

РІВЕНЬ АКТИВНОСТІ СОНЦЯ В ЗАТЯЖНОМУ І ГЛИБОКОМУ МІНІМУМІ ЦИКЛІВ 23/24 ТА ЙОГО ВПЛИВ НА КЛІМАТИЧНУ СИСТЕМУ ЗЕМЛІ

І. С. Лаба¹, Л. М. Янків-Вітковська², П. Г. Лісняк³, І. Я. Підстригач¹

¹Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила й Мефодія, 8, 79005, Львів,
e-mail: laba@astro.franko.lviv.ua

²Інститут геодезії національного університету "Львівська Політехніка",
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів

³Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка,
вул. М. Кривоноса, 2, 46009, Тернопіль

(Отримано 05 червня 2013 р.; в остаточному вигляді — 08 липня 2013 р.)

За даними спостережень Сонця в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка, космічного апарату SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment), центрів дослідження клімату Землі (Великобританія), а також світових баз даних INTERNET (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/) про сонячну активність (СА) вивчено рівень активності Сонця в затяжному і глибокому мінімумі циклів 23/24 та його вплив на кліматичну систему Землі.

Установлено характерні особливості мінімуму циклів 23/24. У перехідний період (2008–2009 рр): а) плямотворча діяльність Сонця досягла рекордно низьких значень, найнижчих за останні ~ 100 р.; б) виявлено істотну асиметрію в розвитку СА в різних півкулях; в) виявлено порушення в синхронних змінах 11-річного циклу СА і $T_{\text{глоб.}}$, які спостерігалися включно до 1998 р.

Зіставляючи низький рівень СА зі зміною глобальної температури ($T_{\text{глоб.}}$) кліматичних центрів Великобританії при значному виснаженні стратосферного озонного шару в мінімумі циклів 23/24, автори виявили два протилежно діючі фактори. Значно виснажений стратосферний озонний шар спричинив збільшення сонячної енергії, що досягла поверхні Землі, і, тим самим, компенсував низький рівень СА. Тому $T_{\text{глоб.}}$ залишилася достатньо стабільною.

Ключові слова: сонячна активність, кліматична система Землі.

PACS number(s): 97.10.Ex

І. ВСТУП

Неперервні спостереження Сонця дали змогу встановити, що 23 цикл, який почався у травні 1996 р., завершився у грудні 2008 р. Він був найтривалішим (12.7 р.) за останні 160 р.

Спостереження Сонця в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка протягом цього циклу виявили низку особливостей, які відрізняють його від попередніх циклів. Це, насамперед, велика тривалість, менша амплітуда щодо попереднього парного циклу № 22, а також те, що цикл № 23 завершився тривалим і глибоким мінімумом, рекордним за останні приблизно 100 років. Як виявилось, особливості циклу № 23 перегукуються з дуже гучною й актуальною проблемою глобального потепління клімату Землі та її природи. Якщо в другій половині ХХ ст. антропогенні фактори і СА діяли в одному напрямку, підвищуючи температуру Землі, то надалі з'явилася можливість розділити їх у зв'язку з теперішнім спадом СА.

Зміна клімату Землі — вельми важлива проблема людства. До кінця 60-х років ХХ ст. не було сумнівів у тому, що зміна клімату зумовлена природними причинами і передусім — постійною циклічною (коротко-

і особливо довготривалою) зміною СА. Але в цей час була висунута гіпотеза, що поступово зростаючі викиди (CO_2 і ін.) в атмосферу Землі приведуть до парникового ефекту і, як наслідок, до підвищення глобальної температури. Спостережуване потепління в 70-х роках ХХ ст. проінтерпретовано як підтвердження цієї гіпотези і досі ідея антропогенного впливу на клімат Землі домінує як у світі науки, так і в засобах масової інформації. Для оцінки зміни клімату, викликані техногенними факторами, Всесвітня метеорологічна організація згідно з програмою ООН з навколишнього середовища створила в 1988 р. Міжнародну групу експертів зі зміни клімату (МГЕЗК). МГЕЗК вживає відповідні заходи щодо зменшення антропогенного забруднення навколишнього середовища.

Мінімуму циклів 23/24 присвячено низку статей. Так, Абдусаматов [1, 2] установив залежність 11-річного циклу від фази вікового циклу й дав прогноз завершення циклу № 23 в липні 2007 р. Він також зробив висновок [3], що 11-річний геліоцикл — це одночасне скоординоване коливання активності, радіуса і потоку радіації як за фазою, так і за амплітудою. Для вікових циклів минулого тисячоліття Eddy [4, 5] виявив високу кореляцію між періодами значних варіацій рівня СА і відповідними достовірними змінами

