

ВИПУСК 1(67)

УДК 523.98

DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2023.67.5-11>

Валерій КРИВОДУБСЬКИЙ, д-р фіз.-мат. наук

ORCID ID: 0000-0001-7655-8121

e-mail: [krivod2@uk.net](mailto:krivod2@uk.net)

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МАГНІТО-АКТИВНІ ДОВГОТИ НА СОНЦІ І ЗОРЯХ

Подано огляд досліджень тривалої підвищеної магнітної активності у двох дискретних довготних інтервалах, що спостерігаються на Сонці та на поверхні зірок певних типів. Активні довготи на Сонці вперше відкрито в кінці XIX ст. Нині в результаті статистичного аналізу даних спостережень протягом більш ніж століття встановлено, що на поверхні Сонця існують два активні довготні сектори, зміщені один відносно одного приблизно на 180°, які тривалий час можуть стабільно підтримувати фазову когерентність активності. У кожен заданий момент часу один із двох довготних інтервалів є більш активним (домінуючим). Висвітлено періодично спостережуване явище "flip-flop" ("фліп-флоп"), суть якого полягає в раптовому швидкому перемиканні зазначеного домінування між двома активними довготами. Виявлене явище регулярно повторюється, що вказує на існування зіркових магнітних flip-flop циклів. Водночас цикли сонячного типу характерні і для молодих аналогів Сонця. З іншого боку, на основі вивчення еволюції площі плям магнітний flip-flop цикл, тривалістю близько 3,7 року, виявлено і на Сонці. Актуально, що співвідношення періодів обох типів циклів для молодих карликів і Сонця однакове: flip-flop цикл приблизно в 3–4 рази коротший, ніж цикл сонячного типу. Тобто структура й еволюція активних довгот на Сонці є подібною до спостережених активних довгот на поверхні холодних зір, що швидко обертаються і мають зовнішні конвективні оболонки. Проаналізовано запропоновані дослідниками механізми збудження магнітоактивних довгот. Перспективними виглядають моделі динамо-збудження аксіально асиметричних магнітних гармонік. Проведені нами розрахунки показали, що моделі  $\alpha\Omega$ -динамо із залученням геліосейсмологічних даних про внутрішнє обертання Сонця забезпечують співіснування дипольних і квадрупольних гармонік глобального магнітного поля, необхідних для відтворення виділених довготних секторів підвищеної магнітної активності.

**Ключові слова:** магнітна активність Сонця, сонячні плями, магнітна заплямованість зір, "flip-flop" феномен, динамо-модель магнітного циклу.

Вступ

Циклічна регенерація глобального магнітного поля Сонця лежить в основі всіх явищ, відомих під загальною назвою сонячна активність. Найпростішим й історично першим доступним для спостережень проявом активності Сонця були **сонячні плями** – темні ділянки на сонячній поверхні, зумовлені їхньою пониженою температурою порівняно з температурою фотосфери. Генріх Швабе на основі його власних спостережень виявив 1843 р. зміну із часом кількості плям на поверхні Сонця (Schwabe, 1844). Невдовзі Р. Вольф запровадив спеціальний індекс, який враховує як кількість плям, так і кількість груп плям, що спостерігалися в даний день на видимому диску Сонця. Введений індекс отримав назву відносної кількості сонячних плям (нині його частіше називають **числом Вольфа**). Загальноприйнятим кількісним описом інтенсивності сонячної активності служать усереднені (за місяць, квартал або рік) щоденні значення чисел Вольфа. Відновивши на основі архівних даних спостережень середньомісячні значення індексу плям з 1749 р., Вольфу вдалося встановити, що в певні роки кількість плям періодично досягає максимальних і мінімальних значень. Це дозволило вперше визначити тривалість середнього періоду змін кількості плям близько 11,1 року. Так було відкрито **основний закон сонячної активності (закон Швабе – Вольфа)**, згідно з яким зміна частоти появи плям відбувається **циклічно** із середнім періодом близько **11 років** (Wolf, 1859). Нині ми знаємо, що сонячні плями служать носіями потужного магнітного поля. Спостережена на сонячній поверхні картина розподілу магнітних знаків біполярних груп плям відновлюється кожні 22 роки (Hale, & Nicholson, 1925), визначаючи тим самим магнітний цикл Хейла. Недавно в результаті вивчення розподілів кількості груп сонячних плям за їхніми еквівалентними діаметрами виявлено докази подвійного циклу Хейла (приблизно 44 роки) (Efimenko, & Lozitsky, 2018). Крім зазначених циклів відомі також віковий (80–90 років) цикл Глайсберга і Маундерівські мінімуми, що відбуваються раз на кілька століть (Витинський, Копецкий, & Ку克林, 1986). Вимірювання варіації радіонуклідів, що зберігаються в земних резервуарах (ізоотопу  $^{10}\text{Be}$  – у полярних кернах льоду з Гренландії та Антарктиди й ізоотопу  $^{14}\text{C}$  – у річних кільцях природост стовбурів дерев), надають унікальну можливість реконструювати історію космічної радіації та довготривалі варіації магнітної активності Сонця (великі мінімуми й великі максимуми) протягом голоцену (останніх 12 000 років) (див. огляди (Steinhilber et al., 2012; Криводубський, 2021).

