація результатів вирішення задачі 1 з дослідження усередненого обертання сонячних структур у трьох циклах активності така.

З аналізу залежностей, відображені на рис. 8—10 і подібних до них, випливає, що для AR і для CH одні і ті ж значення періоду обертання зустрічаються на різних широтах, або займають кілька широтних інтервалів, і в одній широтній зоні часто спостерігається більш ніж один характерний потужний період. Результати проведено дослідження наведено у табл. 1. Найпотужніший період обертання у всіх отриманих спектрах потужності — це період 26.81 доби для активних ділянок. Він стосується широти +20°. Порівнянний з ним за потужністю період 28.18 доби, також у спектрі потужності для активних областей, досягає максимуму на широті -17.5°.

Для корональних дір характерні тривалиші значення періодів і вищі широти. Причому у N-півсфері коротший період обертання спостерігається на широті 64°, а довший — на широті 30°.

Загальний висновок з розгляду окремих періодів з найбільшими значеннями PSD говорить

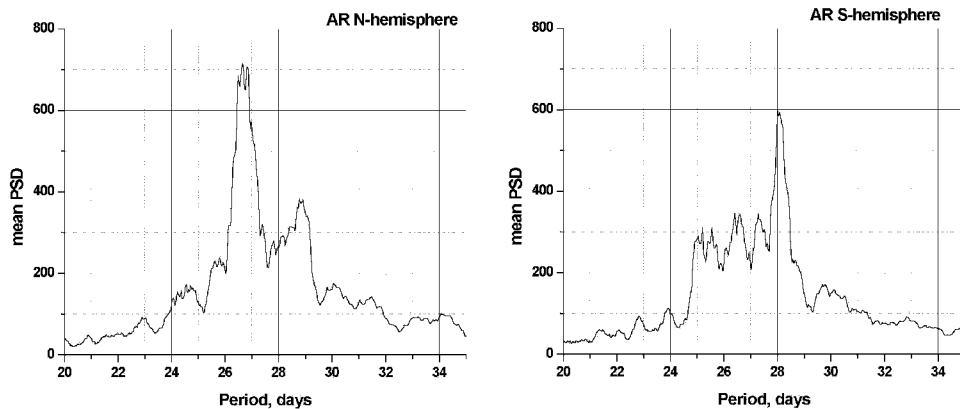


Рис. 11. Залежність від періоду обертання середніх значень PSD для кожної півсфери для активних ділянок

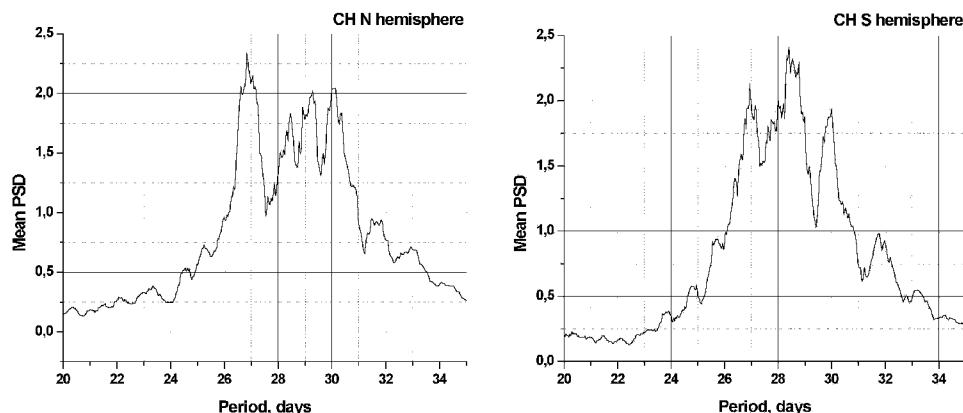


Рис. 12. Залежність від періоду обертання середніх значень PSD для кожної півсфери для корональних дір

про те, що для AR і CH відсутнє звичне диференціального обертання — збільшення періоду обертання із зростанням широти, а проявляються індивідуальні особливості обертання на різних широтах.

Рис. 9, 10 і табл. 1 відображають окремі пікові значення спектральної густини для AR і CH і значення відповідних їм періодів. На рис. 11, 12, представлено результати оцінювання усередненого обертання кожної півсфери Сонця за спостереженнями таких структур як AR і CH.

Для AR і CH спостерігаються різні набори і діапазони періодів обертання. Характерним для N-півсфери є максимальний за потужністю період 26.8 доби. У S-півсфері максимальна по-

тужність характерна для періодів 28.1—28.8 доби. Для корональних дір істотними за потужністю є і період 30 діб.

Задача 2. Усереднене обертання активних ділянок та корональних дір в епохи максимуму і мінімуму сонячної активності. Результати досліджень опубліковані у працях [2, 11—15]. При оцінюванні усередненого обертання активних ділянок та корональних дір в епохи максимуму і мінімуму сонячної активності за інформативну характеристику, за якою оцінювався широтний розподіл найбільш потужних періодів обертання бралася спектральна густина потужності $PSD(\varphi, P)$ як функція широти φ і періоду обертання P . Для епох трьох максимумів і двох мінімумів

Таблиця 2. Інтервали максимальної і мінімальної сонячної активності, виділені з часових рядів

№	Інтервал часу, роки (дні від початку масиву даних)	Характеристика активності
1	1978.5...1981 (600...1700)	Максимум 21-го циклу
2	1984.5...1986.5 (2600...3800)	Мінімум 21-го циклу
3	1988.5...1991.5 (4300...5400)	Максимум 22-го циклу
4	1994...1997 (6300...7500)	Мінімум 22-го циклу
5	1998...2001 (8200...9300)	Максимум 23-го циклу

сонячної активності були побудовані контурні графіки (родини ізоліній) поверхні $PSD(\varphi, P)$ у координатах φ, P для активних ділянок і корональних дір. З усього спостережного матеріалу виділялися масиви даних, що стосувались п'яти часових інтервалів, представлених у табл. 2.

На рис. 13 наведена залежність $PSD(\varphi, P)$ у вигляді ізоліній для активних ділянок для епох максимуму активності. Ізолінії проведені через 375 відносних одиниць. На рис. 14 наведена залежність $PSD(\varphi, P)$ у вигляді ізоліній для активних ділянок для епох мінімуму активності. Ізолінії проведені через 37.5 відносних одиниць.

Аналогічні контурні графіки для корональних дір представлені на рис. 15 і 16 відповідно. Інтервал між ізолініями в цьому випадку — 0.7 для епох максимумів і 0.5 відносних одиниць для епох мінімумів.