клімату Землі як за фазою, так і за амплітудою; у кожному мінімумі (100-річного періоду) спостерігалося похолодання клімату, а у період високих максимумів — потепління. Такі ж результати одержав Борисенков [6]. Автори праці [7] виявили високу кореляцію між коливаннями $T_{\text{глоб.}}$ в 70–90 рр. ХХ ст. і відповідними коливаннями СА. Кількість плям на Сонці протягом 1861–1989 рр. показує чудовий паралелізм з одночасною зміною $T_{\text{глоб.}}$ у північній півкулі. Зв'язок між змінами низької хмарності й потоком галактичних космічних променів уперше виявили автори праці [8]. Високу кореляцію між низькою хмарністю і ГКП підтверджено в праці [9] і дещо пізніше — в [10]. Hathaway [11], дослідивши основні параметри циклу № 23, одержав аномально низькі їхні значення в мінімумі 23/24. Gibson та ін. [12] спостерегли зниження напруженості магнітного поля на полюсах. Автори праці [13] виявили пониження яскравісної температури на полюсах у мінімумі 23/24 на $\Delta T = 250$ К стосовно попереднього мінімуму. При дослідженні спектрогеліограми в лінії КСаII ($\lambda = 3934$ Å) оцінено [14] великий внесок супергрануляційної (СГ) сітки (~ 80%) у варіації сонячного випромінювання. У роботі [15] автори вивчали зміну контрасту спокійної СГ-сітки (КСаII) впродовж циклу № 19 і одержали високу кореляцію з числом Вольфа. Автор праці [16] вважає, що тренд повного сонячного випромінювання спричинений поверхневими магнітними полями, однак зміни цих полів на порядок менші від змін випромінювання. Автори праці [17] оцінили внесок (~ 90%) поверхневого магнітного поля Сонця у зміни повного випромінювання. У працях [18, 19] наведено прогноз циклу № 24; якщо автор [18] передбачає, що цикли № 24 і № 25 будуть малої інтенсивності, то згідно з [19] висота циклу № 24 переважатиме попередній цикл на 30%–50%. У праці [20] виявлено спад напруженості магнітних полів плям за останні ~ 10 років. Досліджуючи зміни магнітних полів плям упродовж 1924–2004 рр., Н. Лозицька [21] одержала зростання магнітометричного індексу (середньорічного значення модуля індукції магнітного поля плям) у зв'язку з віковим зменшенням чисел Вольфа. Зіставлення цього індексу з приземною температурою [22] виявило достовірну позитивну кореляцію. Вивчаючи вплив крайнього УФ на температуру йоносфери впродовж циклу, Foukal [23] виявив зміни температури на 300%. Svensmark [24] запропонував космокліматичну теорію зміни клімату, згідно з якою, крім прямої дії сонячної радіації на Землю, є ще й опосередкована його дія — через галактичні космічні промені (ГКП). Названі в літературі автори вказують на подібність циклу № 23 до циклів № 4 і № 13, після яких йшло декілька циклів малої інтенсивності. У [25] підтверджено вплив ГКП на хмаротворення в тропосфері.

Автори цієї статті вивчають рівень СА під час глибокого і тривалого мінімуму циклів 23/24 і його вплив на кліматичну систему Землі. Оскільки ця тема перегукується з актуальною проблемою глобального потепління (клімату Землі), то під час значного спаду СА можна розділити природний й антропогенний

фактори впливу, зіставляючи одержані результати зі зміною глобальної температури.

II. СПОСТЕРЕЖЕННЯ Й ОБРОБКА ДАНИХ

Спостереження Сонця проводять як наземними, так і космічними апаратами (КА). Для дослідження, крім власних спостережень, використовують світові бази INTERNET-даних (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA) про Сонце та його активність.

Головним проявом СА є наявність плям на поверхні Сонця. За міру плямотворчої діяльності прийнято відносне число сонячних плям (число Вольфа, W). Закон Вольфа відображає зміну середньомісячних значень чисел сонячних плям упродовж циклу. Вольф остаточно обчислив середній період (11.1 р.) циклічних змін СА. Кожний 11-річний цикл починається в мінімумі й завершується в мінімумі (наступному). Моменти мінімумів/максимумів визначають за допомогою згладжених (за 13 точками) середньомісячних чисел Вольфа. При визначенні тривалості 11-річного циклу цим методом її величина змінювалася від 9.0 до 13.6 р. Не лише тривалість, але й висота (інтенсивність) циклу теж значно змінювалася: від 48 до 200. Для визначення W використовують усі групи плям на видимому диску Сонця.

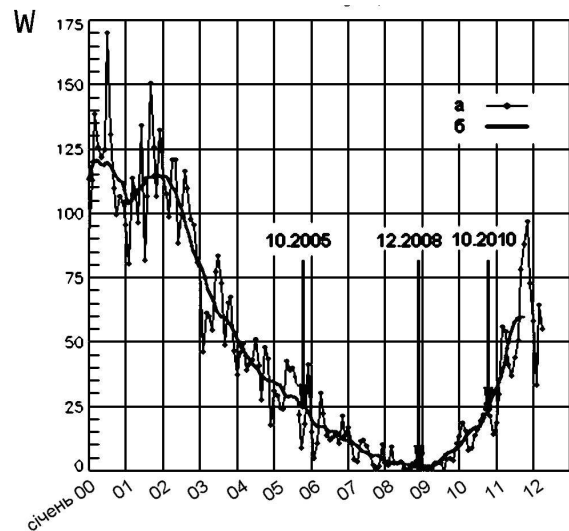


Рис. 1. Фаза мінімуму циклів 23/24: середньомісячні (а) і згладжені (б) значення W . Стрілки вказують на початок, кінець та момент мінімуму (за даними NOAA/SWPC Boulder, CO USA).

Фаза мінімуму циклів 23/24, яка почалась у 2005 р., фактично тривала до кінця 2010 р., охопивши завершальну частину вітки спаду старого циклу № 23, глибокий перехідний період та початок вітки росту нового циклу № 24.

На рис. 1 показано фазу мінімуму циклів 23/24 середньомісячних величин W . Проведено згладження,

визначено згладжені значення для кожного місяця, у т. ч. і момент мінімуму (екстремальне значення), який є границею розмежування двох циклів.

11-річний цикл СА представляє також закон Шперера і стосується зміни розподілу груп плям за географічними широтами (φ в N-, S- півкулях) з ходом циклу. Він добре ілюструється “метеликовою” діа-

грамою, яку побудовав уперше Маундер. Суть закону — у сповзанні зони плямоутворення протягом 11-річного циклу з вищих широт ($\varphi \geq \pm 30^\circ$) до екватора ($\varphi = \pm 8^\circ$).

На рис. 2 наведено широти (φ) в N- і S-півкулях диска Сонця, на яких виникли всі групи плям (не числа Вольфа) протягом 2007–2010 рр.