Водночас цікавим і все ще остаточно не поясненим явищем магнітної активності Сонця залишається феномен аксіально несиметричного розподілу індексів активності по сонячній поверхні, який отримав у літературі назву явища **активних довгот** (Витинський, Копецкий, & Ку克林, 1986). Активною довготою прийнято називати довготний інтервал на Сонці, в якому впродовж тривалого часу (принаймні кілька років, іноді – кілька циклів) сонячна активність проявляється суттєво інтенсивніше, ніж в інших довготних інтервалах. Уперше активні довготи виявлено 1897 р. А. Вольфером (Wolfer, 1897). Зауважимо, що термін "активна довгота" є умовним скороченням, оскільки йдеться не про довготу, а про довготний інтервал (сектор) протяжністю близько 40°.

У цій роботі зроблено огляд проведених в останні десятиліття досліджень підвищеної магнітної активності у виділених довготних секторах як на Сонці, так і на поверхні зір різних типів, проаналізовано запропоновані дослідниками механізми збудження магніто-активних довгот. За розрахунками, виконаними автором у межах моделі  $\alpha\Omega$ -динамо, показано, що на Сонці можуть збуджуватися змінні в часі дипольна і квадрупольна гармоніки глобального магнітного поля, які забезпечують формування активних магнітних довгот.

## Результати

**Активні довготи на Сонці.** У роботах (Berdyugina, & Usoskin, 2003; Usoskin et al., 2005) на основі статистичного аналізу спостережених даних за 1874–2001 рр. про розподіл по сонячному диску місць появи плям встановлено, що на сонячній поверхні існують два активні довготні інтервали (сектори), зміщені приблизно на  $180^\circ$  один відносно іншого, які можуть стійко підтримувати фазову когерентність активності впродовж тривалого (до кількох сонячних циклів) часу. Внесок аксіально несиметричних поверхневих магнітних структур за площею становить близько 0,1 щодо переважаючої аксіально симетричної магнітної гармоніки. В кожний даний момент часу один із двох довготних інтервалів є більш активним (домінуючим). Причому зазначене домінування час від часу швидко перемикається (перестрибує) між цими двома активними довготами. Із спостереження магнітної активності зір останнє явище відоме в літературних джерелах як магнітний flip-flop феномен (Jetsu et al., 1991) (детальніше див. нижче).

Для теоретичного пояснення явища в літературі розглядалися можливості динамо-збудження аксіально несиметричних магнітних гармонік небесних тіл (Moss, 2004; Bassom et al., 2005), аксіально несиметричних структур у результаті прояву реліктового поля в надрах Сонця (Dicke, 1979; Mordvinov, & Kitchatinov, 2004; Кичатинов, & Олемской, 2005; Berdyugina et al., 2006), аксіально несиметричної сонячної гідродинаміки і нелінійних нестійкостей (Bigazzi, & Ruzmaikin, 2004; Dikpati, Cally, & Gilman, 2004). Важливими також можуть бути флуктуації магнітної парності, відомі як відхилення від строгої екваторіальної антисиметрії (Dikpati, Cally, & Gilman, 2004). Ще на одну можливість указано в роботі (Ruzmaikin, 1998), де зауважено, що після того, як певному механізмові вдалося сформувати активну ділянку, повторне формування наступної ділянки поблизу може, у принципі, бути легшим, ніж раніше.

**Активні ділянки на зорях.** Перші повідомлення про існування виділених активних довгот у зір певних типів з'явилися наприкінці 80-х рр. минулого століття (Olah et al., 1988; Zeilik et al., 1988). Зоряна пляма (англ. *Starspot*) – явище на поверхні зорі, аналогічне сонячній плямі. Спостережені зоряні плями мають температуру на 100–1500 К нижчу, ніж температура навколишньої фотосфери. Відмінність температур заплямованих ділянок і фотосфери приводить до зміни видимого блиску зорі у разі її обертання. Заплямованість (англ. *Spottedness*) зір проявляється, насамперед, фотометрично, як обертальна модуляція блиску з типовою амплітудою близько  $0,10^m$  зоряної величини. Для виявлення і фотометричних вимірювань протяжності секторів зоряних плям використовують метод на основі ефекту Доплера (непрямий метод візуалізації, що включає доплерівську томографію) (Berdyugina, 2000).

Зазвичай спостерігають зоряні плями, що за розмірами помітно перевищують плями на Сонці. Вони можуть покривати до 30 % поверхні зорі, що в 100 разів більше площі типової сонячної плями. Десятиліття безперервного фотометричного моніторингу зір типу *RS CVn* виявили, що великі плями зберігали свою ідентичність протягом багатьох років (від 11 до 30 років), що було інтерпретовано як ознаки однієї або двох активних довгот (Berdyugina, & Tuominen, 1998), подібних до розподілу активних довгот на Сонці. На додаток до зір *RS CVn* активні довготи були знайдені в розподілі плям на зорях типу *FK Com* (Jetsu, Pelt, & Tuominen, 1993; Korhonen, Berdyugina, & Tuominen, 2002), дуже активних аналогів молодого Сонця (Berdyugina, Pelt, & Tuominen, 2002; Berdyugina, & Järvinen, 2005) і заплямованих карликів (Huovalin, Saar, & Tuominen, 1998).

Зміни конфігурації плям дають повільні (з характерним часом близько місяця) зміни рівня середнього блиску в цю епоху. Спостережувані амплітуди модуляції оптичної яскравості означають, що велика частина зоряної фотосфери вкрита холодними зоряними плямами. Активні довготи добре видно з тривалих серій доплерівських карт (Berdyugina, & Tuominen, 1998). Протягом тривалих (до 50 років) проміжків часу загальна змінність блиску заплямованих зір становить зазвичай  $0,1–0,3^m$  зоряної величини, досягаючи у деяких об'єктів  $0,4–0,6^m$ . Для Сонця, як зорі, ефект заплямованості становить близько  $0,001^m$  зоряної величини (Alekseev, & Kozhevnikova, 2017).