Аналіз отриманих розподілів для активних ділянок показав, що під час епох максимумів і мінімумів трьох розглянутих циклів обертання AR і СН відрізняється за інтервалами періодів обертання, що зустрічаються, за значеннями періодів з максимальною потужністю у кожній півсфері і за величиною широтної зони, у якій спостерігається обертання з найбільш потужним періодом. Ці характеристики для активних ділянок наведені у табл. 3, а для корональних дір — у табл. 4.

Інтерпретація результатів вирішення задачі 2, відображеніх на рис. 13—16 і в табл. 3, 4 така.

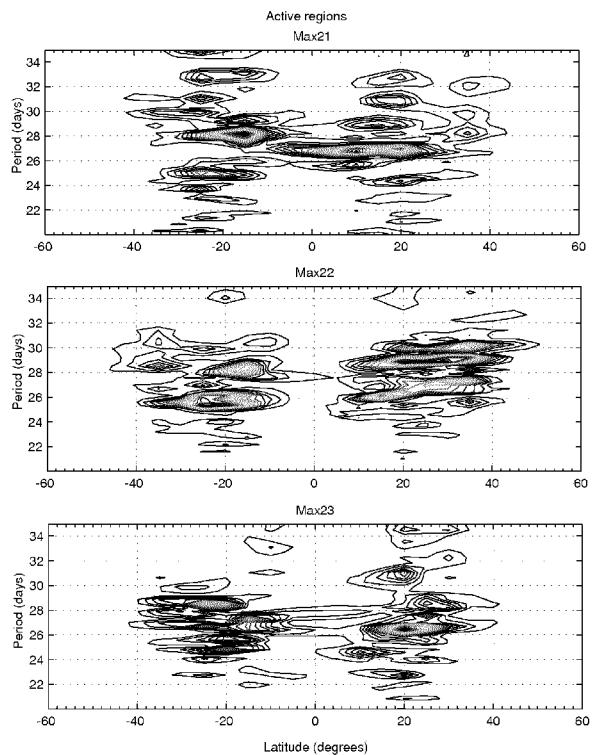


Рис. 13. Залежність $PSD(\varphi, P)$ у вигляді ізоліній (через 375 відносних одиниць) для активних ділянок в епохи максимумів активності

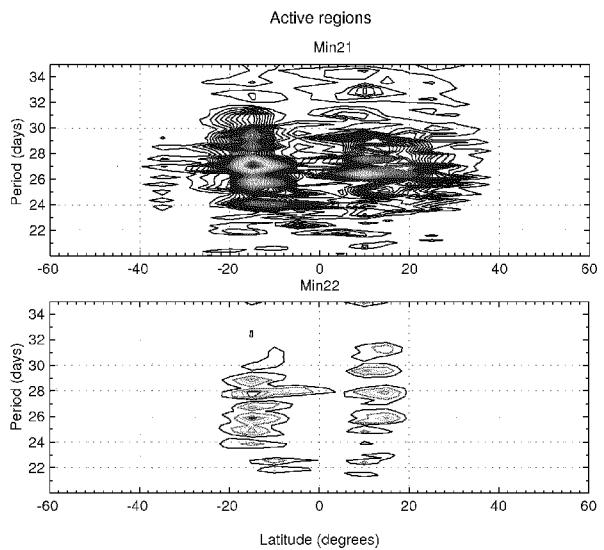


Рис. 14. Залежність $PSD(\varphi, P)$ у вигляді ізоліній (через 37.5 відносних одиниць) для активних ділянок в епохи мінімумів активності

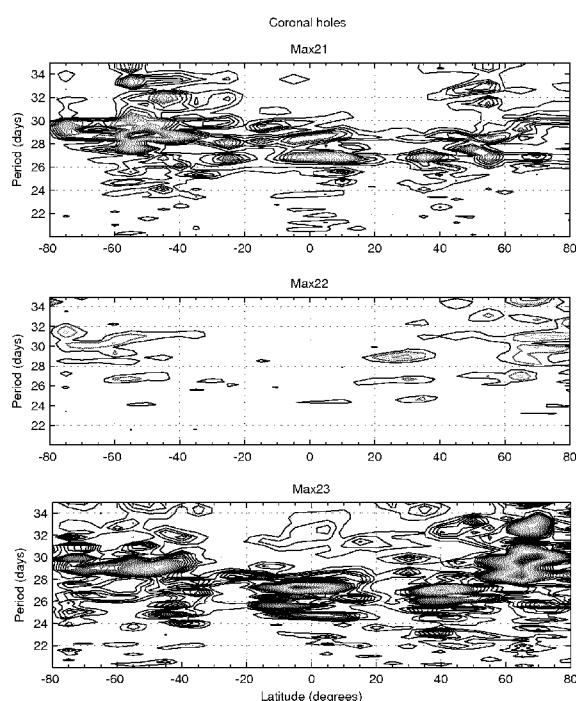


Рис. 15. Залежність $PSD(\varphi, P)$ у вигляді ізоліній (через 0.7 відносних одиниць) для корональних дір в епохи максимумів активності

Обертання AR істотно відрізняється від обертання СН за набором найбільш значущих періодів, їхнім широтним розподілом.

Для AR і СН характерні зміни обертання від циклу до циклу за інтервалами періодів, що зустрічаються, значеннями періодів з максимальною потужністю в кожній півсфері і величиною широтної зони обертання з найбільш потужними періодами.

Наявність в одній широтній зоні одночасно декількох структур з різною швидкістю обертання характерне як для AR, так і для СН.

Великі ділянки, у яких спостерігається обертання AR і СН з найбільш потужними періодами, не можна вважати зонами твердотільного обертання, тому що на тих же широтах мають місце й інші періоди обертання, порівняні за потужністю з найбільш потужним періодом.

Характерною особливістю є мала кількість корональних дір у 22-му циклі активності з потужними періодами обертання.

Для AR і СН характерна північно-південна асиметрія обертання: AR у 21-му циклі у N-півсфері оберталися швидше, ніж у S-півсфері. Потім співвідношення швидкостей обертання в обох півсферах змінюється на протилежне для кожного наступного максимуму.