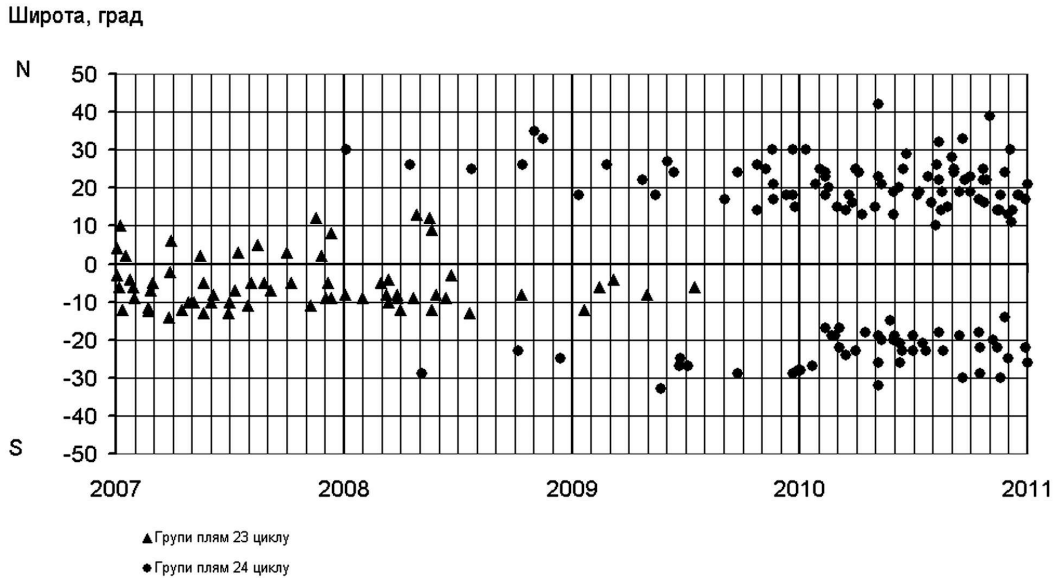


Рис. 2. Широти плямоутворення в мінімумі 23/24 циклів.

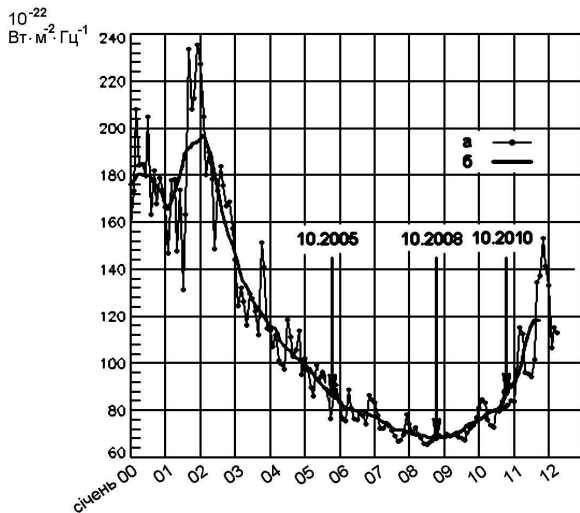


Рис. 3. Середньомісячні (а) і згладжені (б) величини радіопотоку в мінімумі циклів 23/24. Стрілки вказують на початок, кінець мінімуму та екстремальне значення індексу (за даними NOAA/SWPC Boulder, CO USA).

Ототожнення належності до старого/нового циклів здійснювали за магнітограмами, одержаними космічною сонячною обсерваторією SOHO/MDI (Solar and Heliospheric Observatory / Michelson Doppler Imager), а також згідно з (<http://www.spaceweather.com/>).

11-річний цикл чисел сонячних плям — основний параметр СА. З ним синхронізовано багато параметрів/індексів як сонячних, так і геофізичних. Автори навели лише декілька з них: радіопотік ($\lambda 10.7$ см; рис. 3), геофізичний планетарний A_p -індекс (рис. 4) і повне сонячне випромінювання (сонячна стала, рис. 5).

Потік радіовипромінювання ($\lambda 10.7$ см;) Сонця і геофізичний планетарний A_p -індекс узято з NOAA/SWPC Boulder, CO USA (<http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/index.html>), а дані реєстрації повного сонячного випромінювання — КА SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment; <http://lasp.colorado.edu/sorce/data/tsi.data.htm>).

На рис.3 зображено потік радіовипромінювання (F10.7) Сонця в мінімумі циклів 23/24. Спостереження радіопотоку F10.7 розпочато в 1947 р. Радіовипромінювання $\lambda 10.7$ см — це міра випромінювання плазми в магнітному полі на рівні верхньої хромосфери — нижньої корони, яке змінюється паралельно до чисел Вольфа. У виміри внесено поправку, розраховану на 1 а.о. Дані радіопотоку (F 10.7) від усього диска Сонця виміряні в одиницях 10^{-22} Вт/м² Гц.

Планетарний A_p -індекс, спостереження якого розпочато в 1932 р., значною мірою є показником впливу на магнітосферу Землі активних явищ на Сонці. Він відображає середні значення максимальних флуктуа-

цій компонент магнітного поля, які реєструють 12 вибраних субавроральних обсерваторій північної та південної широт ($44^\circ - 60^\circ$). Цей індекс коливається в

межах 0–400. При $A_p = 0$ магнітне поле Сонця на низькому рівні й геомагнітне поле дуже спокійне, а при $A_p > 35$ починаються основні геомагнітні бурі.

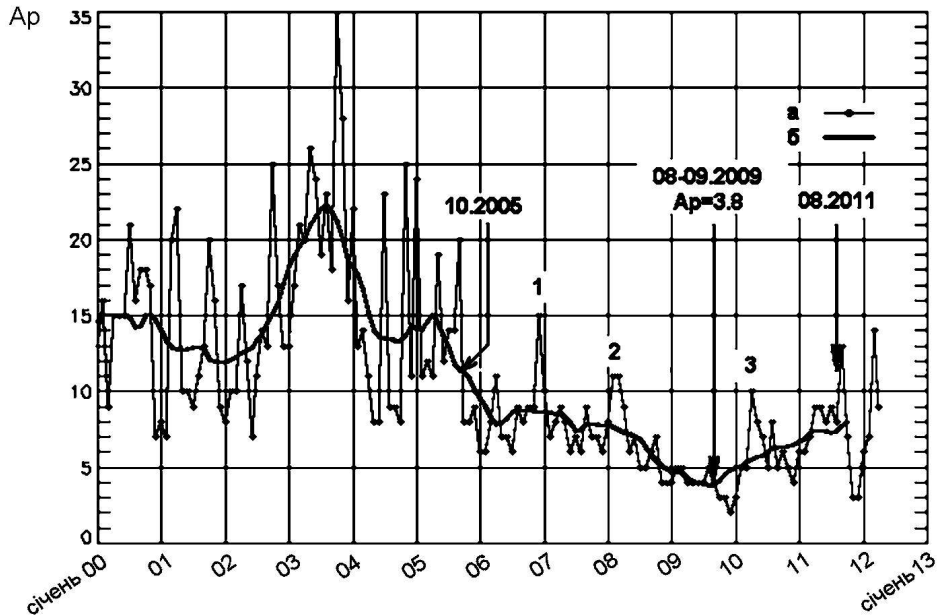


Рис. 4. Середньомісячні (а) і згладжені (б) величини A_p -індексу. Стрілки вказують на початок, кінець мінімуму та екстремальне значення індексу (за даними NOAA/SWPC Boulder, CO USA).