**Зоряні й сонячні магнітні flip-flop цикли.** Зоряні плями, як і сонячні, служать носіями потужного магнітного поля (від 3 до 5 кГс) (Berdyugina, 2000). Для вимірювання магнітного поля зоряних плям застосовують метод магнітної зємман-доплерівської візуалізації (англ. *Zeeman-Doppler imaging*). Хоча активні довготи зір виживають упродовж тривалого часу, проте активні області, з яких вони складаються, еволюціонують **у розмірі**, указуючи на можливі циклічні варіації, спостережені в доплерівських зображеннях (Berdyugina, 2000). Унаслідок дослідження перерозподілу **площі** активних довготних ділянок зорі *FK Comae Berenices*, зайнятих магнітними плямами, Л. Йетсу та ін. (Jetsu et al., 1991) відкрили 1991 р. вже згаданий вище **магнітний flip-flop ефект** ("сальто-стрибок", тобто ефект своєрідного перевертання локалізації магнітної заплямованості).

Суть відкритого явища така. В роботі (Jetsu et al., 1991) виявлено, що еволюція рівня активності двох довготних секторів зорі *FK Comae Berenices*, зміщених один відносно іншого на  $180^\circ$ , суттєво відрізнялася. Впродовж доволі тривалого періоду часу (приблизно 7 років) **активність в одному секторі була вищою**, ніж в іншому секторі протилежної півсфери (рис. 1). Згодом активні довготи внаслідок їхньої еволюції набували на короткий час (до пів року) приблизно однакового рівня активності, після чого домінуючий рівень активності першого сектора **раптово стрибком перемикався** (впродовж кількох місяців) на активний сектор із протилежного боку зорі. В результаті активність першої активної довготи знизилася, тоді як іншої – збільшилася, що свідчило про перерозподіл площі плям між протилежними півсферами. Нове співвідношення рівнів активності двох секторів **зберіглося певний час до їхнього наступного перемикання**.

Феномен подібних варіацій площі магнітної заплямованості в активних довготах притаманний також **подвійним зорям** певних типів (Berdyugina et al., 1999) і деяким одиночним зіркам, що швидко обертаються (Korhonen et al., 2001), зокрема й **аналогам молодого Сонця** (заплямованим молодим карликам) (Berdyugina, Pelt, & Tuominen, 2002; Berdyugina, & Järvinen, 2005).

В результаті подальших спостережень зорі *FK Comae Berenices* і зазначених зір певних типів встановлено, що виявлений ефект перемикавання активності **регулярно повторюється**, що вказує на існування зоряних магнітних **flip-flop циклів** (Jetsu et al., 1994; Korhonen, Berdyugina, & Tuominen, 2002; Berdyugina, & Järvinen, 2005).

Водночас, вивчення еволюції магнітної заплямованості молодих карликів указує на існування на цих зорях циклів сонячного типу (тривалістю від 11 до 30 років) (Berdyugina, 2004).

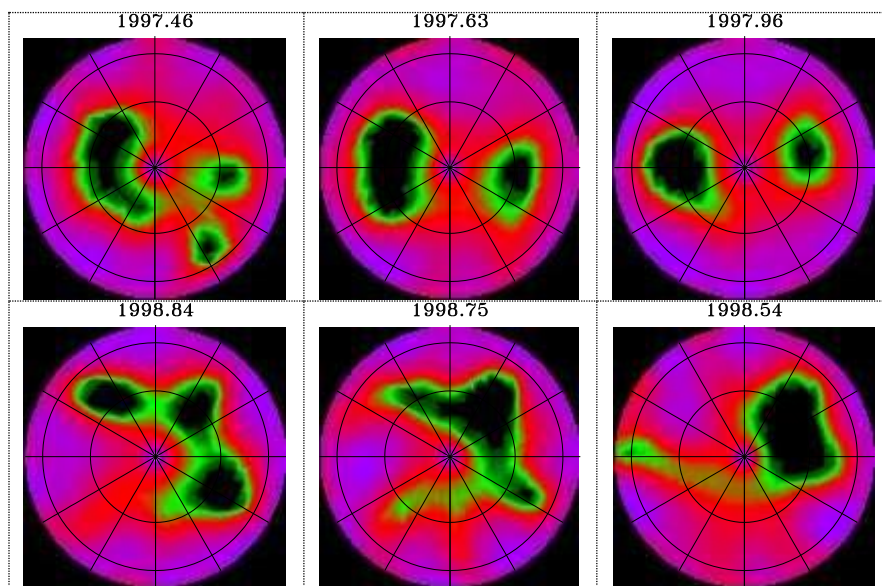


Рис. 1. Доплерівські зображення (проекція з полюса) заплямованості зорі *RS CVn II Peg*, які ілюструють flip-flop феномен, що відбувся в період з кінця 1997 р. до середини 1998 р. (Berdyugina, 2000)

З іншого боку, на основі дослідження еволюції площі сонячних плям *магнітний flip-flop цикл*, тривалістю близько 3,7 року (що становить приблизно 1/3 частину 11-річного циклу плям), було виявлено і на Сонці (Berdyugina, & Usoskin, 2003). І надзвичайно важливо, що співвідношення періодів обох типів циклів для молодих карликів і Сонця є однаковим: *flip-flop цикл приблизно у 3–4 рази коротший, ніж цикл сонячного типу* (Berdyugina, 2004). Тобто структура й еволюція активних довгот на Сонці виглядає подібною до спостереженої перебудови активних довгот на поверхні холодних зір, що швидко обертаються і мають зовнішні конвективні оболонки. Тому прийнято вважати (Berdyugina, 2000, 2004), що *динамо-механізми збудження магнетизму і явища flip-flop циклів на Сонці й у цих зорях є подібними*. Це дозволяє досліджувати явища зоряної магнітної активності й порівнювати їх із детальним вивченням магнітної еволюції і перебудови магнетизму на Сонці.