Таблиця 3. Усереднені характеристики обертання активних ділянок в епохи максимумів і мінімумів сонячної активності

Часовий інтервал	Інтервали періодів з $PSD(\varphi, P) > 750$ для максимумів і $PSD(\varphi, P) > 75$ для мінімумів, діб		Період обертання з максимальним $PSD(\varphi, P)$, діб		Широтна зона обертання з періодом з значкою $PSD(\varphi, P)$, град	
	S-півсфера	N-півсфера	S-півсфера	N-півсфера	S-півсфера	N-півсфера
Максимум 21-го циклу	20...35	24...33	28.2	27	-30...0	-10...35
Максимум 22-го циклу	22...34	24...30	26	29	-40...-5	10...45
Максимум 23-го циклу	22...30	21...34	28.5	26.8	-40...-15	10...35
Мінімум 21-го циклу	22...34	22...34	27.3	26.5	-35...0	0...15
Мінімум 22-го циклу	22...29	22...32	28	28	-20...5	10...20

Таблиця 4. Усереднені характеристики обертання корональних дір в епохи максимумів і мінімумів сонячної активності

Часовий інтервал	Інтервали періодів з $PSD(\varphi, P) > 0.7$ для максимумів і $PSD(\varphi, P) > 0.5$ для мінімумів, діб		Період обертання з максимальним $PSD(\varphi, P)$, діб		Широтна зона обертання з періодом з значкою $PSD(\varphi, P)$, град	
	S-півсфера	N-півсфера	S-півсфера	N-півсфера	S-півсфера	N-півсфера
Максимум 21-го циклу	24...35	22...35	28.5	27	-80...80	-10...80
Максимум 22-го циклу	29...32	24...35	31	29	-75...-30	20...40
Максимум 23-го циклу	20...35	22...35	27	30	-20...15	50...80
Мінімум 21-го циклу	25...34	26...30	27	26.3	-75...-10	35...75
Мінімум 22-го циклу	26...31	26...32	27.8	28.1	-75...-35	50...70

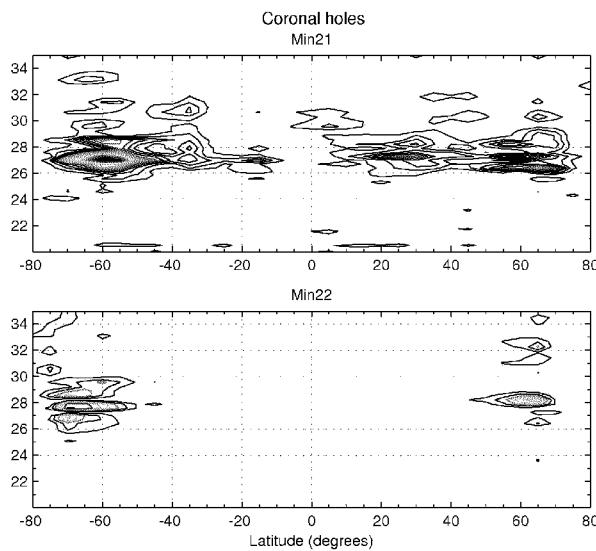


Рис. 16. Залежність $PSD(\varphi, P)$ у вигляді ізоліній (через 0.5 відносних одиниць) для корональних дір в епохи мінімумів активності

Починаючи з максимуму 21-го циклу і до мінімуму 22-го циклу, СН у N-півсфері оберталися швидше, ніж у S-півсфері. Після цього співвідношення швидкостей стає протилежним.

Задача 3. Широтно-часові зміни співвідношень між сумарними потужностями обертання для активних ділянок і корональних дір у характерних 3-добових інтервалах періодів. Результати досліджень опубліковані у працях [2, 11–15]. До кожного з 26-річних часових рядів був застосований спектральний аналіз типу 3) у ковзному часовому вікні шириною 1 рік зі зсувом на півроку. Для AR і CH було отримано по 52 залежності спектральної густини потужності PSD від часу t , широти φ і періоду P , що стосувалися послідовних річних інтервалів, що віддалені один від одного на півроку. Таким чином були побудовані залежності $PSD(t, \varphi, P)$ для AR і CH.

З аналізу залежності $PSD(t, \varphi, P)$ випливає, що у головному інтервалі періодів [20; 35] доби, у якому зосередження основна енергія випромінювання AR і CH у лінії He I λ 1083 нм, можна виділити 4 послідовних 3-добових підінтервали періодів [21; 24], [24; 27], [27; 30],

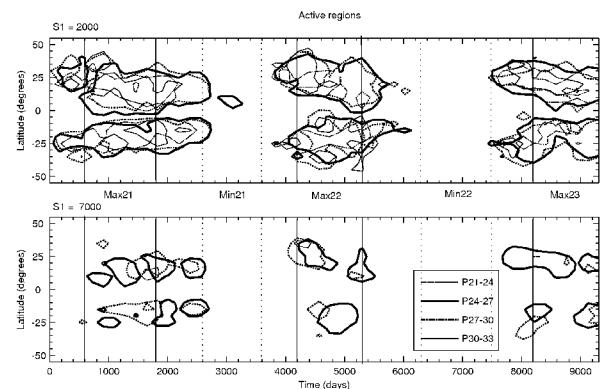


Рис. 17. Широтно-часові зміни співвідношень між сумарними потужностями в інтервалах періодів [21; 24], [24; 27], [27; 30], [30; 33] діб для активних ділянок

[30; 33] доби, у яких обертання структур у різних 5-град широтних зонах має характерні особливості. У кожному з цих підінтервалів з відповідними граничними значеннями $[P_1; P_2]$ визначалася так звана сумарна потужність процесу

$$S1(t, \varphi) = \sum_{P_1}^{P_2} PSD(t, \varphi, P), \quad (1)$$

яка лише відсутністю множника Δf (крок дискретизації за частотою) відрізняється від середньої потужності процесу в інтервалі $[P_1; P_2]$. Для AR і CH залежність $S1(t, \varphi)$ у кожному із наведених вище інтервалів періодів $[P_1; P_2]$ була представлена у вигляді поверхні в координатах t, φ .

