

ДОВГОТРИВАЛІ ВАРІАЦІЇ МАГНІТНОЇ АКТИВНОСТІ СОНЦЯ

Основною закономірністю еволюції клімату Землі є циклічність глобальних змін останнього. Одне із можливих пояснень циклічності глобальних змін клімату надає астрофізична модель коливань опромінення поверхні Землі сонячною радіацією. Сучасні зміни клімату пов'язані переважно з варіаціями магнітної активності Сонця, одним з основних індексів якої є сонячні плями. Зменшення кількості сонячних плям збігається з епохами похолодання на Землі, тоді як під час максимальної кількості плям спостерігається потепління. У статті зроблено огляд космогенних реконструкцій довготривалих змін магнітної активності Сонця (великі мінімуми та великі максимуми) протягом голоцену (останні 12 000 років). Випадкова поява великих мінімумів і максимумів певною мірою може бути відтворена сучасними моделями турбулентного динамо зі стохастичним приводом.

Важливим ключем до вивчення впливу варіацій сонячної активності на клімат Землі є мінімум Маундера (наприкінці XVII ст.), під час якого спостерігалось винятково мало сонячних плям. Застосування методу аналізу рідкісних подій до цих спостережень привело дослідників до висновку, що появі сонячних плям під час мінімуму Маундера притаманний слабкий за амплітудою 22-річний цикл. Концепція безперервності магнітних циклів у цей час підтверджується також вимірюваннями космогенних радіонуклідів у природних земних архівах. Тому нині прийнято вважати, що під час мінімуму Маундера циклічна магнітна активність Сонця не припинялася, хоча амплітуда циклів була досить низькою. У моделі $\alpha\Omega$ -динамо це може бути пов'язано з тим, що магнітна індукція тороїдального поля, збудженого радіальним диференціальним обертанням у сонячній конвективній зоні, у цей час не досягала порогового значення, необхідного для спливання магнітних силових трубок на сонячну поверхню (нелінійний режим динамо). Проаналізовано можливі фізичні механізми, що описують пригнічення динамо-процесу у проміжки часу, коли не спостерігались сонячні плями.

Запропоновано сценарій пояснення північно-південної асиметрії магнітної активності під час мінімуму Маундера. Ключову роль у запропонованому сценарії відіграє особливий режим внутрішнього обертання Сонця, виявлений у результаті геліосейсмологічних експериментів.

Сучасний великий максимум активності Сонця, який почався в 1940-х рр., припинився після 23-го сонячного циклу, і активність Сонця, здається, повертається до свого нормального помірною рівня.

Ключові слова: глобальні зміни клімату Землі, цикли сонячних плям, магнітні поля Сонця, космогенні маркери сонячної активності, мінімум Маундера, сучасний високий максимум, сонячне динамо.

Вступ. Наука нині має в розпорядженні достовірні факти про те, що клімат Землі (багаторічний, порядку кількох десятиліть, режим погоди, який характеризується поточним станом температури, атмосферного тиску, вологості, атмосферних опадів тощо) раніше неодноразово зазнавав радикальних глобальних змін упродовж різних за тривалістю проміжків часу [1–3]. Найважливішим елементом клімату, що впливає на інші його характеристики, насамперед на температуру, є промениста енергія Сонця. Зміни клімату полягають у суттєвих змінах у статистичному розподілі погодних умов протягом тривалих проміжків часу: від десятиліть до мільйонів років. Зміни клімату можуть призвести до глобальних, масштабних змін у природних і соціальних системах. Причини змін клімату можуть бути різними (коливання сонячної радіації, тектоніка плит, виверження вулканів, біотичні процеси) і остаточно ще не вивчені. Разом із тим, дослідники сформували головний закон еволюції клімату, який полягає в циклічності глобальних змін останнього [4]. Одним із можливих напрямів розв'язання проблеми циклічності слугує розвиток так званих астрофізичних моделей еволюції глобального клімату, основним форсингом (чинником) яких є коливання опромінення поверхні Землі сонячною радіацією (коливання нагрівання земної поверхні енергією сонячного опромінення) [5]. Першою енергобалансовою моделлю виникнення епох типу льодовикових періодів (повторюваного глобального похолодання клімату тривалістю кілька мільйонів років) була запропонована М. Міланковичем астрономічна теорія циклічних коливань клімату (цикли Міланковича) [6]. Ключовим керуючим параметром еволюції глобального клімату в теорії Міланковича слугує фактор періодичних змін геометрії орбіти Землі в космічному просторі (зміни довготи перигелія – наслідок прецесії осі обертання, нахилу екліптики і ексцентриситету орбіти). Згідно з астрономічною теорією періодичні варіації параметрів орбіти Землі й осі її обертання можуть приводити до повторюваних змін інсоляції земної поверхні (кількості тепла Сонця, що поступає на поверхню Землі на різних її широтах) [7]. Просторовим варіаціям зазначених параметрів земної орбіти притаманні надзвичайно довготривалі (надтривалі) періоди коливань: ~ 22 тис. років, ~ 40 тис. років, ~ 100 тис. років відповідно [7].

Водночас в історії Землі відомі довготривалі, але коротші, ніж 20–100 тис. років, циклічні зміни режиму погоди і клімату. Як відомо, упродовж останніх 12 тис. років сучасної геологічної епохи Землі (так званого голоцену) спостерігалось п'ять періодів глобальних змін температури Землі [8]. Зокрема, у науковій літературі фігурує найближчий до нас Малий льодовиковий період (МЛП) глобального відносного похолодання впродовж XIV–XIX ст. (найхолодніший період за середньорічними температурами за останні 2000 років) [9].

Нині науковці різних спеціальностей намагаються розв'язати проблему майбутніх змін клімату нашої планети, зокрема і нинішнього глобального потепління (так званого антропоцену [10]). Остання епоха розпочалась близько 200 років назад, змінивши МЛП. Сучасне потепління вважається природним виходом із МЛП, яке ускладнене техногенним підсиленням парникового ефекту й іншими факторами, спричиненими діяльністю людства [4, 10–14]. Утім, які б не були антропогенні зміни клімату, вони накладаються на його природні циклічні варіації, масштаб яких все ще сильно перевершує впливи, зумовлені зміною вигляду поверхні Землі й емісією парникових газів за останні 200 років регулярних інструментальних спостережень [4, 12]. Надтривалі цикли Міланковича не у змозі пояснити нинішні швидкі темпи глобального потепління. Тому виникає потреба пошуку довготривалих (але за часом коротших за мільйони років) періодичних природних форсингів, а саме: порядку від кількох сотень до тисяч років, що викликали циклічні зміни клімату впродовж голоцену.

Як відомо, визначальні фактори, що формують клімат (параметри орбіти Землі, рух материків, розподіл суходолу й океанів) були незмінними для сучасної епохи. Тому *сучасні зміни клімату* прийнято пов'язувати, головним чином, із впливом *часових варіацій інтенсивності сонячної радіації*, зумовлених (на відміну від теорії Міланковича)

змiнами фізичних умов на самому Сонці, на процеси формування загальної циркуляції атмосфери Землі [15–19]. Вивчаючи варіації інтенсивності сонячної радіації, застосовують термін **сонячна активність** (СА), який характеризує зміни в часі сонячного випромінювання, його спектральний розподіл, а також супутній комплекс фізичних явищ і процесів, пов'язаних з утворенням, перебудовою та розпадом у сонячній атмосфері сильних магнітних полів. Зовнішніми спостереженими проявами СА служать сонячні плями, факели, флокuli, протуберанці тощо. Найпростішим й історично першим доступним для спостережень проявом магнітної активності Сонця були **сонячні плями**, носії потужного глобального магнітного поля. Для опису змін СА, пов'язаної з плямами, Рудольф Вольф із Берна 1848 р. запровадив спеціальний індекс, який враховує як кількість плям, так і кількість груп плям, що спостерігалися в указаний день на видимому диску Сонця (зауважимо, що дослідникам на той час не була ще відома магнітна природа сонячних плям). Уведений індекс отримав назву відносної кількості сонячних плям (нині його частіше називають **числом Вольфа**). Загальноприйнятим кількісним описом інтенсивності СА служать усереднені (за місяць, квартал або рік) щоденні значення чисел Вольфа. На основі архівних даних Вольф відновив середньомісячні значення індексу плям з 1749 р. Йому вдалося встановити, що в певні роки кількість плям періодично досягає максимальних і мінімальних значень. Це дозволило вперше визначити протяжність середнього періоду змін кількості плям – близько 11,1 року. Так з'явився **основний закон СА**, згідно з яким зміни частоти появи плям (інтенсивності плямоутворення) відбуваються циклічно із середнім періодом близько 11 років [20]. Характерною особливістю відкритої періодичності було те, що інтервали часу між роками максимальних і мінімальних значень чисел Вольфа суттєво відрізнялися. Тому саму назву "11-річний період" слід вважати умовною. З огляду на це, нині дослідники вживають термін 11-річний цикл (тобто прихований період зі збуренням). Циклічність представляє собою коливання з періодами, амплітудами і фазами, які випадково змінюються навколо своїх середніх значень. Середню тривалість циклу коливань чисел Вольфа для стислості прийнято називати **сонячним циклом**. Моменти часу, коли числа Вольфа досягають найбільших і найменших величин називають епохами максимуму і мінімуму циклу.

Вольф розрахував значення введеного ним індексу для дев'яти циклів, починаючи з 1749 р. і закінчуючи 1848 р., і ввів відповідну нумерацію циклів (нині її називають Цюрихською нумерацією). Перший розрахований таким способом цикл (з епохою максимуму в 1750 р.) отримав **нульовий номер**, останній (з епохою максимуму в 1848 р.) – номер 9. Для часу раніше 1749 р. циклічність СА встановлено за середньорічними числами Вольфа до 1700 р. Нумерація таких циклів має знак мінус. Епохи максимумів і мінімумів циклів за неповними даними спостережень Сонця прослідковано назад аж до часу Галілея (1611 р.). Відповідно до Цюрихської нумерації поточний цикл СА, що розпочався 2020 р., має номер 25.