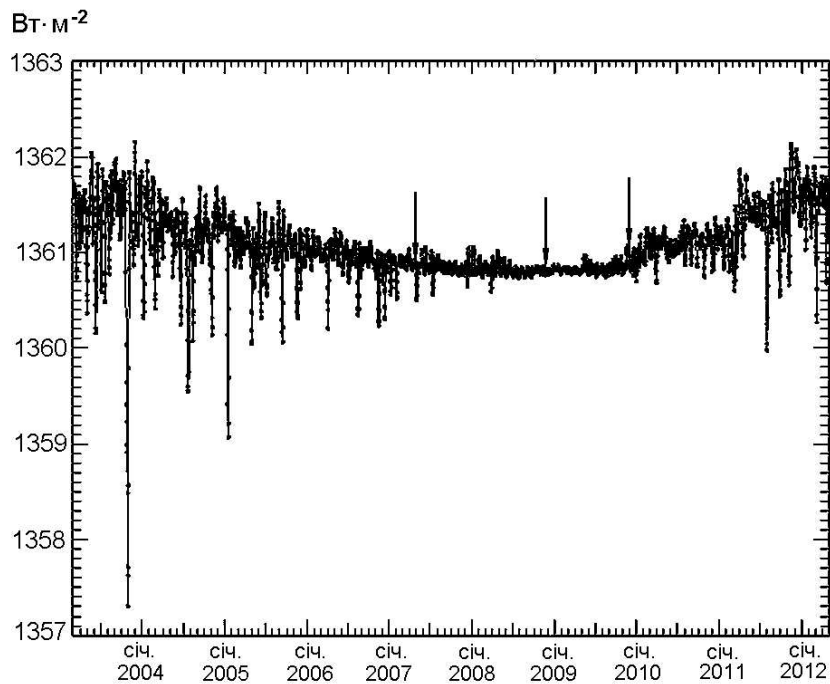


Рис. 5. Повне сонячне випромінювання в мінімумі циклів 23/24, виміряне КА SORCE. Стрілки вказують на початок і кінець глибокого мінімуму та екстремальне значення (за даними КА SORCE TSI).

На рис. 5 зображено повне сонячне випромінювання, зареєстроване КА SORCE, з внесенням поправки, розрахованої на 1 а.о. (1367 ± 6 (Вт/м²) = 1.959 ± 0.001 (кал/см² хв.)). Повне сонячне випромінювання (сонячна стала), неперервне спостереження якого розпочате 1978 р., практично змінюється впродовж 11-річного циклу.

Мета КА SORCE — вивчити зв'язок сонячної радіації та клімату, дослідити сонячно-земні зв'язки точними щоденними вимірами інтенсивності та спектрального складу сонячної радіації, що досягає атмосфери Землі.

III. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження СА та її дії в межах геліосфери і, зокрема, на кліматичну систему Землі — основна тема фізики Сонця й сонячно-земних зв'язків.

Фаза мінімуму циклів 23/24, яка почалася 2005 р., тривала майже 5 років. Вона охопила завершальну частину вітки спаду циклу № 23, глибокий мінімум (перехідна епоха, 2008–2009 рр.) і початкову частину вітки зростання нового циклу № 24 (рис. 1).

Завершальна частина вітки спаду старого циклу № 23 почалася (згідно зі згладженою кривою, рис. 1) у жовтні 2005 р. і закінчилась у грудні 2008 р.

Наприкінці 2005 р. Сонце проявило високу активність 12.11.-18.11. (32 спалахи С-класу, 6-М-класу), а також 02.12 (4 спалахи М-класу).

Дуже високий рівень активності Сонце показало протягом 04.12.–07.12.2006 р. (42 спалахи С-класу, 5 — М-класу, 2 — Х-класу) і 13.12.–14.12.2006 р. (4 спалахи С-класу, 2 — Х-класу). Спалах 5.12.2006 р. дав максимальне випромінювання в оптиці (4В) і потоки нейтрального водню. 06.12.2006 р. та ж сама АО 10930 продукувала рентгенівський спалах Х6.0, який створив цунамоподібну ударну хвилю. Високим був рівень СА 01.06.–04.06.2006 р. (7 спалахів С-класу, 9 — М-класу). У липні та грудні 2007 р. на Сонці виникали лише спалахи С-класу. У цілому впродовж 2007 р. Сонце було спокійним. Для вітки спаду характерний повільний спад згладжених середньомісячних значень чисел Вольфа, екстремальна величина якого припадає на грудень 2008 р. Відзначимо також суттєві градієнти середньомісячних значень чисел Вольфа наприкінці 2005 р. і на початку 2006 р., які згодом зменшилися. Виходячи з того факту, що глибину мінімуму визначає кількість днів безплямового Сонця впродовж року, можна прийняти початком глибокого мінімуму 2007 р. (163 дні без плям). Найменші значення згладжених середньомісячних чисел Вольфа припадають на 2008–2009 рр. (268 і 260 днів без плям, відповідно, з екстремумом 1.7 в грудні 2008 р.).