При досліджені широтно-часових змін співвідношень між сумарними потужностями для AR і CH у зазначеніх 3-добових інтервалах періодів у кожному з інтервалів дляожної поверхні $S1(t, \varphi)$ були побудовані контурні графіки (ізолінії) при двох характерних значеннях рівня: для AR на рис. 17 при $S1(t, \varphi) = 2000$ та 7000 умовних одиниць; для CH на рис. 18 при $S1(t, \varphi) = 10$ та 15 умовних одиниць. На рис. 17 і 18 кожному інтервалові періодів відповідає ізолінія певного типу, а типи ізоліній умовно позначені як P21-24, P24-27, P27-30, P30-33 (доби) відповідно. По осі абсцис на графіках відкладений час у добах від початку 26-річного

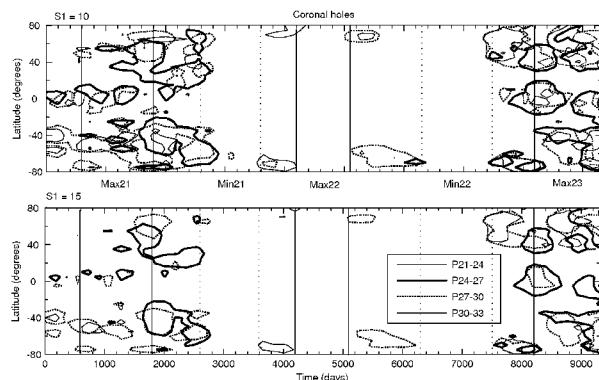


Рис. 18. Широтно-часові зміни співвідношень між сумарними потужностями в інтервалах періодів [21; 24), [24; 27), [27; 30), [30; 33] діб для корональних дір

інтервалу спостережень довжиною 9737.2 доби, по осі ординат — широта у градусах, вертикальними лініями відзначені епохи трьох максимумів і двох мінімумів 21, 22, 23 циклів.

Інтерпретація результатів вирішення задачі 3 така. Для AR (рис. 17) ізолінії на рівні $S1(t, \varphi) = 2000$ охоплюють практично всі значення сумарної потужності, що зустрічаються, для кожного з інтервалів періодів. У кожному сонячному циклі тривалий час (у фазах росту, максимуму і початку спаду активності) обертання у перших трьох інтервалах періодів (від 21 до 30 доби) існує одночасно у широтній зоні $\pm 50^\circ$.

Ділянки найбільш повільного обертання P30-33 існують для AR у всіх циклах в окремі інтервали часу та в ізольованих широтних зонах. Для них характерна одночасна присутність на широтах, що віддалені одна від однієї на 20° і більше. Ділянки P30-33 відсутні в епохи мінімумів 21-го і 22-го циклів активності.

Перед мінімумами активності і на початку мінімумів спостерігається лише області обертання AR P24-27 і P27-30 діб практично симетрично у північній і південній півсферах. Лише у мінімумі 21 циклу активності у S-півсфері близько до екватора спостерігається зона обертання P24-27 діб. У мінімумі 21 циклу відсутні будь-які області обертання AR із зазначеними чотирма інтервалами періодів.

Ізолінії на рівні $S1(t, \varphi) = 7000$ для AR характеризують найбільші значення сумарної потужності в інтервалах тридобових періодів і

охоплюють ділянки обертання практично лише двох інтервалів періодів P24-27 і P27-30 діб. Для цих ділянок обертання спостерігається практична відсутність зсуву за широтою з ходом циклу активності. Ділянки обертання AR P24-27 і P27-30 діб то послідовно змінюють одна одну, то накладаються одна на іншу.

Для СН (рис. 18) як по ізолініях на рівні $S1(t, \varphi) = 10$ так і на $S1(t, \varphi) = 15$ для максимуму 22-го циклу характерна відсутність ділянок обертання з зазначеними 3-добовими періодами. У 22-му циклі ділянки обертання P27-30 і P30-33 діб мають місце тільки на етапах росту і спаду циклу і тільки на високих широтах.

Для циклів 21 і 23 характерна близька картина часової зміни обертання СН. Однак для цих циклів має місце північно-південна асиметрія. У 21-му циклі на високих широтах сумарні потужності для СН більші у S-півсфері (більша сумарна площа областей обертання), а в 23-му циклі — у N-півсфері.

У 21-му і 23-му циклах спостерігаються по три області з помітним обертанням: екваторіальні зони, що існують від початку циклу до кінця максимуму, і протяжні по широті зони, що спостерігаються від початку циклу до його мінімуму.

Ділянки швидкого обертання P21-24 діб спостерігаються дуже рідко: на екваторі перед максимумами 21-го і 23-го циклів і на високих широтах у максимумах цих циклів.

На рівні $S1(t, \varphi) = 15$ ділянки найповільнішого обертання P30-33 доби зустрічаються набагато частіше, особливо на середніх і високих широтах. Але в екваторіальній зоні вони спостерігаються перед максимумами циклів 21 і 23.

На рівні $S1(t, \varphi) = 15$ помітна наявність ділянок обертання P24-27, P27-30, P30-33 діб, а ділянки P30-33 в екваторіальній зоні відсутні.

У максимумі 22-го циклу взагалі відсутні ділянки з будь-якими зазначеними 3-добовими періодами обертання.

Для активних ділянок і корональних дір було проведено підсумування залежності $S1(t, \varphi)$ за всіма дискретними значеннями широти φ . Отримана залежність позначена як $S2(t)$ і представляє сумарні за широтою φ значення сумарної в інтервалі періодів $[P_1; P_2]$ потужності $S1(t, \varphi)$ у залежності від часу для кожного сонячного утворення.

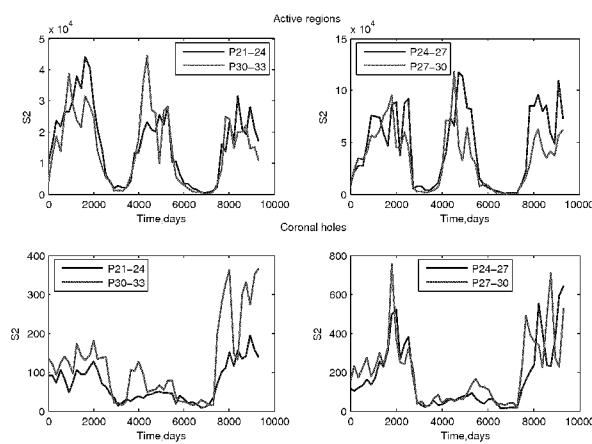


Рис. 19. Часові зміни сумарної потужності $S2(t)$ в інтервалах періодів [21; 24], [24; 27], [27; 30], [30; 33] для активних ділянок і корональних дір для всього Сонця

рення. На рис. 19 наведені залежності $S2(t)$ для AR і CH, що відображають часові зміни сумарних потужностей в інтервалах періодів [21; 24], [24; 27], [27; 30], [30; 33] діб для всього Сонця.

Задача 4. Залежність змін обертання активних ділянок і корональних дір у характерних 3-добових інтервалах періодів від рівня сонячної активності. Результати досліджень опубліковані в роботах [14, 15].