Після відкриття магнітної природи плям встановлено, що просторово-часова картина магнітної полярності груп плям відновлюється в середньому через 22 роки [21], визначаючи тим самим **магнітний цикл Сонця**, який отримав назву циклу Хейла.

Водночас, в останні роки набуває вагомості вивчення так званих великих мінімумів і великих максимумів магнітної активності Сонця впродовж голоцену. Зокрема, це пов'язано з тим, що прикінцева найхолодніша фаза МЛП збіглася за часом із так званим мінімумом Маундера магнітної активності Сонця (див. далі). Актуальність дослідження великих мінімумів і максимумів зумовлена **загальноприйнятою нині концепцією: необхідний для змін клімату часовий масштаб варіацій СА повинен становити сотні і більше років, а не декади років**, що безпосередньо пов'язані з окремими 11- або 22-річними циклами.

У цій роботі виконано огляд досліджень довготривалих варіацій магнітної активності Сонця, проведено аналіз можливих фізичних механізмів цих варіацій на основі моделі $\alpha\Omega$ -динамо. Запропоновано пояснення північно-південної асиметрії магнітної активності Сонця на основі розробленого автором механізму збудження квадрупольної динамо-гармоніки циклічного глобального магнітного поля в сонячній конвективній зоні (СКЗ), ключову роль в якому відіграє особливий режим внутрішнього обертання Сонця, виявлений у результаті геліосейсмологічних експериментів.

Великі мінімуми. Розпочнемо з розгляду **великих мінімумів** – періодів значного зниження сонячної магнітної активності. Найвідомішим є мінімум наприкінці XVII ст., коли під час спостережень було зареєстровано виятково мало сонячних плям [22, 23]. Уперше, ще в кінці позаминулого століття (1887), на це звернув увагу Ф. Шпюрер [24], який опрацював дані спостережень Р. Вольфа [25]. Роботу Ф. Шпюрера невдовзі (1890, 1894) узагальнив Е. Маундер [26, 27], який водночас (1894) з А. М. Клерком [28] зауважив, що ця нестача сонячних плям, очевидно, збігається в часі з відсутністю земних полярних снів. Нині ми знаємо, що полярні сніва викликаються високоенергетичними зарядженими частинками, що випромінюються Сонцем під час вивільнення магнітної енергії, яка часто супроводжує сонячні плями.

Тривалий час явна аномалія сонячної діяльності не викликала особливої зацікавленості дослідників. І тільки майже через століття інтерес до проблеми відродив Дж. Едді [29, 30], який опублікував низку додаткових свідчень різкого послаблення СА в період 1645–1715 рр., назвавши його **мінімумом Маундера** (рис.1).



Рис. 1. Варіації активності Сонця (середньорічні числа Вольфа) упродовж 1600–2000 рр. за спостереженими даними сонячних плям. Різне послаблення сонячної активності в періоди 1645–1715 і 1795–1823 рр. прийнято називати **мінімумом Маундера** і **мінімумом Дальтона**. Зростання активності в 1940–2000 рр. – **сучасний великий максимум** (із джерела [23])

Існує певна невизначеність у визначенні його тривалості. "Формальна" тривалість циклу становить проміжок часу 1645–1715 рр. [29]. Однак глибоку фазу СА з відсутністю *видимої циклічної* активності плям часто вважають 1645–1700 рр. тоді як проміжок часу з низьким, але виразно окресленим циклом (1700–1712 рр.) віднесено до фази відновлення або переходу [31]. Дуже важливою особливістю СА під час мінімуму Маундера була її сильна асиметрія північ-південь, коли сонячні плями спостерігалися переважно лише в південній півкулі Сонця [32, 33].

Зауважимо, що саме Дж. Едді [29, 30] зазначав, що затишся сонячної магнітної активності під час мінімуму Маундера збіглося за часом з епохою холоднішої погоди (Малого льодовикового періоду), і вважав, що відсутність магнітної активності супроводжувалася падінням загального випромінювання.

Сучасні супутникові та наземні спостереження показали, що електромагнітне випромінювання Сонця змінюється залежно від сонячного циклу. Сонце виділяє найбільше радіації на максимумі сонячних плям, коли, як це не парадоксально, воно найбільше вкрите темними сонячними плямами. Це пояснюється тим, що кількість компенсуючих менших, але набагато чисельніших і яскравіших областей, які називають факелами, змінюється протягом сонячного циклу і також досягає піку поблизу максимуму плям. Магнітні поля, пов'язані з плямами, пригнічують конвективний висхідний потік енергії так, що плями є темними. І хоча більша частина заблокованого висхідного потоку енергії повертається в зону сонячної конвекції, деякі елементи з'являються в областях, які оточують плями, що призводить до появи спостережених яскравих факелів. Вони менш помітні, ніж сонячні плями, оскільки мають менші розміри, проте їхня температура вища. Тому їхній енергетичний внесок у загальний потік сонячної радіації приводить до зростання останнього під час максимуму плям (і відповідно до зменшення під час мінімуму). Таким чином стало зрозумілим зменшення радіації від Сонця під час мінімуму Маундера і пов'язане із цим похолодання на Землі. З огляду на вказане аналіз мінімуму Маундера є важливим ключем для вивчення впливу варіацій сонячної активності на земний клімат [22, 34, 35].

Мінімум Маундера був на диво добре покритим у часі (більше 95 % днів) прямими спостереженнями сонячних плям. З іншого боку, сонячні плями в той час з'являлися рідко (протягом ~ 2 % днів) і, здається, спорадично, без вказівки на 11-річний цикл. Це робить майже неможливим застосування стандартних методів аналізу часових рядів до даних спостережень сонячних плям під час мінімуму Маундера. Тому слід використовувати спеціальні методи дослідження часового розподілу "чистих днів" (коли на Сонці не було плям) і "днів із плямами". Із використанням методів аналізу рідкісних подій до цих спостережень, у роботі [36] описано такий загальний сценарій часової поведінки СА під час мінімуму Маундера. Упродовж глибокого мінімуму (1645–1700 рр.) появи сонячних плям притаманний переважно слабкий за амплітудою 22-річний цикл, тоді як на пізній фазі мінімуму Маундера став виразно помітним відновлювальний 11-річний цикл.

Висновок про те, що недостача сонячних плям у той час *не свідчить неодмінно про зупинку циклічної магнітної* діяльності, засвідчено результатами теоретичних досліджень у роботах [32, 33, 36, 37], див. далі.

Крім того, концепція безперервності магнітних циклів у цей час підтверджується також вимірюваннями космогенних радіоізотопних маркерів (англ. *proxies*) у природних земних архівах (радіонуклідів, походження яких пов'язано з проникненням космічних променів в атмосферу Землі). Більшість частинок галактичних космічних променів (ГКП), які досягають Землі, утворюється за межами Сонячної системи під час вибухів наднових зірок. Як відомо, геліосфера (просторова область із діаметром приблизно 200–300 астрономічних одиниць) в основному контролюється сонячним магнітним полем. Два магнітні щити, глобальне магнітне поле Сонця і геомагнітне поле модулюють потік космічних променів, що наближаються до Землі. Коливання в часі обох магнітних полів призводять до змін космічного випромінювання на Землі. Чим слабші ці поля, тим вища інтенсивність космічних променів на Землі. Основними маркерами, що свідчать про інтенсивність галактичних космічних променів, є космогенні радіонукліди берилій ^{10}Be і вуглець ^{14}C . Обидва радіонукліди утворюються дуже подібним чином в атмосфері Землі в результаті ядерних реакцій частинок галактичних космічних променів з азотом і киснем атмосфери [35, 38–41]. Швидкість виробництва радіонуклідів безпосередньо пов'язана з інтенсивністю потоку ГКП. Після утворення ^{10}Be швидко окислюється і приєднується до аерозолів, а потім у результаті осадів останні накопичуються в полярній кризі і донних відкладеннях морів і океанів. Ізотоп ^{14}C окислюється до CO_2 і вступає у глобальний цикл вуглецю, обмінюючись між атмосферою, біосферою і океаном. Тому виміряні величини концентрацій радіонуклідів дослідники використовують як показники СА.

Джерелом енергії СА є ядро Сонця, де в результаті реакцій термоядерного синтезу утворюються нові хімічні елементи з виділенням енергії у формі γ -квантів і частинок нейтрино. Далі ця енергія переноситься до поверхні завдяки випромінюванню і конвекції. Водночас, *роль полігону, де зароджуються основні процеси, відповідальні за циклічні прояви СА, відіграє конвективна зона Сонця*. Саме тут у результаті механізму турбулентного динамо частина кінетичної енергії гідродинамічних конвективних рухів плазми в ході сонячного циклу переходить в енергію магнітного поля (детальніше див. далі). Згенероване в сонячних глибинах глобальне магнітне поле, виходячи, завдяки його магнітній плавучості, на поверхню, змінює стан атмосфери Сонця, зумовлює нерегулярну частину випромінювання і служить джерелом потужних нестационарних явищ у зовнішніх атмосферних шарах (фотосфері, хромосфері і короні). Сонячна корона не може перебувати у стані гідростатичної рівноваги і повинна постійно розширюватися, породжуючи сонячний вітер (гідродинамічну гарячу корону). Загальний рух плазми від Сонця назовні намагається "виштовхнути" ГКП із Сонячної системи назад у міжзоряний простір, звідки вони прийшли. У результаті спостерігається зворотна кореляція між інтенсивністю ГКП і потужністю сонячного корпускулярного випромінювання. Тобто саме діяльність Сонця створює в певні періоди часу несприятливі умови для приходу до Землі потоку ГКП, який у протилежному випадку залишався б постійним. Тому вимірювання інтенсивності ГКП може надати низку вказівок про зміни конфігурації магнітних полів у міжпланетному просторі, пов'язаних із магнітною активністю Сонця.