Перехідний період циклів 23/24 (рис. 2). почався в січні 2008 р. (з появи першої групи плям (гр.пл.) нового циклу № 24 NOAA AR 10981) і закінчився під кінець липня 2009 р. (остання група плям старого циклу). Це період, упродовж якого на фоні великої

кількості днів безплямового Сонця на його поверхні зароджувалися гр.п. дуже малих розмірів із простою конфігурацією магнітного поля, малою частотою виникнення і тривалістю існування та не супроводжувалася (значними) спалахами й викидами корональної маси. Закон Шперера для цієї епохи представляє просторово-часове “перекриття” гр.пл. обох циклів, даючи при цьому чітке розділення (рис. 2). Поряд з гр.пл. старого циклу № 23, що локалізуються біля екватора, на середніх широтах ($|\varphi| \approx 30^\circ$) з'являються гр.пл. нового циклу № 24 з протилежною полярністю. Протягом майже двох років (2008–2009 рр.) спостерігалися слабкі флуктуації чисел Вольфа на дуже низькому рівні, хоч формально момент мінімуму припадає на грудень 2008 р., фізично епоха глибокого мінімуму продовжувалася майже до грудня 2009 р., не виявляючи ознак початку зростання СА.

У N-півкулі (рис. 2) гр.пл. старого циклу останній раз виникала після 4-місячного спокою у травні 2008 р. В S-півкулі гр.пл. старого циклу з'явилася у липні 2009 р. (запізнення стосовно N-півкулі на 14 місяців). Якщо затримка на 4 місяці в появі гр.пл. нового циклу в S-півкулі щодо N-півкулі не істотна, то продовження діяльності старого циклу в південній півкулі на 14 місяців відображає значну асиметрію в розвитку СА в різних півкулях у перехідний період. І якщо для старого циклу № 23 характерна явна перевага чисел гр.пл. (не чисел Вольфа) в S-півкулі, то для нового циклу № 24 навпаки — переважає плямоутворення в N-півкулі. Плямотворча діяльність на Сонці в перехідний період циклів 23/24 досягла рекордно низьких значень, найнижчих за останні ~ 100 років.

2009 р. — перший рік нового циклу № 24. Невелике зростання СА почалось у вересні-жовтні й особливо у грудні 2009 р., а також у перших чотирьох місяцях 2010 р. і знаменувало початок реального виходу з глибокого мінімуму (початок вітки зростання). Від 01.01.2010 р. до 15.02.2010 р. сім активних областей (АО) нового циклу продукували 75 рентгенівських спалахів С-класу і 15 — М-класу, у т.ч. два великі спалахи, що спричинило зростання геофізичного A_p -індексу, який характеризує стан космічної погоди. У цілому рівень СА в 2010 р. (березень — грудень) був низьким; такою була й геофізична активність (переважно ММБ). Порівняно з останніми місяцями 2010 р. перші три місяці 2011 р. характеризувалися значним поступовим зростанням середньомісячних чисел плям (січень — 19.0, лютий — 29.4, березень — 56.2). Це значне зростання СА засвідчило вихід Сонця із затяжної фази мінімуму.

Як видно з рис. 3, радіопотік F10.7 см повільно зменшується, досягаючи рекордно низької величини (68.2 сонячні одиниці потоку) у жовтні 2008 р., а починаючи з березня 2009 р. відбувається зростання. Градієнти середньомісячних значень F10.7 см значно менші, ніж на рис. 1. В основному це теплове випромінювання яскравих компактних джерел (ядра плям) і дещо слабшого дифузного з підвищеним магнітним полем, а також супергрануляційної сітки. F10.7 см є чутливим індикатором СА і дає інформацію про об-

ласть енерговиділення та часто використовується для характеристики степеня йонізації верхньої атмосфери.

Геофізичний A_p -індекс є мірою космічної погоди й показником магнітної активності Сонця. Різкий спад індексу (рис. 4) припадає на жовтень 2005 р. Надалі зменшення його середньомісячних значень відбувалося дещо повільніше. Найменше значення A_p -індексу припадає на 8–9 місяці 2009 р. (3.8) — найспокійніші від початку спостережень. Значні градієнти середньомісячних величин викликані: 1 — спалахово-активною областю NOAA 10930 у грудні 2006 р.; 2 — підсиленням СА корональних дір (КД) у лютому–березні 2008 р. і 3 — підсиленням СА у квітні–травні 2010 р. A_p -індекс, що є мірою зміни магнітного поля Землі при його взаємодії з міжпланетним магнітним полем і залежить від числа Вольфа, потужності викидів корональної плазми, густини і швидкості СВ, не вийшов із мінімуму до 08.2011 р.

Повне сонячне випромінювання (сонячна стала, рис. 5) змінюється синхронно щодо чисел Вольфа (W) і безпосередньо пов'язане зі зміною глобальної температури і клімату та контролюється еволюцією магнітних полів на поверхні Сонця. Відзначимо, що групи плям мають максимальну індукцію (> 1500 Гс) магнітного поля на рівні фотосфери, яка різко зменшується як за висотою стосовно до місця виходу, так і за площею. Великі групи плям, проходячи по видимому диску Сонця, створюють помітний дефіцит у видимому діапазоні спектра (≥ 0.1 %, провали на рис. 5), але факельні поля підвищеної яскравості поблизу плям дають, відповідно, надлишок випромінювання як у видимому, так і у близькому УФ-діапазонах. Із підвищенням температури у верхніх шарах атмосфери Сонця — хромосфері (флокульні поля) і коронні (корональні конденсації, яскраві маленькі утворення, $2 \cdot 10^6$ К) — останні випромінюють в УФ — і м'якому рентгенівському діапазонах. Магнітні поля (< 1500 Гс) спричиняють нагрівання плазми і, відповідно, підсилюють її теплове випромінювання на всіх рівнях атмосфери Сонця. Оскільки сонячний цикл є фактично циклом його магнітної активності, то зі збільшенням зайнятої магнітним полем площі сонячної поверхні зростає короткохвильове електромагнітне (УФ-, м'яке рентгенівське) випромінювання, за рахунок чого і спостерігається зміна сонячної сталої на 0.1% (1.4 Вт/м^2) протягом циклу (рис. 5). Зміни випромінювання в УФ-діапазоні набагато більші, ніж в оптичному діапазоні. Показане на рис. 5 повільне зменшення сонячної сталої на завершальній частині вітки спаду циклу № 23 досягнуло екстремальної величини (11–12) 2008 р., а період 05.07 р.–11.09 р. — найнижчий рівень за весь час спостереження і на 0.2 Вт/м^2 менший, ніж 1996 р. У глибокому мінімумі циклів 23/24 випромінювання в крайньому УФ зменшилося на 10% – 15% , в УФ — на 6% , а у видимому діапазоні — на 0.02 %.