При дослідженні залежності зміни обертання AR і CH від рівня сонячної активності останній характеризувався значенням сумарної активної ширини $SumW$ лінії He I λ 1083 нм, рівній сумі (завжди невід'ємних) елементів ряду у відповідному часовому інтервалі аналізу. Таким чином, рівень активності відповідного сонячного утворення визначається сумарною енергією $SumW$ випромінювання для AR і поглинання для CH на певному проміжку часу, що співпадає з інтервалом спектрального аналізу.

Для повних 26-річних рядів для AR і CH отримана висока кореляція R широтних розподілів сумарної еквівалентної ширини $SumW(\varphi)$ і сумарної потужності $S1(\varphi)$ (див. формулу (1)) в інтервалі періодів [20; 35] діб (для AR $R \leq 0.99$, а для CH $R \leq 0.86$). Це означає, що практично вся потужність процесів, що відповідають AR і CH, зосереджена в інтервалі періодів [20; 35] діб.

Часові зміни зв'язку сумарної еквівалентної ширини $SumW(t, \varphi)$ і сумарної потужності $S1(t, \varphi)$ (див. формулу (1)) на всьому 26-річному інтервалі спостережень мають більш складний характер і розглядаються в кожному з підінтервалів [21; 24], [24; 27], [27; 30], [30; 33] діб. У кожному з цих підінтервалів за результатами спектрального аналізу у ковзному часовому вікні шириною 1 рік зі зсувом на півроку побудовані широтно-часові графіки зміни сумарних за рік потужностей $S1(t, \varphi)$. У тих же координатах t, φ з накладанням на графіки $S1(t, \varphi)$ у тому ж вікні будувалися залежності $SumW(t, \varphi)$ сумарної за рік зі зсувом на півроку еквівалентної ширини лінії He I λ 1083 нм, що характеризують широтно-часові зміни активності AR і CH. Для AR ці накладені графіки відображені на рис. 20 *a, c* — для P21-24 і P30-33 діб, а для CH — на рис. 21 *a, c* — для P21-24 і P30-33 діб відповідно. По осі абсцис відкладений час у добах від початку всього 26-річного інтервалу спостережень. На цих рисунках залежності $S1(t, \varphi)$ відображені білими ізолініями, а сіре тло і чорні ізолінії представляють залежності $SumW(t, \varphi)$. Вигляд $SumW(t, \varphi)$ для AR на графіках аналогічний метеликам Маундера, що будуються, звичайно, за числами Вольфа.

До інтерпретації результатів задачі 4. Аналіз графіків показує, що розподіл $SumW(t, \varphi)$ у кожному циклі сонячної активності має два або три максимуми. Максимуми розподілів $S1(t, \varphi)$ для всіх чотирьох інтервалів періодів не збігаються з максимумами $SumW(t, \varphi)$. Особливо чітке розходження положень максимумів цих двох видів розподілів для AR виявляється для ділянок періодів обертання P24-27 і P27-30.

Для з'ясування відмінностей широтних зон на Сонці з максимальними сумарними потужностями $S1(t, \varphi)$ і визначення моментів часу, у які досягаються максимуми $S1(t, \varphi)$, залежності $S1(t, \varphi)$ у вигляді ізоліній були накладені в одному вікні на графіки спеціально введеної до розгляду залежності, що є різницею сумарних еквівалентних ширин у два послідовні моменти відліків t_{k+1} і t_k (своєрідного приросту сумарної еквівалентної ширини) для кожної широти φ :

$$DifW(t_{k+1}, t_k, \varphi) = SumW(t_{k+1}, \varphi) - SumW(t_k, \varphi), \quad (2)$$

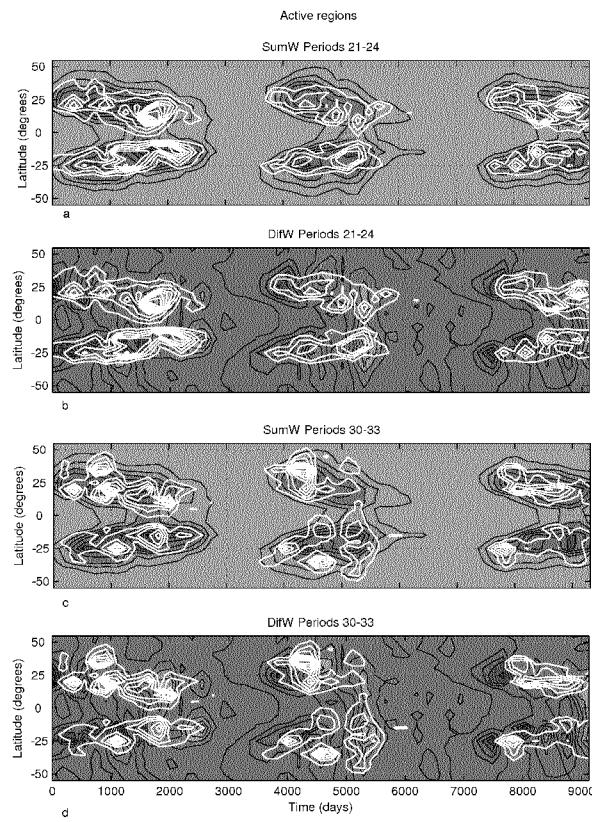


Рис. 20. Залежність змін обертання активних ділянок від рівня сонячної активності в інтервалах періодів [21; 24] і [30; 33] діб

де $\text{Sum}W(t_k, \varphi) \geq 0$, $\text{Sum}W(t_{k+1}, \varphi) \geq 0$ як суми у річному ковзному вікні завжди невід'ємних елементів рядів еквівалентної ширини; $k = 1, \dots, 51$, оскільки при підсумовуванні елементів вихідного 26-річного часового ряду у ковзному вікні шириною один рік з відступом на півроку виходить 52 часових відліки величини $\text{Sum}W(t_k, \varphi)$.