Згідно із сучасними уявленнями ГКП високої енергії, що породжують радіонукліди ^{10}Be і ^{14}C в земній атмосфері, за відсутності або пригніченої магнітної діяльності Сонця проникають глибоко в навколосемний простір більш інтенсивними потоками, оскільки в цей час вони менше екрануються слабким сонячним глобальним магнітним полем і менше відштовхуються сонячним вітром. Тому вимірювання варіацій радіонуклідів, які зберігаються в земних резервуарах (ізоотопу ^{10}Be – у полярних ядрах льоду з Гренландії та Антарктиди, а ізоотопу ^{14}C – у річних кільцях

приростів стовбурів дерев: у целюлозі кілець дерев точно відбито поточний атмосферний стан утримання радіовуглецю за період їхнього зростання), надають унікальну можливість реконструювати історію космічної радіації (ГКП) та сонячної магнітної активності протягом багатьох тисячоліть [41]. Іншими словами, реконструкція варіацій концентрації ^{10}Be і ^{14}C опосередковано відображає варіації захисного геліогеомагнітного щита, який регулює проникнення ГКП в земну атмосферу. Радіоізотопні записи варіацій вмісту ^{10}Be і ^{14}C в атмосфері Землі відтворюють чітку і неперервну циклічну магнітну активність Сонця впродовж мінімуму Маундера [42–44] (на рис. 2 показано зміни із часом концентрації радіонукліду ^{10}Be). Про це свідчить також реконструкція СА на основі архівних даних спостереження полярних сьайв [45, 46]. Тому нині вважають загальноприйнятим, що сонячні магнітні цикли неперервно функціонували впродовж усього мінімуму Маундера, проте їхня амплітуда була досить низькою [47–49].



Рис. 2. Довготривалі варіації магнітної активності Сонця впродовж 1420–2000 рр. на основі даних спостережень за сонячними плямами й ізотопами берилію. Нижня крива – число Вольфа (відносна кількість сонячних плям), яке характеризує інтенсивність плямоутворення. Верхня крива – концентрація радіонукліду ^{10}Be (відносні одиниці) в полярних кернах льоду, яка служить маркером інтенсивності глобального магнітного поля Сонця (з джерела [41])

Мінімум Маундера служить єдиним представником великих мінімумів із доступними прямими спостереженнями сонячних плям. Його попередник, мінімум Шпюрера, з 1450 по 1550 рр. був охоплений точними дворічними вимірюваннями радіоізоотопів ^{14}C у кільцях дерев і ^{10}Be – у полярних кернах льоду [50]. У результаті аналізу цих даних виявлено подібну закономірність (рис. 2) з ледве помітним основним 22-річним циклом і чітким відновлювальним запізненим 11-річним циклом [50, 51], що підтверджує ідею про те, що наведений вище загальний сценарій може бути типовим для великого мінімуму.

Використовуючи дані вимірювання ^{14}C у кільцях дерев, автори роботи [52] здійснили кількісну реконструкцію сонячної магнітної активності за останні 11 000 років, на основі якої було складено список із 27 великих мінімумів. Середня тривалість цих мінімумів становить 70 років, але розподіл за протяжністю в часі є бімодальним. Як правило, мінімуми мають або коротку (30–90 років) тривалість, подібну до мінімуму Маундера, або ж досить довгу (> 100 років), подібну до мінімуму Шпюрера. Сумарна тривалість великих мінімумів становить близько 1900 років, вказуючи на те, що Сонце на своїй нинішній еволюційній стадії проводить ~ 17 % свого часу у спокійному стані, який відповідає великим мінімумам.

Більшість дослідників вважають, що поява великих мінімумів є суто випадковим процесом, для якого ймовірність виникнення великого мінімуму є сталою у будь-який момент часу. У роботі [52] І. Уоскін та інші провели статистичний аналіз часу виникнення великих мінімумів і дійшли висновку, що їхня поява не є результатом довготривалих циклічних змін, а визначається стохастичними процесами. Це означає, що подія може бути випадковою, але її ймовірність неоднорідна за часом і залежить від попередньої історії. Таку поведінку можна інтерпретувати як самоорганізовані процеси, пов'язані з накопиченням і вивільненням енергії. Це накладає серйозні обмеження на спостереження у побудові теоретичних моделей, що мають на меті пояснити довгострокову еволюцію СА. Спостережувана ознака може бути артефактом малої статистики (усього 27 великих мінімумів), що робить цей результат лише показовим, який вимагає детальнішого дослідження в майбутньому [23, 53, 54].

Модель турбулентного динамо сонячного циклу. Питання про виникнення великих мінімумів магнітної активності Сонця важливе для розуміння ролі механізмів динамо у поясненні спостереженої магнітної циклічності. Згідно з сучасними уявленнями [55] аксіально-симетричне глобальне магнітне поле Сонця **B** складається з двох компонент. Перша компонента – приховане від спостерігачів глибинне сильне тороїдальне (азимутальне) поле **B_t** (величиною $\geq 10^3$ Гс), фрагменти якого при спливанні проявляються на фотосферному рівні у вигляді локальних біполярних магнітних дуг, визначаючи тим самим інтенсивність плямоутворення. Друга компонента – слабе полюдальне (меридіональне) поле **B_r** (з максимальною величиною 1–2 Гс), яке має реліктове походження. Загальноприйнято вважати, що стаціонарне поле **B_r** зосереджене в основному біля ядра і в променистій зоні Сонця. Силкові лінії цього поля, виходячи на сонячну поверхню, формують фонові магнітні поля, зокрема, полярні магнітні поля. Спостереження свідчать [55], що обидві компоненти поверхневого магнетизму осцилюють у часі і просторі із середнім періодом близько 11 років у протифазі. Тому очевидно, що ці компоненти пов'язані між собою (регенерують одна одну), і збуджуються, напевне, одним процесом, який носить коливальний циклічний характер. Найбільшого поширення серед дослідників глобального магнетизму Сонця набули переконання, що спусковим механізмом магнітного циклу служить процес гідромагнітного (турбулентного) динамо [55].

Роль "динамо-машини" на Сонці відіграє його конвективна зона, де в результаті взаємодії обертання (з кутовою швидкістю Ω) і турбулізованої конвекції (яка характеризується полем швидкостей **u**) створюється специфічна комбінація

диференційного обертання і спіральної турбулентної конвекції [55, 56]. Під впливом обертання в умовах сильного вертикального градієнта густини плазми турбулізовані конвективні рухи в підфотосферних шарах набувають анізотропного спірального характеру, тоді як унаслідок анізотропії конвекції обертання стає диференційним. Зауважимо, що спіральність є абсолютно природним ефектом, який завжди з необхідністю виникає під впливом коріолісової сили, стратифікації густини речовини й неоднорідності поля швидкостей у всіх геофізичних і астрофізичних турбулізованих системах, що обертаються і розміщені в полі гравітації, зокрема, у конвективних зонах небесних тіл.

Диференційне обертання $\Omega(r, \theta)$ в умовах вимороженості магнітних полів у високоелектропровідну сонячну плазму розтягує силові лінії вихідного полоїдального поля \mathbf{B}_P і тим самим генерує тороїдальну компоненту поля \mathbf{B}_T (Ω -ефект). Омега-ефект описується першим членом правої частини рівняння індукції:

$$\partial \mathbf{B}_T / \partial t = r \sin \theta (\mathbf{B}_P \nabla) \Omega \mathbf{i}_\phi + \nu_T \Delta \mathbf{B}_T, \quad (1)$$

де r – відстань від центра Сонця, $\nabla \equiv \partial / \partial r$ – радіальний градієнт, $\nu_T \approx (1/3)ul \approx (1/3)u^2\tau$ – коефіцієнт турбулентної в'язкості, яка викликає дисипацію магнітного поля; u, l і τ – відповідно ефективна швидкість, характерний масштаб і час кореляції турбулентних пульсацій, \mathbf{i}_ϕ – азимутальний одиничний вектор, θ – полярний кут (коширота) у сферичній системі координат.

Разом із тим усереднена спіральна турбулентність регенерує із цього поля нову полоїдальну компоненту \mathbf{B}_P (α -ефект) антипаралельного спрямування щодо його вихідної орієнтації, замикаючи тим самим сонячний динамо-цикл. Магнітні силові лінії спливаючих фрагментів тороїдального поля в умовах вимороженості під впливом спіральної конвекції витягуються в магнітні петлі з ненульовою складовою в меридіональній площині. Зливаючись за рахунок дифузії, магнітні петлі відновлюють полоїдальне поле протилежної полярності. Регенерація полоїдального поля (α -ефект) описується першим членом правої частини рівняння

$$\partial \mathbf{A} / \partial t = \alpha \mathbf{B}_T + \nu_T \Delta \mathbf{A}, \quad (2)$$

де $\alpha = -(\tau/3) \langle \mathbf{u} \cdot \text{rot} \mathbf{u} \rangle$ – параметр спіральності турбулентних рухів, $\mathbf{A} = A \mathbf{i}_\phi$ – тороїдальний векторний потенціал ($\mathbf{B}_P = \text{rot} \mathbf{A}$), кутові дужки (...) означають усереднення за масштабами і часовими проміжками, які значно перевищують масштаб і час кореляції турбулентних рухів.