**Роль динамо-гармонік магнітного поля в поясненні flip-flop циклів.** У поясненні зоряних і сонячних активних довгот і flip-flop циклів суттєву роль відводять сферичним магнітним гармонікам, якими прийнято описувати модельну структуру глобального магнітного поля. Зокрема, в роботі (Fluri, & Berdyugina, 2004) вдалося змодельювати криву блиску зорі, виведену із спостереженого розподілу магнітної заплямованості, якщо припустити, що цей розподіл зумовлений комбінацією аксіально несиметричних дипольної і квадрупольної динамо-гармонік.

В результаті моделювання на основі нелінійного аксіально несиметричного динамо усередненого магнітного поля Д. Моссом показано (Moss, 2004), що активні довготні інтервали підвищеної магнітної активності можна відтворити шляхом суперпозиції двох глобальних магнітних мод, а саме: осцилюючої аксіально симетричної динамо-гармоніки, яка змінює в часі свою симетричність від майже *дипольної* до майже *квадрупольної* (рис. 2), і стійкої аксіально несиметричної гармоніки. Після реверсації знака квадрупольної гармоніки довготний сектор домінантної заплямованості "перестрибує" (робить flip-flop) на протилежний бік зорі, забезпечуючи вже там підвищений рівень магнітної активності. Цікаво дослідити правомірність припущень Д. Мосса (Moss, 2004) на основі аналізу умов збудження динамо-гармонік на Сонці в межах моделі  $\alpha\Omega$ -динамо, оскільки, як зазначено вище, механізми сонячного і зоряних динамо подібні.

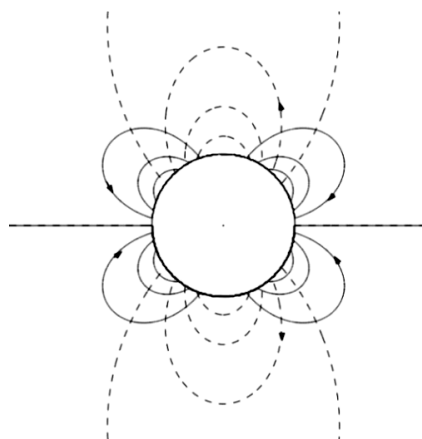
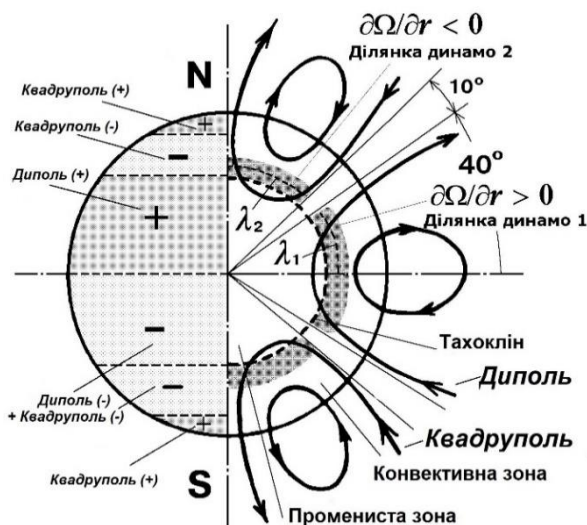


Рис. 2. Схема суперпозиції дипольної (пунктирні лінії) і квадрупольної (суцільні лінії) гармонік магнітного поля в меридіональній площині зорі. Сумарна аксіально симетрична динамо-гармоніка змінює в часі свою парність від дипольної до квадрупольної (Moss, 2004)

**Збудження глобального магнітного поля Сонця механізмом турбулентного динамо.** В моделі турбулентного  $\alpha\Omega$ -динамо (Parker, 1979) порогові збудження дипольної і квадрупольної магнітних гармонік глобального поля є досить близькими і залежать від знака критичного динамо-числа  $K\lambda = [(\alpha\partial\Omega/\partial r)(\lambda^3/\nu_T^2)]^{1/3}$  ( $\alpha$  – параметр спіральності турбулентності,  $\partial\Omega/\partial r$  – радіальний градієнт кутової швидкості,  $\nu_T$  – турбулентна в'язкість плазми,  $\lambda$  – меридіональна протяжність ділянки генерації) Згідно з нашими розрахунками (Krivodubskij, 1984, 2001, 2005; Kryvodubskij, 2006) в нижній частині СКЗ, де відбувається збудження глобального поля, параметр спіральності  $\alpha$  набуває *негативного знака*. Водночас надзвичайно актуально, що за даними геліосейсмологічних експериментів (Howe, 2009) СКЗ природно поділена на приекваторіальний і полярні домени з протилежними знаками радіального градієнта кутової швидкості  $\partial\Omega/\partial r$ . З огляду на це, різні режими радіального диференційного обертання зумовлюють різні знаки динамо-числа і таким чином впливатимуть на парність (симетричність) збуджених магнітних гармонік у зазначених доменах Сонця.