Випромінювання Сонця виявляє домінуючий енергетичний вплив на всі фізичні, хімічні та біологічні процеси в земній екосистемі, природно впливаючи на

атмосферу і клімат Землі. Інтенсивність падаючого сонячного випромінювання, поряд із середнім альбедо, визначає середню рівноважну температуру планети. 20% – 25% повного випромінювання поглинається водяною парою в атмосфері, хмарами й озоном. Інтенсивність поглинання визначається довжиною хвиль падаючого випромінювання. УФ-випромінювання з $\lambda < 300$ нм повністю поглинається атмосферою й формує температуру, структуру, склад і динаміку шарів стратосфери й термосфери. Видимі й інфрачервоні промені проникають глибше (до Землі). Випромінювання визначає енергетичний баланс атмосфери.

Забруднення атмосфери Землі, як природне (вулканічний газ і пил), так і антропогенне (CO_2 , SO_3 і ін.), тепер становить ~ 1 млрд т газових викидів і ~ 400 млн т пилу. Висока концентрація забруднювальних речовин в атмосфері викликала глобальні екологічні проблеми: парниковий ефект, озонні діри, кислотні дощі, а також вплинула на її теплопровідність і, відповідно, підсилила швидкість глобальної циркуляції.

“Зелені легені” нашої планети не сприяють зростанню впливу CO_2 в утворенні парникового ефекту, а кислотні дощі можуть знижувати врожай сільськогосподарських культур.

Озонні діри — це локальні мінімуми загального вмісту озону (ЗВО). Дві сучасні озонні діри є не лише над полюсами, але й простягаються до середніх широт. Озон — складова і невід’ємна частина атмосфери, продукт дії УФ радіації, захищає біосферу від жорсткого УФ-випромінювання Сонця.

Озон — природний терморегулятор погоди і клімату, затримує надлишок радіації при підвищенні СА і є захисним екраном для всього живого на Землі. На жаль, кількість руйнівників озону (фреонів) щороку зростає на 8% – 9% . Зниження ЗВО в атмосфері веде до підвищення приземної температури. Виснаження (руйнування) озонного шару (а не CO_2) спричиняє парниковий ефект і глобальне потепління.

Отже, основними забруднювальними агентами, що впливають на зміну клімату, є фторхлорвуглеводневі руйнівники озону та вулканічна діяльність. ЗВО в нижній стратосфері дуже неоднорідний. Для нього характерні: весняний максимум й осінній мінімум, залежність від широти, довготи й чутливості до низьких температур. Різні наземні станції дають різні місцеві температури, згідно з якими кліматичні центри даних вираховують $T_{\text{глоб.}}$. Усе це утруднює ідентифікацію подій на Сонці з $T_{\text{глоб.}}$.

На рис. 6 показана зміна глобальної температури за 1982–2012 рр., у т. ч. й у мінімумі циклів 23/24. Упродовж другої половини ХХ ст. відбулося підвищення $T_{\text{глоб.}}$ на 0.6°C – 0.8°C , яке завершилось у 1998 р., і його можна пояснити (поряд з антропогенним фактором) наявністю вікового модерного максимуму СА; відтак температура стабілізувалася, а за декілька останніх років показала (рис. 6) незначний тренд зниження. Три інші центри кліматичних даних подають стабілізовану $T_{\text{глоб.}}$ прямою, паралельною до осі часу.

Проаналізуємо $T_{\text{глоб.}}$ у межах 5-річного затяжно-

го і глибокого мінімуму циклів 23/24, позначеного на рис. 6 стрілками, узятими з рис. 1. Пік (1) на рис.6 спричинений дуже високим рівнем СА в грудні 2006 р. (проходження по диску Сонця спалахово-активної області NOAA AR 10930); пік цей дещо запізнюється в часі щодо піка (1) на рис. 4, що цілком закономірно. Пік (2) зумовлений посиленням СА у вересні–жовтні 2009 р. Пік (3) викликаний збільшенням СА (лютий

2010 р.) та інтенсивності флокулярних полів і корональних конденсацій в активних областях протягом березня–вересня 2010 р.

Значне пониження $T_{\text{глоб.}}$ почалось у листопаді 2007 р., а різкий спад припадає на грудень 2007 р.–січень 2008 р., після чого через втручання невідомого чинника температура підвищувалася. Таким фактором автори вважають виснаження озонного шару.