Перші члени у правих частинах рівнянь (1) і (2) відповідають за збудження магнітних полів диференційним обертанням і α -ефектом, а другі – за турбулентне загасання полів. Турбулентна дифузія відіграє кілька важливих функцій: вона об'єднує маломасштабні магнітні петлі в одне згладжене глобальне магнітне поле, сприяє поширенню глобального поля з області його генерації по всій сонячній конвективній зоні і, нарешті, найважливішим є те, що вона не допускає необмеженого зростання тороїдальної і полоїдальної компонент магнітного поля. Механічна енергія диференційного обертання і турбулентної конвекції служить джерелом постійного підживлення магнетизму Сонця реліктового походження в сучасну епоху, а відхилення від симетрії турбулентного поля спіральних швидкостей не допускає загасання динамо-процесу. У випадку, коли генерація і турбулентна дифузія магнітних потоків урівноважені, рівняння (1) і (2) описують циклічний механізм самопідтримання тороїдальної і полоїдальної компонент глобального магнітного поля, який отримав в науковій літературі назву $\alpha\Omega$ -динамо [55, 56].

Розглянемо детальніше питання про природу мінімуму Маундера, охопленого прямими спостереженнями плям. Як зазначено вище, нині вважають загальноприйнятим, що впродовж мінімуму Маундера циклічна магнітна активність Сонця не зупинялась, хоча амплітуда циклів була досить низкою. У межах моделі $\alpha\Omega$ -динамо це може бути пов'язано з тим, що величина магнітної індукції в тороїдальних силових трубках у цей час не досягала певного порогового значення, необхідного для виникнення плавучої нестійкості і подальшого виживання трубок у процесі їхнього підйому до поверхні (нелінійний режим динамо) [47–49]. Наявність довготривалого пригнічення динамо-процесу часто пояснюється з точки зору α -ефекту, який може містити флуктуаційну частину, пов'язану з хаотичними турбулентними рухами [57, 58], що призводить до нерегулярних великих мінімумів [59]. Крім того, ефективність магнітного спливання трубок за певних умов може пригнічуватися ефектами "магнітної антиплавучості" (процесами макроскопічного турбулентного діамagnetизму і магнітної адвекції, пов'язаної з радіальним градієнтом густини плазми в турбулізованій СКЗ) [60–62].

Спостережена сильна північно-південна асиметрія поверхневого магнетизму, коли майже всі сонячні плями були розташовані в південній півкулі Сонця [32, 33], нашоєхує на думку, що вона пов'язана з асиметрією структури глибинного магнітного поля Сонця. Тому необхідно шукати шляхи виявлення цієї асиметрії. У межах моделі $\alpha\Omega$ -динамо магнітну асиметрію можна пояснити із допущенням незначних варіацій параметрів СКЗ, унаслідок чого фізичні умови в цей час були сприятливими для генерації, насамперед квадрупольної гармоніки полоїдального поля [50, 61, 63–67].

Зокрема, нами для пояснення північно-південної поверхневої магнітної асиметрії запропоновано сценарій, ключову роль в якому відіграє особливий характер внутрішнього обертання Сонця, виявлений у результаті геліосейсмологічних експериментів [50, 61, 63–67]. Згідно з даними геліосейсмології [68] СКЗ природно поділена на полярні і приекваторіальний домени з протилежними знаками параметра радіального градієнта кутової швидкості $\partial\Omega/\partial r$. Крім того, радіальний градієнт кутової швидкості охоплює шари стабільної променистої зони глибше СКЗ [69]. З огляду на це, різні режими диференційного обертання, очевидно, повинні певним чином впливати на процеси магнітного збудження у зазначених ділянках Сонця.

Розглянемо спочатку детальніше питання про збудження магнетизму в СКЗ. У моделі $\alpha\Omega$ -динамо порогові збудження дипольної і квадрупольної гармонік є досить близькими і відрізняються тільки знаком критичного динамо-числа [70]:

$$K\lambda = [(\alpha\partial\Omega/\partial r) (\lambda^3/\nu_T^2)]^{1/3}, \quad (3)$$

тут K – характерне число динамо-хвилі, λ – меридіональна протяжність ділянки генерації. Зважаючи на це, конфігурація магнітного поля в СКЗ суттєво залежить від знаків параметра турбулентної спіральності α і радіального градієнта кутової швидкості $\partial\Omega/\partial r$. Згідно з нашими розрахунками в нижній частині СКЗ, де відбувається збудження глобального поля, параметр спіральності набуває *негативного знаку* ($\alpha < 0$) [61, 63–65, 71].

Водночас, за даними геліосейсмологічних експериментів [68] СКЗ поділена, як було зауважено, на домени з протилежними знаками параметра $\partial\Omega/\partial r$ (рис. 3).

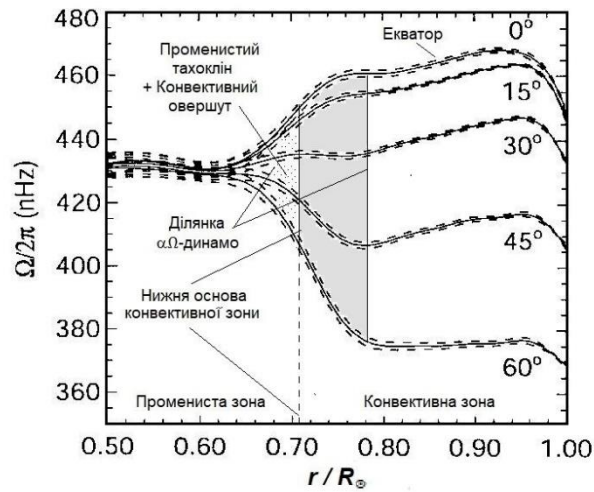


Рис. 3. Розподіл за відносним сонячним радіусом r/R_{\odot} усереднених за часом (1995–1999 рр.) швидкостей внутрішнього обертання Сонця (частот обертання $\Omega/2\pi$, виміряних в наноГерцах) для різних геліоширот. Під нижньою основою СКЗ ($r \approx 0,71 R$) у відносно тонкому шарі, який називається *променистим тахокліном*, відбувається монотонний перехід від диференційного обертання СКЗ до майже жорсткого (за широтою) обертання променистої зони. Усередині тахокліну (ближче до нижньої основи СКЗ) знаходиться ще тонший перехідний шар – *конвективний овершут*, в якому інтенсивність турбулентних конвективних пульсацій спадає до нуля. Тахоклін і овершут разом із нижніми шарами СКЗ вважають найсприятливішим місцем для ефективної роботи механізму α -динамо

Видно, що в приекваторіальному домені ($\theta^* = 0^\circ \div 40^\circ$, θ^* – геліоширота) параметр радіального градієнта кутової швидкості $\partial\Omega/\partial r$ має від'ємний знак, тоді як у двох високоширотних (полярних) доменах ($\theta^* = 50^\circ \div 90^\circ$) параметр $\partial\Omega/\partial r$ характеризується додатним знаком. З огляду на це ми розрахували динамо-числа окремо для приекваторіального і полярних доменів генерації [61, 63–65]. Фізичні характеристики СКЗ у розрахунках взято із моделі Стікса [72]. У приекваторіальному домені (де $\partial\Omega/\partial r > 0$, $\alpha < 0$) розрахована величина динамо-числа становить $K_1\lambda_1 \approx -7$, що близько до критичного значення $K\lambda = -7,43$, необхідного для генерації диполя [70]. Водночас у полярних доменах (де $\partial\Omega/\partial r < 0$, $\alpha < 0$) розрахований параметр $K_2\lambda_2 \approx +8$ виявився близьким до критичного динамо-числа $K\lambda = +7,43$, необхідного для збудження квадруполя. З урахуванням цього приекваторіальний домен служить джерелом збудження першого типу змішаної парності (симетричності) динамо-гармонік, в якому домінуючу роль відіграє антисиметричний відносно екватора диполь. А у спектрі магнітних гармонік, що збуджуються у полярних доменах, переважає квадруполь – другий тип змішаної парності динамо-гармонік. На рис. 4 зображено структуру полюїдального магнітного поля, побудовану на основі отриманих нами розрахунків.

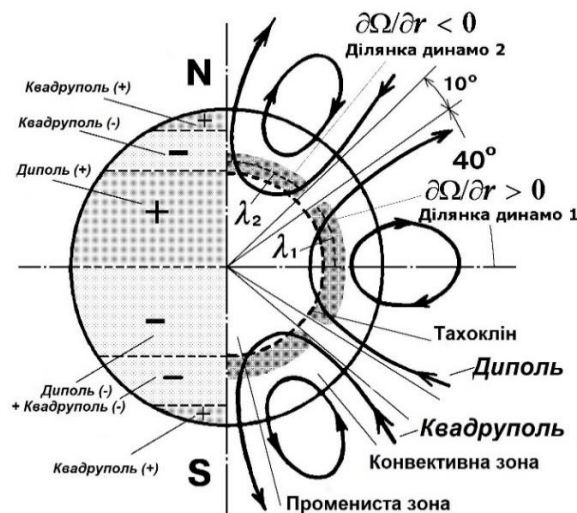


Рис. 4. Структура глобального полюїдального поля (дипольна і квадрупольна моди), збуджуваного механізмом α -динамо в СКЗ в околі ділянки тахокліну поблизу епохи максимуму активності 23-го циклу. *Праві півсфера*: магнітні силові лінії диполя ($\theta^* < 40^\circ$, $\partial\Omega/\partial r > 0$, ділянка динамо 1) і квадруполя ($\theta^* > 50^\circ$, $\partial\Omega/\partial r < 0$, ділянка динамо 2), λ_1, λ_2 – меридіональна протяжність ділянок генерації. *Ліва півсфера*: широтні зони з додатною (+) і від'ємною (-) магнітною полярністю поверхнього (фонового) поля, які відповідають глибинним магнітним структурам. Чітко видно північно-південну асиметрію розподілу поверхнього (фонового) магнітного поля (ліва півсфера), зумовленого виходом на сонячну поверхню силових ліній глибинного полюїдального поля: у північній півкулі проявляється три широтні зони з переможеними знаками магнітної полярності, тоді як у південній – тільки дві зони з протилежними знаками полярності, оскільки тут на середніх геліоширотах збігаються напрямки силових ліній диполя і квадруполя. Диференційне обертання, діючи на зазначені гармоніки полюїдального поля, збуджує відповідно дипольну і квадрупольну гармоніки тороїдального поля

Таким чином, якщо врахувати виявлений геліосейсмологією природний поділ СКЗ на домени з різними режимами внутрішнього обертання [68], то $\alpha\Omega$ -динамо у глибинних шарах приводить до збудження двох типів змішаної магнітної парності динамо-гармонік. Домінуючі гармоніки кожного типу відіграють свою певну роль у сценарії магнітного циклу. Упродовж більшого часу зазвичай циклами править диполь, який несе відповідальність за північно-південне співвідношення знаків магнітних полюсів глобального поля, що описується законом Хейла [21]. Проте при наближенні до моменту зміни знаку (реверсації) полярного магнетизму створюються сприятливі умови для збудження квадруполя на фоні загасаючого диполя.