Результати накладання в одному вікні графіків $S1(t, \varphi)$ у вигляді білих ізоліній на графіки $DifW(t_{k+1}, t_k, \varphi)$ у вигляді сірого тла і чорних ізоліній для різних інтервалів періодів відображені для AR на рис. 20, b, d — для P21-24 і P30-33 діб, а для CH — на рис. 21, b, d — для P21-24 і P30-33 діб відповідно. На рис. 22 представлена для наочності залежність зміни обертання AR від рівня сонячної активності в

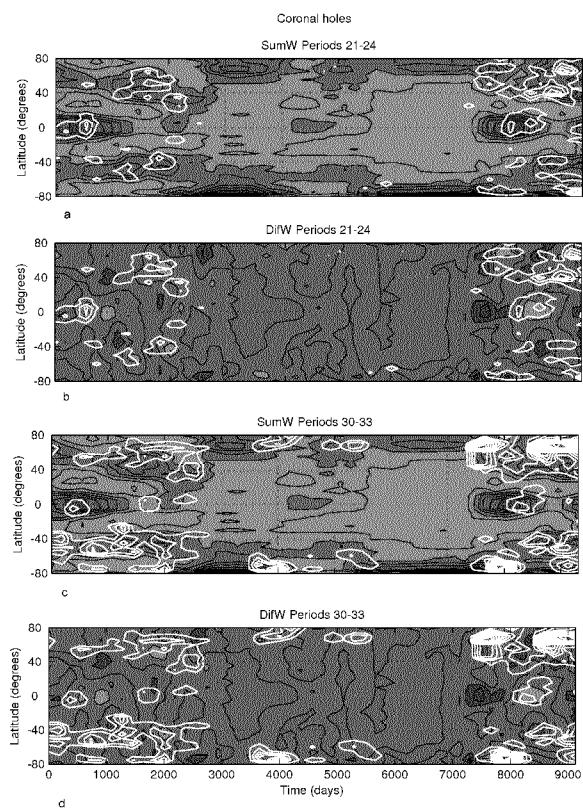


Рис. 21. Залежність змін обертання корональних дір від рівня сонячної активності в інтервалах періодів [21; 24] і [30; 33] діб

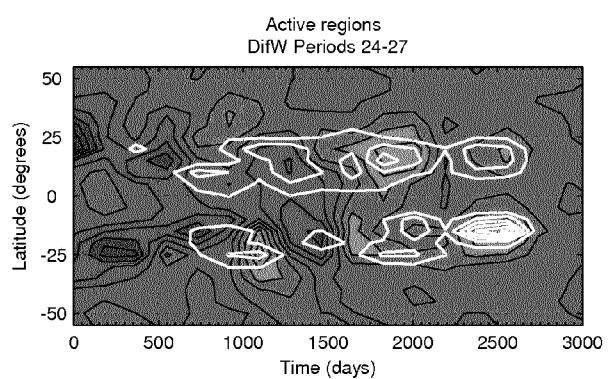


Рис. 22. Залежність змін обертання активних ділянок від рівня сонячної активності в інтервалі періодів [24; 27] діб в епохи росту, максимуму і спаду 21 циклу активності

інтервалі періодів [24; 27] діб в епохи росту, максимуму і спаду 21-го циклу.

Аналіз рис. 20, b, d ; 21, b, d і 22 показує, що для AR і СН максимуми $S1(t, \varphi)$ близькі за положенням до мінімумів залежності $DifW(t_{k+1}, t_k, \varphi)$. Обчислення відстаней між максимумами $S1(t, \varphi)$ і мінімумами $DifW(t_{k+1}, t_k, \varphi)$ показало, що для AR найменшими ці відстані є для ділянок обертання Р24-27 і Р27-30 діб. Як випливає з (2), за умов $SumW(t_k, \varphi) \geq 0$, $SumW(t_{k+1}, \varphi) \geq 0$ залежність $DifW(t_{k+1}, t_k, \varphi)$ досягає мінімуму (може бути негативним) при таких значеннях t_{k+1}^*, t_k^* і на такій широті φ^* , при яких $SumW(t_{k+1}, \varphi)$ максимально зменшується (залишаючись невід'ємною) у порівнянні з $SumW(t_k, \varphi)$. Оскільки $SumW(t_{k+1}, \varphi)$ обчислюється у вікні ширину один рік, то мінімум $DifW(t_{k+1}, t_k, \varphi)$ (див. (2)) досягається на відповідній широті φ^* в моменти t_{k+1}^*, t_k^* , віддалені на півроку, для яких $SumW(t_{k+1}, \varphi)$ максимально зменшується у порівнянні з $SumW(t_k, \varphi)$, а значить, для яких $(\varphi^*, t_{k+1}^*, t_k^*)$ максимально зменшується рівень активності відповідного сонячного утворення.

Як вказувалося, положення максимумів сумарної потужності $S1(t, \varphi)$ близькі до положень мінімумів $DifW(t_{k+1}, t_k, \varphi)$, і тому перші будуть мати місце у моменти часу, близькі до t_{k+1}^* , що настали після t_k^* і на широті, близькій до φ^* — максимального зменшення рівня активності AR або СН. Відзначимо, що максимуми сумарної потужності $S1(t, \varphi)$ відповідають найбільш стабільному обертанню сонячного утворення в інтервалі періодів $[P_1; P_2]$.

Інтерпретація результатів задачі 4. Таким чином, результати дослідження залежності зміни обертання AR і СН від рівня активності, представлені на графіках на рис. 19, 21 (для AR) і 20 (для СН), можна інтерпретувати у такий спосіб.

Активні ділянки, які довго живуть або послідовно виникають, що обертаються з періодами в інтервалах [24; 27] і [27; 30] діб, характерні для інтервалів часу різкого зменшення сумарної в річному вікні еквівалентної ширини лінії He I $\lambda 1083$ нм для AR. Це не тільки інтервали часу спаду 11-річних циклів (як було відомо раніше).

Кожний із трьох розглянутих циклів має у кожному 3-добовому підінтервалі періодів з головного інтервалу [20; 35] діб, як мінімум, два максимуми залежності $SumW(t, \varphi)$. Між максимумами $SumW(t, \varphi)$ в більшості випадків спостерігаються мінімуми залежності $DifW(t_{k+1}, t_k, \varphi)$.

Активні ділянки, які довго живуть або поспіль виникають, що обертаються з періодами в інтервалах [21; 24] і [30; 33] діб, характерні для епох максимуму і спаду циклів активності.

Сумарні потужності процесів, що характеризують обертання AR в інтервалах періодів [21; 24] і [30; 33] діб, значно менші, ніж в інтервалах періодів [24; 27] і [27; 30] діб.

Корональні діри, що довго живуть або поспіль виникають явно проявляються з інтервалом періодів обертання [30; 33] діб і трохи менше — з інтервалом [21; 24] діб на інтервалах часу та на широтах значного зменшення сумарної у річному вікні еквівалентної ширини лінії He I $\lambda 1083$ нм для СН.