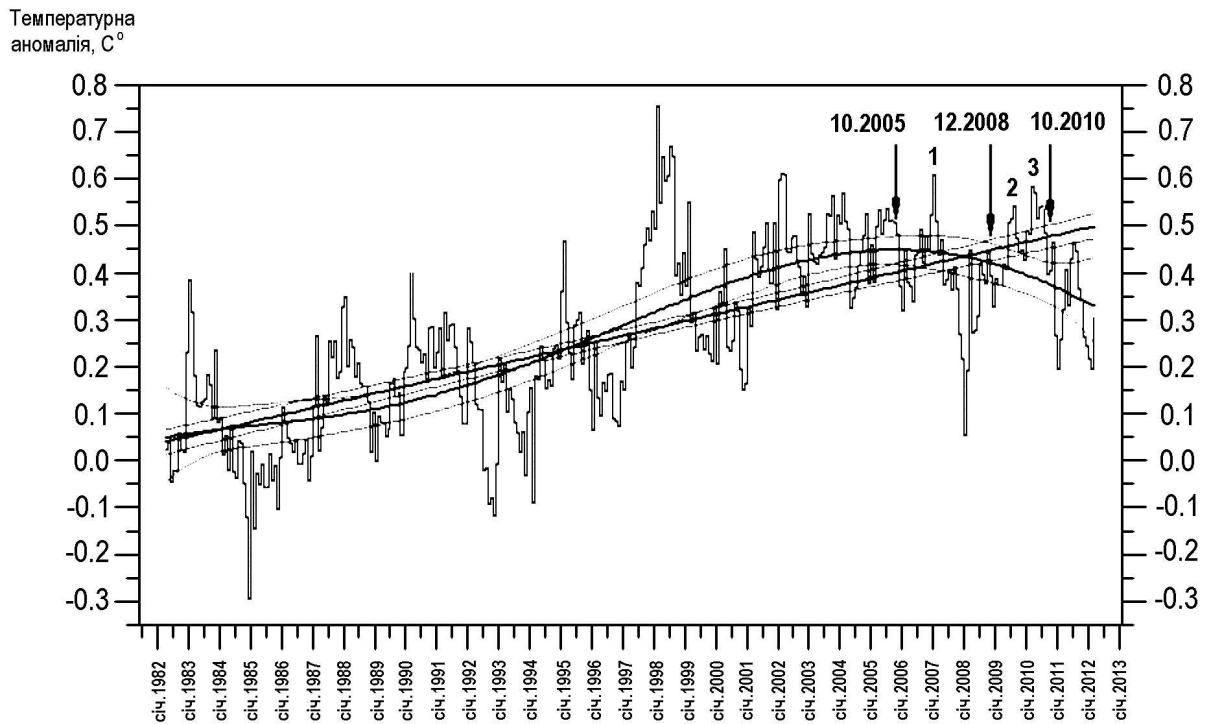


Рис. 6. Зміна $T_{\text{глоб.}}$ протягом 1982–2011 рр., наведена Центром Хедлі і Підрозділом досліджень клімату Університету Східної Англії (Великобританія). Стрілки (початок, кінець та момент мінімуму) — як на рис. 1 (за даними HadCRUT3).

Перебіг $T_{\text{глоб.}}$ (рис. 6) після 1998 р. не підтвердив прогнозу кліматологів, які передбачали подальше її підвищення у зв'язку з інтенсивним продовженням викидів CO_2 в атмосферу. Незадоволені й геліофізики, які очікували значного пониження $T_{\text{глоб.}}$ в затяжному і глибокому мінімумі циклів 23/24.

Швидке руйнування озону (а не CO_2) веде до глобального потепління.

Кліматичні дані показують тісну кореляцію з 11-річним сонячним циклом протягом сотень років (регіональна зміна температури $\Delta T \approx 2.6^\circ \text{C}$ в такт сонячним плямам). Якщо взяти до уваги вікові цикли (де вплив на клімат триваліший), то ефект впливу підсилюється, що може бути причиною як потепління, так і похолодання. Вікові мінімуми збігалися з похолоданням, а максимуми — із потеплінням.

Космокліматична теорія зміни клімату [24] переконливо стверджує: “Зміни магнітної активності Сонця мають великий вплив на клімат Землі”. Причому, крім прямої дії сонячної радіації на землю, є ще опосередкована його дія — через ГКП. Це означає,

що в періоди вікових мінімумів (декілька малих 11-річних циклів) значно знижується тиск сонячного вітру (СВ), магнітне поле якого не здатне екранувати ГКП, велика частина (10^{15} еВ) яких, досягаючи нижніх шарів тропосфери і взаємодіючи з нею, стають центрами конденсації і спричиняють утворення низьких хмар із високим альбедо, що веде до охолодження Землі. Хмари в десятки раз більше впливають на зміну клімату, ніж CO_2 .

Вплив КП на хмароутворення був підтверджений проведеним CERN'ом (European Center for Nuclear Research) CLOUD-експериментом у 2011 р. [25].

Для кожного мінімуму попередніх циклів максимального розвитку досягали відкриті корональні структури: корональні діри (КД) та полярні ділянки. Але для мінімуму циклів 23/24 площа поверхні КД (у приполярних областях) істотно зменшилась і магнітний потік від них знизився на 40% порівняно з 1996 р. Зменшився тиск СВ (на 20%) і його магнітне поле, зменшилися його параметри і в навколосемному просторі (напруженість магнітного поля — на

15%, а густина — на 45%). З'являлися порівняно великі КД і в приекваторіальній ділянці (чого не було в попередніх мінімумах) упродовж усього зтяжного мінімуму. СВ від них був швидший, але через малу густину виявляв слабку геоактивність (2008 р. — 62 КД створили 17 ММБ; 2009 р. — 38 КД — 2 ММБ), зменшилася яскравісна температура ($\Delta T_{\text{я}} = 250$ К) щодо попереднього мінімуму. СВ з умороженим магнітним полем поширюється до границь геліосфери і взаємодіє з вітром міжзор'яного середовища.

Зниження тиску СВ (густини й магнітного поля) зменшили екранування Землі від ГКП і збільшили концентрацію космогенних ізотопів ^{14}C , ^{10}Be . Тому у 2008–2009 рр. був рекордно високий рівень ГКП (на 20%).

Полярні магнітні поля в мінімумі мають максимальні значення й важливі, власне, тим, що вони є проявом глобального полюїдального магнітного поля, із якого генерується тороїдальний складник; це означає, що інтенсивність наступного циклу визначається величиною полярного магнітного поля в мінімумі. За три останні цикли величина полярного магнітного поля зменшилась удвічі рази [12]. Продовжує зменшуватись індукція магнітного поля плям [20]. Є, правда, і обнадійливі результати, які одержала Н. Лозицька [21] і у зв'язку з віковим зменшенням чисел Вольфа зростатиме середньорічне значення модуля індукції магнітного поля плям.

Аномальний цикл № 23 дуже подібний до таких же циклів № 4 і № 13, після яких спостерігали низку 11-

річних циклів малої амплітуди. Виходячи зі сказаного вище [12, 20], автори вважають, що ряд циклів, починаючи з № 24, будуть циклами малої інтенсивності.