Диференційне обертання, діючи на зазначені гармоніки полоїдального поля, буде збуджувати відповідно дві гармоніки (дипольну і квадрупольну) тороїдального поля. Наступне спливання полів зазначених гармонік на сонячну поверхню породжуватиме біполярні групи плям із відмінними співвідношеннями магнітних знаків головної і хвостової плям у групі. Дипольна гармоніка несе відповідальність за розподіл знаків біполярних груп відповідно до закону полярності Хейла [21, 73]. Разом із тим, квадрупольна гармоніка породжує невелику кількість біполярних груп плям із "неправильною полярністю" плям, які прийнято називати "порушниками закону Хейла" [74].

Перейдемо до розгляду процесу магнітного збудження у глибинних шарах під СКЗ. Згідно з даними геліосейсмологічних вимірювань радіальний градієнт кутової швидкості $\partial\Omega/\partial r$ простягається, як уже зазначено, у радіальному напрямку глибше СКЗ і охоплює шари стабільної променистої зони. На рис. 5 зображено радіальні профілі частоти внутрішнього обертання для трьох геліоширот, отримані в результаті інверсій даних геліосейсмологічних спостережень [69].

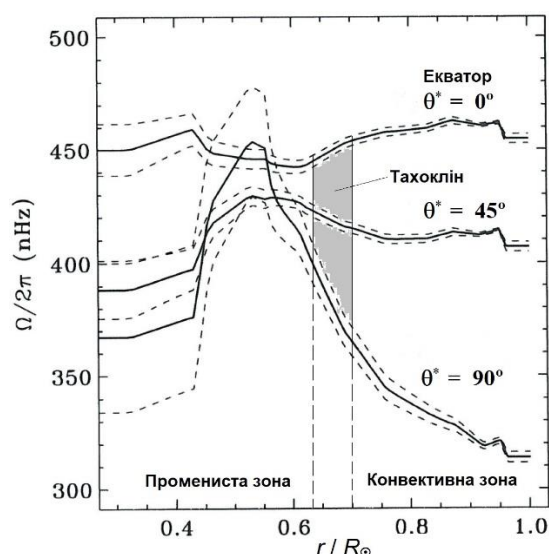


Рис. 5. Радіальні профілі швидкості внутрішнього обертання Сонця для трьох геліоширот θ^* : на осі ординат $\Omega/2\pi$ – частота обертання в наноГерцах, на осі абсцис r/R_\odot – відносний геліоцентричний радіус (з джерела [69])

Видно, що характерне для сонячної поверхні ($\theta^* = 90^\circ$) широтне диференційне обертання $\Omega(\theta^*)$ зберігається в повному обсязі СКЗ в діапазоні глибин $(0,7 \div 1,0) r/R_\odot$. Усередині СКЗ на кожній фіксованій геліошироті величина кутової швидкості обертання суттєво змінюється вздовж радіуса r . І надзвичайно важливо, що помітна радіальна неоднорідність кутової швидкості $\partial\Omega/\partial r$ зберігається нижче тахокліну, проникаючи у верхню частину стабільної променистої зони. Ми вважаємо, що радіальний градієнт кутової швидкості $\partial\Omega/\partial r$ променистої зони діє на первинне полоїдальне поле і тим самим збуджує тороїдальне поле сталого в часі спрямування (глибинний Ω -ефект променистої зони). Мірою його наростання воно внаслідок магнітної плавучості буде виноситися із зони генерації вгору. Із часом глибинне тороїдальне поле поступово проникатиме у розміщені вище шари СКЗ, де працює механізм $\alpha\Omega$ -динамо. З огляду на це, сумарне тороїдальне поле в СКЗ буде складатися з двох компонент: змінної і стаціонарної. Перша магнітна компонента збуджується процесом динамо і тому вона циклічно змінює свій напрямок (полярність). Водночас друга компонента сталого спрямування не може спричинити змін полярності, однак вона може впливати певним чином на просторовий розподіл поверхневого магнетизму. Зокрема, приєднання стаціонарного тороїдального поля, збудженого у променистій зоні, до квадрупольної динамо-гармоніки тороїдального поля СКЗ може приводити до переваги величини сумарного тороїдального поля в одній із півкуль Сонця. Останнє при спливанні на сонячну поверхню, у свою чергу, може сприяти несиметричній (за геліоширотою) інтенсивності процесу плямоутворення. Таким чином, неперервне "підживлення" динамо-процесу в СКЗ за рахунок спливаючого знизу з променистої зони додаткового тороїдального потоку може приводити до поверхневої північно-південної асиметрії розподілу сонячних плям, яка була характерною для мінімуму Маундера.

Дослідженнями останнього десятиліття продемонстровано, що сучасні моделі динамо можуть відтворювати більшість спостережуваних особливостей сонячного циклу за спеціальних вихідних передумов [75]. Можна, скажімо, припустити, що відсутність сонячних плям у цей час переважно пов'язана зі змінами конфігурації поля і його широтним і радіальним перерозподілом, аніж зі зменшенням самої по собі амплітуди магнітного поля. У роботі [76] на основі опрацювання даних спостережень зміщення плям по сонячному диску встановлено, що за 20 років до початку мінімуму Маундера широтне диференційне обертання було таким самим, як і в сучасну епоху. Разом із тим, пізніше (на початковій фазі мінімуму) екваторіальна швидкість стала на 3–5 % вищою, а широтний градієнт кутової швидкості зріс утричі. Якщо припустити, що ці зміни супроводжувалися зменшенням радіального градієнта кутової

швидкості внаслідок перерозподілу кутового моменту, то величина магнітної індукції тороїдального поля, збудженого цим радіальним диференціальним обертанням, могла не досягти порогового значення, необхідного в моделях динамо для підйому магнітних силових трубок на сонячну поверхню.

Ще одна можливість пояснення мінімуму Маундера ґрунтується на уявленнях про перемежовані процеси [77]. У контексті моделей сонячного циклу термін "*перемежованість*" (англ. "*intermittency*") означає існування тривалих спокійних епох сильно пригніченої активності, які хаотично перемежовані з періодами "нормальної" циклічної активності [50]. Зокрема показано, що в моделі динамо Лейтона – Бєбкока меридіональна циркуляція може задавати часовий темп сонячного циклу [78, 79], а також підтримувати фазу стійкої циклічності в перемежовані епохи пригніченої (низької) активності [80].

Варто звернути увагу на спробу спеціально (*ad hoc*) залучити до динамо-моделей концепцію процесів з *уповільненою в часі динамікою* (англ. *time-delay dynamics*) [50, 81]. Ідеться про ефекти запізнення флуктуацій великомасштабної течії відносно сили Лоренца, які в режимі малих величин магнітних чисел Прандтля можуть виникати в динамо-моделях із просторово розділеними джерелами полоїдального і тороїдального полів. Зокрема, у моделі Бєбкока – Лейтона може відбуватися довготривале запізнення в часі (значно довші періоду сонячного циклу) перенесення меридіональною циркуляцією полоїдального поля від поверхні до дна СКЗ ("повільний" процес), де генерується тороїдальне поле. На відміну від цього, формування полоїдального поля в результаті магнітного спливання спіральних петель глибинного потужного тороїдального поля є "швидким" процесом, який триває всього кілька місяців [82–84]. Притаманна моделі Бєбкока – Лейтона довготривала інерція дозволяє сформулювати амплітудні варіації від циклу до циклу в термінах простої одновимірної *інерційної схеми* (англ. *iterative map*) [85, 86].

Великі максимуми. Перейдемо до розгляду *великих максимумів*. Останні десятиліття були періодом дуже активного Сонця з безпрецедентно високим рівнем SA за останні кілька століть, охоплених прямими сонячними спостереженнями. Кількість сонячних плям швидко зростала в 1900–1940 рр., причому середня кількість сонячних плям зросла більше ніж вдвічі, і залишалася на цьому високому рівні до недавнього часу [23]. Таке зростання відбувалося в основному за рахунок підвищення максимальної амплітуди циклу, тоді як активність плям завжди поверталася до дуже низького рівня навколо мінімумів циклу. Середня кількість *груп* сонячних плям за 1750–1900 рр. становила 35 ± 9 , тоді як у 1950–2000 рр. вона перебувала на високому рівні 75 ± 3 . Тому сучасний епізод активного Сонця, який почався в 1940-х рр., можна розглядати як *великий максимум* SA (рис. 6), див. також рис. 1 і рис. 2.