ВИСНОВКИ

У роботі встановлено закономірності часових змін з ходом сонячного циклу диференціального обертання таких сонячних утворень, як активні ділянки та корональні діри за спостереженнями їх у верхній хромосфері та встановлено закономірності змін обертання цих структур від рівня сонячної активності.

Результати роботи є конкретним внеском у вирішення глобальної наукової проблеми фізики Сонця — дослідження диференціального обертання Сонця та встановлення його зв'язку з рівнем сонячної активності з метою знаходження фізичних факторів та основ вірогідного короткотермінового прогнозу сонячної активності.

Для вирішення сформульованої у меті роботи проблеми розв'язані такі задачі для таких структурних сонячних утворень як активні ділянки та корональні діри на основі спостережень у лінії He I $\lambda 1083$ нм у верхній хромосфері.

1. Оцінено усереднене обертання AR та СН на тривалому часовому інтервалі, що охоплює три останні цикли активності.

2. Досліджено обертання AR та СН в епохи

максимуму і мінімуму сонячної активності.

3. Встановлено закономірності широтно-часових змін співвідношень між сумарними потужностями обертання для AR та СН у характерних 3-добових інтервалах періодів.

4. Знайдено закономірності залежності змін обертання активних ділянок і корональних дір у характерних 3-добових інтервалах періодів від рівня сонячної активності.

Результати вирішення кожної з задач мають фізичну інтерпретацію.

З інтерпретації результатів задач 1)–4) випливають такі більш узагальнені висновки.

Обертання активних ділянок істотно відрізняється від обертання корональних дір за всіма параметрами: набором найбільш значущих періодів обертання, їхнім широтним розподілом і змінами з часом.

Для активних ділянок і корональних дір характерна зміна обертання від циклу до циклу, північно-південна асиметрія, що змінюється з часом. Спектри потужності для послідовних циклів сонячної активності істотно відрізняються як для епох високої активності, так і для мінімумів.

Аналіз сумарної потужності спектрів усередині виділених чотирьох інтервалів періодів від 21 до 33 доби показав, що найбільша сумарна потужність припадає на інтервали періодів [24; 27] і [27; 30] діб. Це справедливо як для активних ділянок, так і для корональних дір. Співвідношення між сумарними потужностями в названих вище інтервалах періодів помітно міняються з часом.

Для інтервалів часу та широт значного зменшення сумарної еквівалентної ширини лінії He I $\lambda 1083$ для активних ділянок характерні AR, що довго живуть або послідовно виникають, які обертаються з періодами у діапазоні 24–30 діб. Перевага корональних дір, що довго живуть при зменшенні сумарної еквівалентної ширини лінії He I $\lambda 1083$ для СН помітне для корональних дір з періодами обертання в інтервалі [30; 33] діб.

Виявлена нова закономірність появи активних ділянок та корональних дір з потужним стабільним обертанням у характерних інтервалах періодів на певних широтах у певних часових інтервалах ходу сонячного циклу. А саме: активні ділянки та корональні діри з потужним стабільним обертанням виникають не тільки в

епохи спаду 11-річних циклів (відомо раніше), а й у межах кожного 11-річного циклу між його послідовними локальними максимумами на часових інтервалах і на широтах значного зменшення рівня активності відповідного сонячного утворення.

Запропоновані та оцінені характеристики, що є, власне, новими індексами обертання сонячних структур (зокрема, активних ділянок та корональних дір) та їхньої активності:

1) $PSD(t, \varphi, P)$ — спектральна густина потужності, оцінена за рядом значень еквівалентної ширини $W(t)$ лінії He I $\lambda 1083$ нм (характеристика активності) для кожного сонячного утворення, що є характеристикою обертання в залежності від часу, широти і періоду;

2) $S1(t, \varphi)$ — сумарна за періодом в інтервалі $[P_1; P_2]$ потужність процесу, що є сумаю спектральних густин потужності $PSD(t, \varphi, P)$ в інтервалі періодів $[P_1; P_2]$ і характеризує потужне обертання сонячних структур у цьому інтервалі періодів у залежності від часу у певній широтній зоні;

3) $S2(t)$ — сумарна за широтою φ у певному широтному діапазоні потужність процесу в інтервалі періодів $[P_1; P_2]$ в залежності від часу, яка характеризує обертання певної сонячної структури для заданого широтного діапазону на Сонці;

4) $SumW(t, \varphi)$ — сумарна у деякому ковзному часовому вікні еквівалентна ширина лінії He I $\lambda 1083$ нм як функція частоти і часу, яка характеризує активність відповідного сонячного утворення у цьому ж ковзному вікні;

5) $DifW(t_{k+1}, t_k, \varphi)$ — пріоріст за час між двома послідовними моментами відліків t_{k+1} і t_k сумарної на часовому інтервалі, обмеженому t_k і t_{k+1} , еквівалентної ширини лінії He I $\lambda 1083$ нм для кожної широти φ для кожного сонячного утворення.

Оцінювання вказаних п'яти індексів обертання і активності і аналіз його результатів дозволили дати інтерпретацію результатів розв'язання сформульованих вище чотирьох задач. Отримання і застосування цих індексів, що характеризують обертання і активність деякої сонячної структури у довільній точці певного рівня атмосфери Сонця, узгоджуються з світовими тенденціями у дослідженнях варіацій обертання

сонячних структур, зокрема магнітних полів. Це видно з аналізу робіт [5, 19], де отриманий індекс обертання структур великомасштабного магнітного поля Сонця у вигляді сум спектральної густини поля у різних характерних діапазонах періодів, що характеризує швидкість обертання структур поля, у різних широтних зонах у залежності від часу та пов'язаний з змінами активності у ході сонячного циклу. У [3] методи спектрального аналізу використані для оцінювання північно-південної асиметрії сонячної активності і її часових змін для кожної широтної зони Сонця на тривалих часових інтервалах за спектрами кількох індексів сонячної активності, відмінних від чисел Вольфа, які характеризують активність Сонця не інтегрально, а у кожній широтній зоні у відповідний момент часу.

У межах подальших досліджень можна оцінити можливі зв'язки запропонованих і використаних у даній роботі індексів типу 1)–5) з індексами, запропонованими у роботах [3, 5, 19] і аналогічних публікаціях, з метою виявлення закономірностей встановлених зв'язків і використання їх для обґрунтування фізичних основ короткотермінового прогнозу сонячної активності.