Узявши до уваги значення параметрів  $\alpha$  і  $\nu_T$  (обчислених нами на основі фізичних характеристик СКЗ із моделі М. Стікса (Stix, 2002)) і  $\partial\Omega/\partial r$  (з даних геліосейсмологічних експериментів (Howe, 2009)), ми розрахували значення динамо-числа  $K\lambda$  окремо для приекваторіального і полярних доменів. На рис. 3 зображено структуру полоїдального магнітного поля, побудовану на основі отриманих нами розрахунків.



**Рис. 3. Зональна широтна структура глобального полоїдального поля (розріз у меридіональній площині), збудженого механізмом  $\alpha\Omega$ -динамо в глибинних шарах СКЗ (в околі ділянки тахокліну) поблизу епохи максимуму активності 23-го циклу. Права півсфера:** магнітні силові лінії антисиметричного відносно екватора диполя (ділянка динамо 1, що охоплює шари обабіч екватора до геліоширот  $40^\circ$ , де  $\partial\Omega/\partial r > 0$ ,  $K_1\lambda_1 \approx -7$ ) і симетричного квадруполя (дві ділянки динамо 2 поблизу полюсів, де  $\partial\Omega/\partial r < 0$ ,  $K_2\lambda_2 \approx +8$ );  $\lambda_1, \lambda_2$  – меридіональні протяжності ділянок генерації. **Ліва півсфера:** геліоширотні зони з позитивною (+) і негативною (-) магнітною полярністю поверхневого (фонового) магнітного поля, які відповідають глибинним магнітним структурам. Чітко видно північно-південну асиметрію розподілу поверхневого (фонового) магнітного поля (ліва півсфера), зумовленого виходом на сонячну поверхню силових ліній глибинного полоїдального поля: в північній півкулі проявляється три широтні зони з перемежованими знаками магнітної полярності, тоді як у південній – тільки дві зони з протилежними знаками полярності, оскільки тут на середніх геліоширотах збігаються напрямки магнітних силових ліній диполя і квадруполя

Домінуючі гармоніки кожного типу відіграють свою роль у сценарії магнітного циклу. Впродовж більшого часу циклами зазвичай править диполь. Проте під час наближення до моменту зміни знака (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. Фрагменти останнього у процесі спливання на сонячну поверхню формують активні магнітні ділянки на фотосферному рівні.

Як зазначено вище, згідно з дослідженням Д. Мосса (Moss, 2004) утворення активних довготних секторів у зір пізніх класів (в яких магнітні поля генеруються механізмами турбулентного динамо) можна відтворити, якщо допустити співіснування осцилюючих дипольної і квадрупольної динамо-гармонік поля. *Наші модельні розрахунки демонструють*, що на Сонці, де поля генеруються механізмом  $\alpha\Omega$ -динамо, справді можуть одночасно збуджуватися дві динамо-гармоніки глобального магнітного поля, підтверджуючи тим самим ключове припущення Д. Мосса, необхідне для пояснення активних довгот.

**Дискусія і висновки**

Виконано огляд досліджень тривалої спостереженої підвищеної магнітної активності на Сонці і на поверхні зір певних типів у виділених довготних секторах (зміщених один відносно одного приблизно на  $180^\circ$ , які можуть стабільно підтримувати фазову когерентність активності протягом тривалого часу). Активні сектори зір дослідники виявляють на основі вивчення спостереженої магнітної заплямованості зоряної поверхні. Зоряні плями холодніші за навколишню фотосферу, що зумовлено присутністю в цих ділянках потужних магнітних полів. Відмінність температур заплямованих ділянок і фотосфери приводить до зміни видимого блиску зорі під час її обертання. Тому запля-

мованість зір визначають за допомогою фотометричних вимірювань (на основі ефекту Доплера), як обертальну модуляцію їхнього блиску. Інверсія часового ряду профілів зоряних спектральних ліній надає можливість побудувати карту заплямованості зоряної поверхні. Зоряні плями за розмірами помітно перевищують плями на Сонці. Вони можуть покривати до 30 % поверхні зорі, що в 100 разів більше площі типової сонячної плями. Протягом тривалих проміжків часу загальна змінність блиску заплямованих зір становить зазвичай 0,1–0,6<sup>m</sup> зоряної величини. Десятиліття безперервного фотометричного моніторингу зір виявили, що великі плями зберігали свою ідентичність протягом багатьох років, що було інтерпретовано як ознаки двох активних довгот, подібних до розподілу активних довгот на Сонці. Для вимірювання магнітного поля зоряних плям спостерігачі застосовують метод магнітної зеєман-доплерівської візуалізації. Спостережені зоряні плями мають температуру на 100–1500 К нижчу, ніж температура навколишньої фотосфери, що зумовлено, згідно із спостереженнями, магнітними полями з індукцією від 3 до 5 кГс.