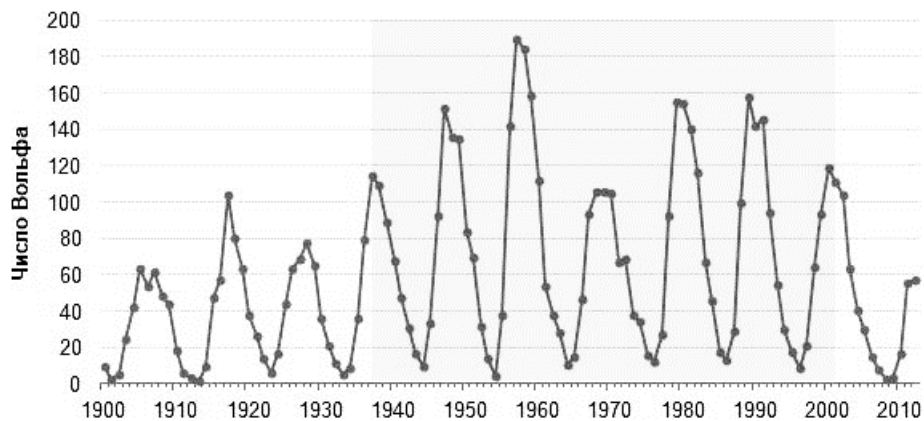


Рис. 6. Часові циклічні варіації сонячної активності (згладжені середньорічні числа Вольфа) за 1900–2012 рр. Зростання сонячної активності з 1940 по 2000 р. (затемнена ділянка рисунка) прийнято називати *сучасним великим максимумом* (із джерела [23])

Однак, після дуже слабкого сонячного мінімуму у 2008–2009 рр. ми можемо впевнено сказати, що SA повертається до свого нормального помірному рівня або, можливо, навіть до стадії низької активності [23]. І таким чином, епізод високої активності, відомий як *сучасний великий максимум* [23], здається закінчився. Хоча дослідники в цілому сприймають сучасний епізод активного Сонця як особливе явище, і питання про те, чи є така висока SA типовою, чи це щось надзвичайне, викликає дискусію.

Питання як часто трапляються епізоди високих максимумів і наскільки вони сильні не можна вивчити за допомогою 400-річної серії прямих спостережень. Тому кількісний аналіз можливий лише з використанням довготривалих космогенних радіоізотопних записів. У результаті аналізу рядів SA, реконструйованих за даними вимірювань ^{10}Be [87–89] і ^{14}C [89] встановлено, що попередній *подібний сплеск активності* стався приблизно 8 тисячоліть тому. На підставі цього доходимо висновку, що сучасний сплеск активності є дуже рідкісною подією [23].

У зв'язку із цим набуває актуальності пошук трохи менших за амплітудою сплесків активності. У роботі [23] розглянуто список сплесків активності, визначених із використанням даних космогенних вимірювань ^{14}C за останні 11 400 років, коли кількість груп сонячних плям за 50 років стабільно перевищувала 50. Усього ідентифіковано 19 таких великих максимумів із загальною тривалістю близько 1030 років, що свідчить про перебування Сонця в підвищеному активному стані впродовж близько 10 % часу. Статистичний аналіз часу виникнення великих максимумів показує, що вони не дотримуються довгострокових циклічних варіацій, а, подібно до великих мінімумів, визначаються стохастичними процесами. Більшість реконструйованих великих максимумів (близько 75 %) були не довшими 50 років, і лише чотири великі максимуми (включаючи сучасний) були довшими за 70 років [90]. Це свідчить про те, що ймовірність продовження сучасного епізоду активного Сонця низька [89, 91]. Хоча, як зауважено в роботі [23], це не прогноз майбутньої сонячної активності, а лише статистична оцінка.

Висновки. Таким чином, дослідження кількох десятиліть засвідчили, що впродовж останнього післяльодовикового періоду в історії Землі (голоцену тривалістю $\approx 11,7$ тис. років) Сонце близько 70 % свого часу провело у нормальному стані, що характеризується середньою сонячною активністю. Разом із тим, близько 15–20 % часу Сонце переживає великий мінімум, тоді як ~ 10 % часу займають періоди дуже високої активності. На рис. 7 показано довготривалі циклічні варіації магнітної активності Сонця впродовж останнього тисячоліття, визначені за вимірами концентрації радіонукліду ^{14}C в річних кільцях дерев.



Рис. 7. Довготривалі циклічні варіації δ -концентрації радіонукліду ^{14}C (у відносних одиницях promille за вимірами в річних кільцях приросту стовбурів дерев), яка служить маркером інтенсивності глобального магнітного поля Сонця за проміжок часу 1900–2000 рр. (із джерела [23])

Однією з головних особливостей довготривалої сонячної активності є її нерегулярна поведінка, яку неможливо описати комбінацією квазіперіодичних процесів, оскільки вона містить по суті випадкову складову. Хоча зауважимо, що в роботі [92] висловлено гіпотезу, згідно з якою довготривалі зміни сонячної магнітної активності можуть модулюватися крутильними (обертковими) планетарними моментами, що діють на несферичний тахоклін Сонця.

Великі мінімуми магнітної активності, характерним представником яких є мінімум Маундера, є типовими сонячними явищами. Усього в космогенних реконструкціях магнітної активності Сонця за останні 11 000 років виявлено 27 великих мінімумів, сумарна тривалість яких становить близько 1900 років. Їхня поява свідчить про те, що вони з'являються не періодично, а скоріше в результаті хаотичного процесу всередині скупчень проявів магнітної активності, розділених 2000–2500 роками. Великі мінімуми, як правило, бувають двох різних типів: короткі (подібні мінімуму Маундера), середня тривалість яких становить 30–90 років, і довгі (подібні мінімуму Шпюрера), середня тривалість – більше 100 років.

Важливим ключем до вивчення впливу варіацій сонячної активності на клімат Землі є мінімум Маундера, упродовж якого спостерігалось винятково мало сонячних плям. Застосування методу аналізу рідкісних подій до цих спостережень привело дослідників до висновку, що появи сонячних плям під час мінімуму Маундера притаманний слабкий за амплітудою 22-річний цикл. Концепція безперервності магнітних циклів у цей час підтверджується також вимірюваннями космогенних радіонуклідів у природних земних архівах. Тому нині прийнято вважати, що під час мінімуму Маундера циклічна магнітна активність Сонця не припинялася, хоча амплітуда циклів була досить низькою. У моделі $\alpha\Omega$ -динамо це може бути пов'язано з тим, що величина магнітної індукції тороїдального поля, збудженого радіальними диференціальними обертаннями в СКЗ, у цей час не досягала порогового значення, необхідного для підйому магнітних силових трубок на сонячну поверхню (нелінійний режим динамо).

Проаналізовано можливі фізичні механізми, що описують пригнічення динамо-процесу у проміжки часу, коли не спостерігалися сонячні плями. Зокрема, автором запропоновано сценарій пояснення північно-південної асиметрії магнітної активності (кількості спостережених плям) під час мінімуму Маундера. Ключову роль у запропонованому сценарії відіграє особливий режим внутрішнього обертання Сонця, виявлений у результаті геліосейсмологічних експериментів. Згідно з даними геліосейсмології СКЗ поділена на полярні і приекваторіальні домени з протилежними знаками радіального градієнта кутової швидкості. Крім того, радіальний градієнт кутової швидкості проникає у глибинні шари стабільної променистої зони нижче СКЗ. Показано, якщо врахувати ці дані, то $\alpha\Omega$ -динамо збуджує дві гармоніки (дипольну та квадрупольну) тороїдального поля в СКЗ, які змінюють свій напрямок із періодом сонячного циклу. Водночас глибинний Ω -ефект у променистій зоні створює тороїдальне поле стаціонарної орієнтації. Суперпозиція квадрупольної гармоніки тороїдального поля СКЗ і стаціонарного тороїдального поля променистої зони може призвести до переваги інтенсивності плямоутворення в одній із півкуль Сонця.

За даними космогенних вимірювань за останні 11 400 років ідентифіковано 19 великих максимумів із загальною тривалістю близько 1030 років. Статистичний аналіз часу виникнення великих максимумів показав, що вони, подібно до великих мінімумів, визначаються стохастичними процесами. Середня тривалість більшості великих максимумів була коротшою 50 років і лише чотири великі максимуми були довгими 70 років.

Сучасний рівень магнітної активності Сонця (після 1940-х рр.) був дуже високим, відповідаючи довгому великому максимуму тривалістю близько 60–70 років, що є типовою, але *рідкісною і нерегулярною подією* в поведінці Сонця. Тому ймовірність продовження сучасного епізоду активного Сонця є *низькою*. Він припинився після 23-го сонячного циклу і сонячна активність, здається, повертається до свого нормального помірному рівня. Хоча це не прогноз майбутньої СА, а лише статистична оцінка.

Особливості довготривалих спостережених незвичних змін у часі магнітної активності Сонця служать викликом для розробників теоретичних моделей сонячного динамо. Випадкова поява великих мінімумів і максимумів певною мірою може бути відтворена сучасними моделями турбулентного динамо зі стохастичним приводом, але деякі проблеми ще залишаються і чекають свого розв'язання в майбутньому.