Автори даної роботи бачать найближчі перспективи продовження розпочатих спільніх досліджень співробітників Інституту космічних досліджень НАНУ–НКАУ та НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія» у встановленні закономірностей зв'язків еволюційних характеристик сонячних магнітних полів з вже здобутими еволюційними характеристиками обертання і активності активних ділянок та корональних дір. Результати такого дослідження можуть бути отримані на основі того самого багатого спостережного матеріалу, наданого авторам співробітниками Національної астрономічної обсерваторії Kitt Пік і на основі нових даних наземних та супутниковых спостережень.

Дальші спільні дослідження авторів і співробітників Інституту космічних досліджень НАНУ–НКАУ та НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія» будуть спрямовані на виділення і аналіз процесів у сонячних утвореннях, істотних для формулювання достатніх умов вірогідного короткотермінового прогнозу сонячної активності та на розроблення ефективних методів такого прогнозу.

1. Андреева О. А., Зельк Я. И., Степанян Н. Н. Вращение солнечных структур в верхней хромосфере. I. Средние параметры вращения за 3 солнечных цикла // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2006.—102.—С. 84—98.
2. Андреева О. А., Степанян Н. Н., Зельк Я. И. О характере вращения солнечных структур в верхней хромосфере в 21, 22 и 23 солнечных циклах // Междунар. конф. «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности»: Тез. докл., Нижний Архыз, 28 сентября — 2 октября 2006 г. — САО РАН, 2006.—С. 18.
3. Бадалян О. Г., Обридко В. Н., Рыбак Я., Сикора Ю. Северо-южная асимметрия солнечной активности и ее квазидвухлетние вариации // Астрон. журн.—2005.—82, № 8.—С. 740—752.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. — М.: Мир, 1989.—540 с.
5. Васильева В. В., Макаров В. И., Тлатов А. Г. Циклы вращения секторной структуры магнитного поля Солнца и его активности // Письма в Астрон. журн.—2002.—28, № 3.—С. 228—234.
6. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Вращение активных областей и корональных дыр по наблюдениям Солнца в линии Не I 1083 нм // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 138—140.
7. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Технология оценивания вращения солнечных структур по наблюдениям в линии Не I 1083 нм // Пятая укр. конф. по космич. исслед.: Сб. тез., НЦУИКС, 4—11 сентября 2005 г., Евпатория. — Київ: ІКИ НАНУ-НКАУ, 2005.—С. 193.
8. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Исследование дифференциального вращения солнечных структур в верхней хромосфере // VI Междунар. крым. конф. «Космос и биосфера»: Тез. докл., Партенит, Крым, 26 сентября — 1 октября 2005 г. — Крымский науч. центр НАНУ-МОНУ, 2005.—С. 23—25.
9. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. О методах оценивания вращения солнечных структур по наблюдениям Солнца в линии Не I 1083 нм // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 1.—С. 85—89.
10. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. О применении аппарата анализа временных рядов для оценивания вращения солнечных структур в верхней хромосфере // Проблемы управления и информатики.—2006.—№ 3.—С. 102—115.
11. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Изменение глобальных характеристик вращения солнца по наблюдениям в линии Не I λ 1083 нм // Шестая укр. конф. по космич. исслед.: Сб. тез., 3—10 сентября 2006 г. НЦУИКС, Евпатория. — Київ: ІКИ НАНУ-НКАУ, 2006.—С. 20.
12. Зельк Я. И., Степанян Н. Н. Андреева О. А. Временные изменения глобальных характеристик вращения Солнца // Проблемы управления и информатики.—2007.—№ 1.—С. 127—135.
13. Зельк Я. И., Степанян Н. Н. Андреева О. А. Спектральные методы анализа вращения солнечных структур // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2007.—103.—№ 1—С. 56—69.

14. Зєлік Я. І., Степанян Н. Н. Андреева О. А. Широтно-временные изменения вращения солнечных структур и его связь с уровнем солнечной активности // Сьома укр. конф. з косміч. досліджень: Зб. тез., 3—8 вересня 2007 р., Крим, Євпаторія. — Київ: Ін-т космічних досліджень НАНУ-НКАУ, 2007.—С. 46.
15. Зєлік Я. І., Степанян Н. Н. Андреева О. А. Вращение активных солнечных образований в трех циклах и его связь с уровнем солнечной активности // VII Междунар. крым. конф. «Космос и биосфера»: Тез. докл., Судак, Крым, 1—6 октября 2007 г. — Киев: Издатель В. С. Мартынюк, 2007.—С. 37—39.
16. Котов В. А., Ханейчук В. І., Цап Т. Т. Новые измерения общего магнитного поля Солнца и его вращение // Астрон. журн.—1999.—87, Вып. 3.—С. 218—222.
17. Степанян Н. Н. Изменение дифференциального вращения фоновых магнитных полей на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1983.—67.—С. 59—65.
18. Степанян Н. Н. Корональные дыры и фоновые магнитные поля на Солнце // Солнечный цикл: Сб. науч. тр. — М.: РАН, ФТИ.—1993.—С. 44—55.
19. Тлатов А. Г. Долговременные вариации вращения и распределения крупномасштабных магнитных полей Солнца: Автореф. дис. ... доктора физ.-мат. наук. — С.-Пб.: Главная (Пулковская) астрон. обсерватория РАН, 2006.—32 с.
20. Hayes M. H. Statistical digital signal processing and modelling. — New York: John Wiley & Sons, 1996.—789 p.
21. Oppenheim A. V., Shafer R. W. Discrete-time signal processing. — Prentice-Hall, Englewood Cliffs.—NJ.—1989.—P. 730—742.
22. Persival D. B., Walden A. T. Spectral analysis for physical applications: multitaper and conventional univariate techniques. — Cambridge University Press, 1993.
23. Schuster A. On the investigation of hidden periodicities // Terrest. Magn.—1898.—3.—P. 13—41.
24. Schuster A. The periodogram and its optical analogies // Proc. Roy. Soc.—1906.—77.—P. 136.
25. Welch P. D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Trans. Audio Electroacoustics.—1967.—AU-15.—P. 70—73.

TEMPORAL VARIATIONS OF DIFFERENTIAL ROTATION OF ACTIVE REGIONS AND CORONAL HOLES AND THEIR RELATIONSHIP WITH SOLAR ACTIVITY LEVEL

Ya. I. Zielyk, N. N. Stepanian, O. A. Andrieieva

We determined the principle of temporal variations of differential rotation of solar active regions and coronal holes with the solar cycle course from observations of them in the upper chromosphere. The principle of rotational change of these structures in accordance with the solar activity level are revealed.