Висвітлено спостережуване час від часу на зорях певних класів явище flip-flop, виявлене вперше Л. Йетсу та ін. (Jetsu et al., 1991) на підставі аналізу спостережень за плямованості зорі *FK Comae Berenices*. Суть відкритого ефекту полягає у раптовому швидкому перемиканні підвищеного рівня заплямованості між двома довготними секторами з протилежних боків зорі. В результаті подальших спостережень встановлено, що відкритий феномен регулярно повторювався з періодом близько 6,4 років. Незабаром проведені когортою дослідників нові спостереження засвідчили існування зоряних магнітних flip-flop циклів (тривалістю від 3,7 до 6,4 років) для заплямованих молодих карликів (молодих аналогів Сонця). Водночас для молодих карликів виявлено також еволюційні цикли магнітної заплямованості сонячного типу (тривалістю від 11 до 30 років). З іншого боку, на основі еволюції площі сонячних плям магнітний flip-flop цикл, тривалістю близько 3,7 року, виявлено і на Сонці (Berdyugina, & Usoskin, 2003). Актуально, що співвідношення періодів обох типів циклів для молодих карликів і Сонця виявилось однаковим, а саме близько 1/3. Тобто flip-flop цикли є приблизно у 3–4 рази коротшими, ніж цикли сонячного типу. Це може свідчити про те, що реконструкція активних довгот на Сонці є подібною до спостереженої еволюції активних довгот на поверхні холодних зір, що швидко обертаються і мають зовнішні конвективні оболонки. Зважаючи на це, дослідники вважають, що динамо-механізми збудження магнетизму і явища flip-flop циклів на Сонці і в цих зорях є подібними (Berdyugina, 2000, 2004). Це дозволяє порівнювати результати детального вивчення еволюції і перебудови магнетизму на Сонці з явищами зоряної магнітної активності.

В межах моделі  $\alpha\Omega$ -динамо автором досліджено збудження на Сонці глобального магнітного поля. Якщо взяти до уваги фізичні характеристики СКЗ і дані геліосейсмології про внутрішнє обертання Сонця, то проведені нами модельні розрахунки продемонстрували можливість співіснування дипольної і квадрупольної динамо-гармонік, що еволюціонують у часі. Останнє підтверджує обґрунтованість припущення Д. Мосса (Moss, 2004) про те, що виділені довготні сектори підвищеної магнітної активності зір пізніх класів можна відтворити суперпозицією осцилюючих дипольної і квадрупольної динамо-гармонік. Отриманий нами результат може бути корисним у подальшому дослідженні еволюції магніто-активних довгот на Сонці.

**Подяки, джерела фінансування.** Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України: держбюджетна тема № 22БФ23-03 за програмою "Астрономія та фізика космосу" Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

#### Список використаних джерел

- Витинский, Ю. И., Копецкий, М., & Куклин Г. В. (1986). *Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца*. Наука.
- Кичатинов, Л. Л., & Олемской, С. В. (2005). Активные долготы Солнца: период вращения и статистическая достоверность. *Письма в Астрономический журнал*, 31(4), 309–314.
- Криводубський, В. Н. (2021). Довготривалі варіації магнітної активності Сонця. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія "Астрономія"*, 64(2), 26–36.
- Alekseev, I. Y., & Kozhevnikova, A. V. (2017). Long-term variations in the spottedness of *BY Dra M* dwarfs. *Astronomy Reports*, 61, 221–232.
- Bassom, A. P., Kuzanyan, K. M., Sokoloff, D., & Soward, A. M. (2005). Non-axisymmetric  $\alpha\Omega$ -dynamo waves in thin stellar shells. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 99, 309–336.
- Berdyugina, S. V. (2000). Starspots: A Key to the Stellar Dynamo. *Living Reviews in Solar Physics*, 2(8), 1–62.
- Berdyugina, S. V. (2004). Non-axisymmetric magnetic fields and flip-flops on the Sun and cool stars. *Solar Physics*, 224, 121–131.
- Berdyugina, S. V., & Järvinen, S. P. (2005). Spot activity cycles and flip-flops on young solar analogs. *Astronomische Nachrichten*, 326, 283–286.
- Berdyugina, S. V., & Tuominen, I. (1998). Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars. *Astronomy and Astrophysics*, 336, L25–L28.
- Berdyugina, S. V., & Usoskin, I. G. (2003). Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence. *Astronomy and Astrophysics*, 405, 1121–1128.
- Berdyugina, S. V., Pelt, J., & Tuominen, I. (2002) Magnetic activity in the young solar analog LQ Hydrae. I. Active longitudes and cycles. *Astronomy and Astrophysics*, 394, 505–515.
- Berdyugina, S. V., Berdyugin, A. V., Ilyin, I., & Tuominen, I. (1999). The active *RS Canum Venaticorum* binary II *Pegasi*. IV. The spot activity cycle. *Astronomy and Astrophysics*, 350, 626–634.
- Berdyugina, S. V., Moss, D., Sokoloff, D., & Usoskin, I. G. (2006). Active longitudes, nonaxisymmetric dynamos and phase mixing. *Astronomy and Astrophysics*, 445, 703–714.
- Bigazzi, A., & Ruzmaikin, A. (2004). The Sun's preferred longitudes and the coupling of magnetic dynamo modes. *The Astrophysical Journal*, 604, 944–959.
- Dicke, R. H. (1979). Do solar-type stars have magnetic core? A question of stability. *The Astrophysical Journal*, 228, 898–902.
- Dikpati, M., Cally, P. S., & Gilman P. A. (2004). Linear analysis and nonlinear evolution of two-dimensional global magnetohydrodynamic instabilities in a diffusive tachocline. *The Astrophysical Journal*, 610, 597–615.
- Efimenko, V. M., & Lozitsky, V. G. (2018). Essential features of long-term changes of areas and diameters of sunspot groups in solar activity cycles 12–24. *Advances in Space Research*, 61, 2820–2826.
- Fluri, D. M., & Berdyugina, S. V. (2004). Flip-Flops as observational signatures of different dynamo modes in cool stars. *Solar Physics*, 224, 153–160.
- Hale, G. E., & Nicholson S. B. (1925). The low of Sun-spot polarity. *The Astrophysical Journal*, 62, 270.
- Howe, R. (2009). Solar interior rotation and its variation. *Living Reviews in Solar Physics*, 6(1), 1–75.
- Huvelin, J., Saar, S. H., & Tuominen, I. (1998). Relations between broad-band linear polarization and CA II H and K emission in late-type dwarf stars. *The Astrophysical Journal*, 329, 882–893.
- Jetsu, L., Pelt, J., & Tuominen, I. (1993). Spot and flare activity of *FK Comae Berenices*: Long-term photometry. *Astronomy and Astrophysics*, 278, 449–462.
- Jetsu, L., Pelt, J., Tuominen, I., & Nations, H. L. (1991). The spot activity of *FK Comae Berenices*. In I. Tuominen, D. Moss, & G. Rüdiger (Eds.), *The Sun and Cool Stars: Activity, Magnetism, Dynamos*. Proc. IAU Coll. 130. Vol. 380. *Lecture Notes in Physics* (pp. 381–383). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Jetsu, L., Tuominen, I., Grankin, K. N., Melnikov, S. Yu., & Schevchenko, V. S. (1994). New "flip-flop" of *FK Comae Berenices*. *Astronomy and Astrophysics*, 282, L9–12.
- Korhonen, H., Berdyugina, S. V., & Tuominen, I. (2002). Study of *FK Comae Berenices*. IV. Active longitudes and the "flip-flop" phenomenon. *Astronomy and Astrophysics*, 390, 179–185.