Це дослідження профінансовано в межах держбюджетної теми № 22БФ23-03 за програмою "Астрономія та фізика космосу" Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lamb H.H. *Climate: Past, Present, and Future*, 2 / H.H. Lamb. – London: Methuen. – 1977.
2. Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет (кайнозой: от палеоцена до голоцена) / Под ред. А. А. Величко. – М.: ГЕОС. – 1999. – 260 с.
3. Манин А.С. Климат как проблема физики / А.С. Манин // УФН. – 2000. – Т.70. – 419–445.
4. Котляков В.М. О причинах и следствиях современных изменений климата / В.М. Котляков // Солнечно-земная физика. – 2012. – № 21. – С. 110–114.
5. Русов В.Д., Астрофизическая модель глобального климата Земли / В.Д. Русов, А.В. Глушков, В.Н. Ващенко. – Киев: Издательство "Наукова думка". – 2003. – 214 с.
6. Milankovitch M.M. Canon of Insolation and the Ice-Age Problem / M.M. Milankovitch. – Beograd: Koniglich Serbische Akademie. – 1941. – 636 p.
7. Hays J.D. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages: for 500,000 years, major climatic changes have followed variations in obliquity and precession / J.D. Hays, J.I. Imbrie, N.J. Shackleton // *Science*. – 1976. – V.194. – P.1121–1132.
8. Roberts N. The Holocene: an Environmental History / N. Roberts. – John Wiley & Sons. – 2014. – 376 p.
9. Matthes F. Report of committee on glaciers / F. Matthes // *Transactions, American Geophys. Union*. – 1939. – V.20(4). – P.518–535.
10. Ruddiman W.F. The atmospheric greenhouse era began thousands of years ago / W.F. Ruddiman // *Clim. Change*. – 2003. – V.61. – P.261–93.
11. Climate forcing by anthropogenic aerosols / R.J. Charlson, S.E. Schwarz, J.M. Hales et al // *Science*. – 1992. – V.255. – P.423.
12. Berger A. / A. Berger, M.-F. Loutre // *Modeling the Climate Response to Astronomical and CO₂ Forcings*. – 1996. – *Geophys. Extern., Climat et Envir., C. R. Acad. Sci.: Paris*. – V.323(IIa). – P.1.
13. Гулёв С.К. Глобальное потепление продолжается / С.К. Гулёв, В.М. Катцов, О.Н. Соломина // *Вестник РАН*. — 2008. – Т.78, № 1. – С. 20–27.
14. Замолодчиков Д. Г. Естественная и антропогенная концепции современного потепления климата / Д.Г. Замолодчиков // *Вестник Российской академии наук*. – 2013. – Т.83, № 3. – С.227–235.
15. Эйгенсон М.С. Очерки физико географических проявлений солнечной активности / М.С. Эйгенсон. – Львов: Изд-во Львовского госуниверситета. – 1957. – 292 с.
16. Budyko M.I. Effect of solar radiation variations on the climate of the Earth / M.I. Budyko // *Tellus*. – 1969. – V.21. – P.611–619.
17. Sellers W.D. A global climatic model based on the energy balance of the earth-atmosphere / W.D. Sellers // *Journ. Appl. Meteorol.* – 1969. – V.8, Iss.3. – P.392–400.
18. Пудовкин М.И. Физический механизм воздействия солнечной энергии и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы, метеопараметры и климат / М.И. Пудовкин, О.М. Распопов // УФН. – 1993. – Т.163. – С.113–116.
19. Lean J. Solar forcing of global climate / J. Lean. In: Esme-Ribes E. (ed.). *The Solar Engine and its Influence on Terrestrial Atmosphere and Climate*. – NY: Springer-Verlag – 1994. – 164 p.
20. Wolf R. Extract of a letter to Mr. Carrington / R. Wolf // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1859. – V.19. – P.85–86.
21. Hale G.E., Nicholson S.B. The low of Sun-spot polarity / G.E. Hale, S.B. Nicholson // *Astrophys. Journ.* – 1925. – V.62. – P.270–300.
22. Soon W.W.-H., Yaskell S.H. The Maunder Minimum and the Variable Sun-Earth Connection / W.W.-H. Soon, S.H. Yaskell. – Singapore: World Scientific Publishing. – 2003. – 278 p.
23. Usoskin I.G. A history of solar activity over Millennia / I.G. Usoskin // *Living Reviews in Solar Physics*. – 2013. – V.10. – P.1–94.
24. Spörer F.W.G. / F.W.G. Spörer // *Vierteljahrsschr. Astron. Ges. (Leipzig)*. – 1887 – V.22. – P. 323.
25. Wolf R. / R. Wolf // *Astronomische Mittheilungen der Eidgenössischen Sternwarte Zürich*, 24. – 1868. – V.3. – P.103–152.
26. Maunder E.W. Prof. Spoerer's researches on Sun-spots / E.W. Maunder // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1890. – V.51. – P. 251–252.
27. Maunder E.W. A Prolonged sunspot minimum / E.W. Maunder // *Knowledge*. – 1894. – V.17. – P.173–176.
28. Clerke A.M. A Prolonged sunspot minimum / A.M. Clerke // *Knowledge* – 1894. – V.17. – P.206–207.
29. Eddy J.A. The Maunder Minimum / J.A. Eddy // *Science*. – 1976. – V. 192, No 4245. – P. 1189–1192.
30. Eddy J.A. The Maunder Minimum: a reappraisal / J.A. Eddy // *Solar Phys.* – 1983. – V. 89. – P. 195–207.
31. Usoskin I.G. Cyclic behaviour of sunspot activity during the Maunder minimum / I.G. Usoskin, K. Mursula, G.A. Kovaltsov // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V.354. – L33–L36.
32. Ribes J.C., Nesme-Ribes E. The solar sunspot cycle in the Maunder minimum AD1645 to AD1715 / J.C. Ribes, E. Nesme-Ribes // *Astron. Astrophys.* – 1993. – V. 276. – P.549–563.
33. Sokoloff D.D. The Maunder minimum: A mixed-parity dynamo mode? / D.D. Sokoloff, E. Nesme-Ribes // *Astron. Astrophys.* – 1994. – V. 288. – P. 293–298.
34. Solar influences on climate / L.J. Gray, J. Beer, M. Geller et al. // *Rev. Geophys.* – 2000. – V.48, Iss.4. – RG4001. – 53 p.
35. Usoskin I.G. Heliospheric modulation of cosmic rays and solar activity during the Maunder minimum / I.G. Usoskin, K. Mursula, G.A. Kovaltsov // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V.106. – P.16,039–16,046.
36. Sokoloff D.D. The Maunder minimum and the solar dynamo / D.D. Sokoloff // *Solar Phys.* – 2004. – V. 224. – P. 145–152.
37. Галицкий В.М. Динамо-волна вблизи солнечного экватора / В.М. Галицкий, Д.Д. Соколов Д.Д., К.М. Кузьян К.М. // *Астрон. журн.* – 2005. – Т. 82, № 4. – С. 378–384.
38. Siegenthaler U. Uptake of excess CO₂ by an outcrop-diffusion model of the ocean / U. Siegenthaler // *Journ. Geophys. Res.-Oc. Atm.* – 1983. – V.88. – P. 3599–3608.
39. Masarik J. An updated simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth's atmosphere / J. Masarik, J. Beer // *Journ. Geophys Res-Atmos.* – 2009. – V.114. – D11103.
40. Heikkila U. Meridional transport and deposition of atmospheric ¹⁰Be / U. Heikkila, J. Beer,
41. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings / F. Steinhilber, J.A. Abreu, J. Beer et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2012. – V.109, No 16. – P.5967–5971.
42. Beer J. Time variations of Be-10 and solar activity / J. Beer, G.M. Raisbeck, F.Yiou. – In: *The Sun in Time (A92-46664 19-92)*. Eds. C.Sonnet, M.Giampapa, M.Matthews. – Tucson, AZ: University of Arizona Press. – 1991. – P. 343–359
43. Beer J. An active Sun through the Maunder Minimum / J. Beer, S. Tobias, N. Weiss // *Solar Phys.* 1998. – V. 181. – P. 237–249.
44. Beer J. The role of the Sun in climate forcing / J. Beer, W. Mende, R. Stellmacher // *Quat. Sci. Rev.* – 2000. – V. 19. – P. 403–415.
45. Hoyt D.V. How well was the Sun observed during the Maunder Minimum? / D.V. Hoyt, K.H. Schatten // *Solar Phys.* – 1996. – V.165. – P.181–192.
46. Hoyt D.V. Groups sunspot numbers; a new solar activity reconstruction / D.V. Hoyt, K.H. Schatten // *Solar Phys.* – 1998. – V.181. – P.491–512.
47. Wang Y.-M. Modeling the Sun's large-scale magnetic field during the Maunder Minimum / Y.-M. Wang., N.R. Sheeley, Jr. // *Astrophys. Journ.* – 2003. – V.591 – P.1248–1256.
48. Kovaltsov G.A. An upper limit on sunspot activity during the Maunder Minimum / G.A. Kovaltsov, I.G. Usoskin, K. Mursula // *Solar Phys.* – 2004. – V.224. – P.95–101.
49. Charbonneau P. Dynamo Models of the Solar Cycle / P. Charbonneau // *Living Reviews in Solar Physics*. – 2020. – V.7, No 4. – P.1–104.
50. Variation of solar cyclicity during the Spoerer Minimum / H.Miyahara, K.Masuda, Y.Muraki et al. // *Journ. Geophys. Res.* – 2006. – V.111(A10). – A03103.
51. Miyahara H. The solar cycle at the Maunder Minimum epoch / H. Miyahara, D. Sokoloff, I.G. Usoskin. – In: *Advances in Geosciences, V.2: Solar Terrestrial (ST)*. Eds.: Ip W.-H., Duldig M. – P.1–20. Singapore: World Scientific Publishing. – 2006.
52. Usoskin I.G. Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints / I.G. Usoskin, S.K.Solanki, G.A. Kovaltsov // *Astron. Astrophys.* – 2007. – V.471. – P. 301–309.
53. Moss D. Solar Grand Minima and random fluctuations in dynamo parameters / D. Moss, D. Sokoloff, I Usoskin, V Tutubalin // *Solar Phys.* – 2008. – V.250: – P. 221–234.
54. Usoskin I.G. Grand Minima of solar activity and the mean-field dynamo / I.G. Usoskin, D. Sokoloff, D.Moss // *Solar Phys.* – 2009. – V.254. – P.345–355.
55. Вайнштейн С.И. Турбулентное динамо в астрофизике / С.И. Вайнштейн, Я.Б. Зельдович, А.А. Рузмайкин. – М.: Наука. – 1980. – 352 с.
56. Krause F. Mean Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory / F. Krause, K.-H. Rädler. – Oxford: Pergamon Press, Ltd. – 1980. – 271 p.
57. Hoyng, P. Helicity fluctuations in mean field theory: an explanation for the variability of the solar cycle? / P. Hoyng // *Astron. Astrophys.* – 1993. – V.272. – P.321–339.
58. Ossendrijver M.A.J.H. Stochastic excitation and memory of the solar dynamo / M.A.J.H. Ossendrijver, P. Hoyng, D.Schmitt // *Astron. Astrophys.* – 1996. – V.313. – P.938–948.
59. Brandenburg A. Modeling a Maunder minimum / A. Brandenburg, E.A. Spiegel // *Astron. Nachr.* – 2008. – V.329. – P.351–358.
60. Криводубский В.Н. О переносе магнитных полей в турбулентной оболочке Солнца / В.Н. Криводубский // *Астрон. журнал*. – 1984. – Т.61, № 2. – С. 354–365.
61. Krivodubskij V.N. Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone / V.N. Krivodubskij // *Astron. Nachr.* – 2005. – V. 326, No 1. – P. 61–74.