IV. ВИСНОВКИ

Вивчено характерні особливості мінімуму циклів 23/24. У перехідний період (2008–2009 рр.): а) плямотворча діяльність Сонця досягла рекордно низьких значень, найнижчих за останні ~ 100 р.; б) виявлено істотну асиметрію в розвитку СА в різних півкулях.

Відсутність плям у мінімумі циклів 23/24 пов'язана з низькою (< 1500 Гс) індукцією магнітного поля в активних утвореннях фотосфери, а велика тривалість — зі спостережуваним сповільненням потоків плазми в надрах Сонця. Це свідчить про зміну режиму генерації магнітного поля в тахокліні.

Виявлено порушення в синхронних змінах СА і $T_{\text{глоб.}}$ протягом мінімуму циклів 23/24.

Зіставляючи рекордно низький рівень плямотворчої діяльності Сонця, руйнування стратосферного озонного шару і $T_{\text{глоб.}}$ в мінімумі циклів 23/24, автори виявили два протилежно діючі фактори, які безпосередньо пов'язані з $T_{\text{глоб.}}$. Значно виснажений стратосферний озонний шар спричинив збільшення сонячної енергії, що досягла поверхні Землі і, тим самим, компенсував низький рівень СА. Тому $T_{\text{глоб.}}$ залишилася досить стабільною.

-
- [1] X. И. Абдусаматов, Кинем. физ. небес. тел **22**, 183 (2006).
- [2] X. И. Абдусаматов, Кинем. физ. небес. тел **23**, 141 (2007).
- [3] X. И. Абдусаматов, Изв. Крым. астрофиз. обсерв. **103**, 292 (2007).
- [4] I. A. Eddy, Science **192**, 1189 (1976).
- [5] I. A. Eddy, Sci. Am. **236**, 80 (1977).
- [6] Е. П. Борисенков, *Колебания климата за последнее тысячелетие* (Гидрометеоиздат, Ленинград, 1988).
- [7] E. Friis-Kristensen, K. Lassen, Science **254**, 698 (1991).
- [8] H. Svensmark, E. Friis-Christensen, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. **59**, 1225 (1997).
- [9] N. March, H. Svensmark, Geophys. Res. **108(D6)**, 4195 (2003).
- [10] I. G. Usoskin *et al.*, J. Geophys. Res. **110**, 1 (2005).
- [11] D. Hathaway, Space Sci. Rev. **144**, 401 (2009).
- [12] S. E. Gibson *et al.*, J. Geophys. Res. **114**, A09105 (2009).
- [13] N. Gopalswamy N. Gopalswamy, S. Yashiro, P. A. Markela, K. Shibasaki, in *American Geophysical Union, Fall Meeting 2009*, abstract #SH13C-02 (2009).
- [14] S. R. Walton, D. G. Preisinger, G. A. Chapman, Solar Phys. **213**, 301 (2003).
- [15] Т. Т. Цап, И. С. Лаба, Изв. Крым. астрофиз. обсерв. **48**, 73 (1973).
- [16] C. Frolich, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2008*, abstract #SH21C-05 (2008).
- [17] S. K. Solanki, M. Fligge, Adv. Spase Res. **29**, 1933 (2002).
- [18] D. C. Archibald, Energ. Environ. **17**, 29 (2006).
- [19] M. Dikpati, P. A. Gilman, Astrophys. J. **649**, 498 (2006).
- [20] W. Livingston, M. Penn, EOS: Trans. Am. Geophys. Union **90**, 257 (2009).
- [21] N. I. Lozitska, Kinem. Phys. Celest. Bodies, Suppl. Ser. No 5, 151 (2005).
- [22] N. I. Lozitska, Kinem. Phys. Celest. Bodies, Suppl. Ser. No 5, 153 (2005).
- [23] P. K. Foukal, Sci. Am. **262**, 34 (1990)
- [24] H. Svensmark, Astron. Astrophys. **48**, 1.19 (2007).
- [25] J. Kirkby *et al.*, Nature **476**, 429 (2011).

THE SOLAR ACTIVITY LEVEL DURING LONG-TERM AND DEEP MINIMUM OF CYCLES 23 AND 24 ITS INFLUENCE UPON THE TERRESTRIAL SYSTEM

I. S. Laba¹, L. M. Yankiv-Vitkovska², P. G. Lisnyak³, I. Ya. Pidstryhach¹

¹*The Ivan Franko National University of Lviv, Astronomical Observatory,*

8, Kyrylo and Mephodij Str., Lviv, UA-79005, Ukraine, e-mail: laba@astro.franko.lviv.ua

²*Lviv Polytechnic National University, Institute Geodesy, 12, Bandera Str., Lviv, UA-79013, Ukraine*

³*V. Gnatyuk National Pedagogical University of Ternopil, 2, M. Kryvonosa Str., Ternopil, UA-46009, Ukraine*

The level of Solar activity during long-term and deep minimum of 23rd and 24th cycles with its influence upon the terrestrial climatic system were explored according to the observational data of Astronomical Observatoty of the Ivan Franko national University of Lviv, the SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment) space apparatus, several British climatic research centres and world INTERNET data base (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/SPP/SOLAR_DATA) about Solar activity.

Typical peculiarities of the minimum of cycles 23/24 were studied at this paper. The transition period from January 2008 to July 2009 was characterized by first-sunspot activity reached the lowest values during the last 100 years; secondly the substantial asymmetry of the development of Solar activity at different hemispheres was discovered; and thirdly one may observe violations of synchronous changes of 11-year cycle and $T_{\text{glob.}}$ prior to 1998.

The authors were find out two opposite acting factors after comparison of the data by British climatic centres about low level of Solar activity, the change of global temperature ($T_{\text{glob.}}$) and substantial depletion of stratospheric ozone layer during the minimum of cycles 23/24. The substantially exhausted stratospheric ozone layer caused the aggrandisment of Solar energy which reached the terrestrial ground and so the low level of Solar activity was compensated. Therefore $T_{\text{glob.}}$ remained sufficiently stable.