- Korhonen, H., Berdyugina, S. V., Berdyugina, K. S. C., & Tuominen, I. (2001). The first close-up of the "flip-flop" phenomenon in a single star. *Astronomy and Astrophysics*, 379, L30–L33.
- Krivodubskij, V. N. (1984). Intensity of sources of magnetic fields of the solar  $\alpha\omega$ -dynamo. *Soviet Astronomy*, 28(3), 316–320.
- Krivodubskij, V. N. (2001). The structure of the global solar magnetic field excited by the turbulent dynamo mechanism. *Astronomy Reports*, 45(9), 738–745.
- Krivodubskij, V. N. (2005). Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone. *Astronomische Nachrichten*, 326(1), 61–74.
- Krivodubskij, V. N. (2006). Dynamo parameters of the solar convection zone. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 22(1), 1–20.
- Mordvinov, A. V., & Kitchatinov, L. L. (2004). Active longitudes and North-South asymmetry of the activity of the Sun as manifestations of its relic magnetic field. *Astronomy Reports*, 48, 254–260.
- Moss, D. (2004). Dynamo models and the flip-flop phenomenon in late-type stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 352, L17–L20.
- Olah, K., Panov, K. P., Pettersen B. R., Valtaja, E., & Valtaja, L. (1989). Long-lived active longitudes on the spotted RS CVn star  $\sigma$  Germinorum. *Astronomy and Astrophysics*, 218, 192–194.
- Parker, E. N. (1979). *Cosmical Magnetic Fields*. Oxford: Clarendon Press.
- Ruzmaikin, A. A. (1998). Clustering of emerging magnetic flux. *Solar Physics*, 181, 1–101.
- Schwabe, H. (1844). Sonnen-Beobachtungen im Jahre 1843. *Astronomische Nachrichten*, 21(495), 233–236.
- Steinhilber, F., Abreu, J. A., Beer, J., Brunner, I., Christl, M., Fischer, H., Heikkilä, U., Kubik, P. W., Mann, M., McCracken, K. G., Miller, H., Miyahara, H., Oerter, H., & Wilhelm, F. (2012). 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(16), 5967–5971.
- Stix, M. (2002). *The Sun: An Introduction* (2nd ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Usoskin, I. G., Berdyugina, I. G., & Poutanen, J. (2005). Preferred sunspot longitudes: non-axisymmetry and differential rotation. *Astronomy and Astrophysics*, 441, 347–352.
- Wolf, R. (1859). Extract of a letter to Mr. Carrington. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 19, 85–86.
- Wolfer, A. (1897). *Publications of Sternwarte Eidgenössischen Polytechnic School in Zürich*, 1, 1–41.
- Zeilik, M., de Blasi, C., Rhodes, M., Budding, E. (1988). A half-century of starspot activity on SV Camelopardalis. *The Astrophysical Journal*, 332, 293–298.