62. Krivodubskij V.N. Role of rotational radial magnetic advection in possible explaining a cycle with two peaks/ V.N. Krivodubskij// *Advances in Space Research*. – 2021. – V.68, Iss. 9. – P. 3943–3955.
63. Krivodubskij V.N. The structure of the global solar magnetic field excited by the turbulent dynamo mechanism/ V.N. Krivodubskij // *Astronomy Reports*. – 2001. – Vol. 45, No. 9. – P.738–745.
64. Krivodubskij V.N. Quadrupole mode of the Sun's poloidal magnetic field: on the possibility of exciting by turbulent dynamo mechanism / V.N. Krivodubskij // *Recent Insights into the Physics of the Sun and Heliosphere: Highlights from SOHO and Other Space Missions*. IAU Symp. 203. Eds. P. Brekke, B. Fleck, and J.B. Gurman, 2001. – P.118–120.
65. Krivodubskij V.N. Dynamo parameters of the solar convection zone / V.N. Krivodubskij // *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. – 2006. – V.22, N 1. – P.1–20
66. Arlt R. The butterfly diagram in the eighteenth century / R. Arlt // *Solar Phys.* – 2009. – V.255. – P.143–153.
67. Beer J. On long-term modulation of the Sun's magnetic cycle / J. Beer, S.M. Tobias, N.O. Weiss // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2018. – V.473, No 2. – P.1596–1602.
68. Howe R. Dynamic variations at the base of the solar convection zone / R.Howe, J.Christensen-Dalsgaard, F. Hill // *Science*. – 2000. – 287. – P.2456–2460.
69. Howe R. Solar interior rotation and its variation / R. Howe // *Living Rev. Sol. Phys.* – 2009. – Vol. 6 (1). – P. 1–75.
70. Parker E.N. *Cosmical Magnetic Fields* / E.N. Parker. – Oxford: Clarendon Press. – 1979.
71. Криводубський В.Н. Інтенсивність источников магнітних полів сонячного $\alpha\Omega$ -динамо/ В.Н. Криводубський // *Астрон. журнал*. – 1984. – Т.61, № 3. – С. 540–548.
72. Stix M. *The Sun: An Introduction* / M. Stix. – 2nd ed. – Berlin: Springer-Verlag, – 2002.
73. Hale G.E. The magnetic polarity of Sun-spots / G.E.Hale, F.Ellerman, S.B.Nicholson, A.H.Joy // *Astrophys. Journ.* – 1919. – V.49. – P. 153–186.
74. Zhukova A. Synthetic solar cycle for active regions violating the Hale's polarity law / A. Zhukova, A. Khlystova, V. Abramenko, D. Sokoloff // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2022. – V.512, Iss.1. – P. 1365–1370
75. Pipin V.V. Variations of the solar cycle profile in a solar dynamo with fluctuating dynamo governing parameters / V.V.Pipin, D.D.Sokoloff, I.G.Usoskin // *Astron Astrophys.* – 2012. – V.542. – P.A26 – 11 p.
76. Eddy J.A. Solar rotation during the Maunder Minimum / J.A.Eddy, P.A.Gilman, D.E.Trotter // *Solar Phys.* – 1976. – V. 46. – P. 3–14.
77. Platt N. On-off intermittency: A mechanism for bursting / N.Platt, E.A.Spiegel, C.Tresser // *Phys. Rev. Lett.* – 1993. – V. 70. – P. 279–282.
78. Dikpati M. A Babcock-Leighton flux transport dynamo with solar-like differential rotation / M.Dikpati, P.Charbonneau // *Astrophys. Journ.* – 1999. – V. 518. – P. 508–529.
79. Charbonneau P., Dikpati M. Stochastic fluctuations in a Babcock-Leighton model of the solar cycle / P.Charbonneau, M.Dikpati // *Astrophys. Journ.* – 2000. – V. 543. – P. 1027–1043.
80. Charbonneau P. Solar interface dynamo. II. Linear, cinematic models in spherical geometry / P.Charbonneau, K.B.MacGregor // *Astrophys. Journ.* – 1997. – V. 486. – P. 502–520.
81. Yoshimura H. Nonlinear astrophysical dynamos: Multiple-period dynamo wave oscillations and long-term modulations of the 22 year solar cycle / H.Yoshimura // *Astrophys. Journ.* – 1978. – V.226. – P. 706–719.
82. Moreno-Insertis F. Nonlinear time evolution of kink-unstable magnetic flux tubes in the convection zone of the Sun / F.Moreno-Insertis // *Astron. Astrophys.* – 1986. – V.166. – P. 291–305.
83. Fan Y. The origin of morphological asymmetries in bipolar active regions / Y.Fan, G.H.Fisher, E.E.DeLuca // *Astrophys. Journ.* – 1993. – V.405. – P. 390–401.
84. Caligari P. Emerging flux tubes in the solar convection zone. I. Asymmetry, tilt, and emergence latitudes / P.Caligari, F.Moreno-Insertis, M.Schüssler // *Astrophys. Journ.* – 1995. – V.441. – P. 886–902.
85. Durney B.R. On the differences between odd and even solar cycles / B.R.Durney // *Solar Phys.* – 2000. – V.196. – P. 421–426.
86. Charbonneau P. Multiperiodicity, chaos and intermittency in a reduced model of the solar cycle / P.Charbonneau // *Solar Phys.* – 2001. – V. 199. – P. 385–404.
87. Millennium-scale sunspot number reconstruction: evidence for an unusually active Sun since the 1940s / I.G.Usoskin, S.K.Solanki, M.Schüssler et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – V.91, – 211101. – 4 p.
88. Usoskin I.G. Reconstruction of solar activity for the last millennium using ^{10}Be data / I.G.Usoskin, K.Mursula, S.K.Solanki et al. // *Astron. Astrophys.* – 2003. – V.413. – P. 745–751.
89. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000years / S.K.Solanki, I.G.Usoskin, B.Kromer et al. // *Nature*. – 2004. – V.431. – P. 1084–1087.
90. Predicting space climate change / L.Barnard, M.Lockwood, M.A.Hapgood et al. // *Geophys. Res. Lett.* – 2011. – V.38. – L16103. – 6 p.
91. For how long will the current grand maximum of solar activity persist? / J.A.Abreu, J.Beer, F.Steinhilber et al. // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – V.35. – L20109. – 4 p.
92. Is there a planetary influence on solar activity? / J.A.Abreu, J.Beer, A.Ferriz-Mas et al. // *Astron. Astrophys.* – 2012. – V.548, A88. – 9 p.

Надійшла до редакції 10.11.2021

V. Krivodubskij, Dr Hab.

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

LONG-TERM VARIATIONS OF SOLAR MAGNETIC ACTIVITY

The main law of the evolution of the Earth's climate is the cyclical nature of global changes in the latter. One of the possible explanations for the cyclical nature of global climate changes is provided by the astrophysical model of fluctuations in the insolation of the Earth's surface by solar radiation. Modern climate change is mainly associated with variations in the magnetic activity of the Sun, one of the main proxies of which are sunspots. The decrease in the number of sunspots coincides with the epochs of cooling on the Earth, while during the maximum number of sunspots warming is observed. The paper reviews cosmogenic reconstructions of long-term variations in the Sun's magnetic activity (large minima and large maxima) during the Holocene (last 12,000 years). The accidental appearance of large minima and maxima can to some extent be reproduced by modern models of a turbulent dynamo with a stochastic drive.

An important key to studying the impact of solar activity variations on the Earth's climate is the Maunder minimum (late 17th century), during which extremely little sunspots were observed. Applying the method of analysis of rare events to these observations led researchers to conclude that the appearance of sunspots at the Maunder minimum was characterized by a weak amplitude of 22 years. The concept of continuity of magnetic cycles at this time is also confirmed by measurements of cosmogenic radionuclides in natural terrestrial archives. Therefore, today it is believed that during the Maunder minimum, the cyclic magnetic activity of the Sun did not stop, although the amplitude of the cycles was quite low. In the $\alpha\Omega$ -dynamo model, this may be due to the fact that the magnitude of the magnetic induction of the toroidal field excited by radial differential rotation in the solar convection zone at this time did not reach the threshold value required for lifting magnetic power tubes on the solar surface (nonlinear dynamo mode). Possible physical mechanisms describing the suppression of the dynamo process at intervals when no sunspots were observed are analyzed.

A scenario for explaining the north-south asymmetry of magnetic activity during the Maunder minimum is proposed. A key role in the proposed scenario is played by the special nature of the internal rotation of the Sun, revealed as a result of helioseismological experiments.

The modern grand maximum of solar activity, which began in the 1940s, has ceased after solar cycle 23, and activity of the Sun seems to be returning to its normal moderate level.

Key words: global climate changes of the Earth, sunspot cycles, magnetic fields of the Sun, cosmogenic proxies of solar activity, Maunder minimum, modern grand maximum, solar dynamo.