## References

- Alekseev, I. Y., & Kozhevnikova, A. V. (2017). Long-term variations in the spottedness of *BY Dra* M dwarfs. *Astron. Reports*, 61, 221–232.
- Bassom, A. P., Kuzanyan, K. M., Sokoloff, D., & Soward, A. M. (2005). Non-axisymmetric  $\alpha^2\Omega$ -dynamo waves in thin stellar shells. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 99, 309–336.
- Berdyugina, S. V. (2000). Starspots: A Key to the Stellar Dynamo. *Living Reviews in Solar Physics*, 2(8), 1–62.
- Berdyugina, S. V. (2004). Non-axisymmetric magnetic fields and flip-flops on the Sun and cool stars. *Solar Physics*, 224, 121–131.
- Berdyugina, S. V., & Järvinen, S. P. (2005). Spot activity cycles and flip-flops on young solar analogs. *Astronomische Nachrichten*, 326, 283–286.
- Berdyugina, S. V., & Tuominen, I. (1998). Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars. *Astronomy and Astrophysics*, 336, L25–L28.
- Berdyugina, S. V., & Usoskin, I. G. (2003). Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence. *Astronomy and Astrophysics*, 405, 1121–1128.
- Berdyugina, S. V., Berdyugin, A. V., Ilyin, I., & Tuominen, I. (1999). The active RS Canum Venaticorum binary II Pegasi. IV. The spot activity cycle. *Astronomy and Astrophysics*, 350, 626–634.
- Berdyugina, S. V., Moss, D., Sokoloff, D., & Usoskin, I. G. (2006). Active longitudes, nonaxisymmetric dynamos and phase mixing. *Astronomy and Astrophysics*, 445, 703–714.
- Berdyugina, S. V., Pelt, J., & Tuominen, I. (2002). Magnetic activity in the young solar analog LQ Hydrae. I. Active longitudes and cycles. *Astronomy and Astrophysics*, 394, 505–515.
- Bigazzi, A., & Ruzmaikin, A. (2004). The Sun's preferred longitudes and the coupling of magnetic dynamo modes. *The Astrophysical Journal*, 604, 944–959.
- Dicke, R. H. (1979). Do solar-type stars have magnetic core? A question of stability. *The Astrophysical Journal*, 228, 898–902.
- Dikpati, M., Cally, P. S., & Gilman P. A. (2004). Linear analysis and nonlinear evolution of two-dimensional global magnetohydrodynamic instabilities in a diffusive tachocline. *The Astrophysical Journal*, 610, 597–615.
- Efimenko, V. M., & Lozitsky, V. G. (2018). Essential features of long-term changes of areas and diameters of sunspot groups in solar activity cycles 12–24. *Advances in Space Research*, 61, 2820–2826.
- Fluri, D. M., & Berdyugina, S. V. (2004). Flip-Flops as observational signatures of different dynamo modes in cool stars. *Solar Physics*, 224, 153–160.
- Hale, G. E., & Nicholson S. B. (1925). The low of Sun-spot polarity. *The Astrophysical Journal*, 62, 270.
- Howe, R. (2009). Solar interior rotation and its variation. *Living Reviews in Solar Physics*, 6(1), 1–75.
- Huovalin, J., Saar, S. H., & Tuominen, I. (1998). Relations between broad-band linear polarization and CA II H and K emission in late-type dwarf stars. *The Astrophysical Journal*, 329, 882–893.
- Jetsu, L., Pelt, J., & Tuominen, I. (1993). Spot and flare activity of FK Comae Berenices: Long-term photometry. *Astronomy and Astrophysics*, 278, 449–462.
- Jetsu, L., Pelt, J., Tuominen, I., & Nations, H. L. (1991). The spot activity of FK Comae Berenices. In I. Tuominen, D. Moss, & G. Rüdiger (Eds.). *The Sun and Cool Stars: Activity, Magnetism, Dynamos*. Proc. IAU Coll. 130, Vol. 380, *Lecture Notes in Physics* (pp. 381–383). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Jetsu, L., Tuominen, I., Grankin, K. N., Melnikov, S. Yu., & Schevchenko, V. S. (1994). New "flip-flop" of FK Comae Berenices. *Astronomy and Astrophysics*, 282, L9–L12.
- Kitchatinov, L. L., & Olemskoj, S. V. (2005). Active longitudes of the Sun: rotation period and statistical significance. *Pis'ma v Astronomicheskii Zhurnal*, 31(4), 309–314 [in Russian].
- Korhonen, H., Berdyugina, S. V., & Tuominen, I. (2002). Study of FK Comae Berenices. IV. Active longitudes and the "flip-flop" phenomenon. *Astronomy and Astrophysics*, 390, 179–185.
- Korhonen, H., Berdyugina, S. V., Berdyugina, K. S. C., & Tuominen, I. (2001). The first close-up of the "flip-flop" phenomenon in a single star. *Astronomy and Astrophysics*, 379, L30–L33.
- Krivodubskij, V. N. (2021). Long-term variations of magnetic activity of the Sun. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomija*. 64(2), 26–36 [in Ukrainian].
- Krivodubskij, V. N. (1984). Intensity of sources of magnetic fields of the solar  $\alpha\omega$ -dynamo. *Soviet Astronomy*, 28(3), 316–320.
- Krivodubskij, V. N. (2001). The structure of the global solar magnetic field excited by the turbulent dynamo mechanism. *Astronomy Reports*, 45(9), 738–745.
- Krivodubskij, V. N. (2005). Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone. *Astronomische Nachrichten*, 326(1), 61–74.
- Krivodubskij, V. N. (2021). Long-term variations of magnetic activity of the Sun. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomija*. 64(2), 26–36 [in Ukrainian].
- Krivodubskij, V. N. (2006). Dynamo parameters of the solar convection zone. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 22(1), 1–20.
- Mordvinov, A. V., & Kitchatinov, L. L. (2004). Active longitudes and North-South asymmetry of the activity of the Sun as manifestations of its relic magnetic field. *Astronomy Reports*, 48, 254–260.
- Moss, D. (2004). Dynamo models and the flip-flop phenomenon in late-type stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 352, L17–L20.
- Olah, K., Panov, K. P., Pettersen B. R., Valtaja, E., & Valtaja, L. (1989). Long-lived active longitudes on the spotted RS CVn star  $\sigma$  Germinorum. *Astron. Astrophys.*, (218), 192–194.
- Parker, E. N. (1979). *Cosmical Magnetic Fields*. Oxford: Clarendon Press.
- Ruzmaikin, A. A. (1998). Clustering of emerging magnetic flux. *Solar Physics*, 181, 1–101.
- Schwabe, H. (1844). Sonnen-Beobachtungen im Jahre 1843. *Astronomische Nachrichten*, 21(495), 233–236.
- Steinhilber, F., Abreu, J. A., Beer, J., Brunner, I., Christl, M., Fischer, H., Heikkilä, U., Kubik, P. W., Mann, M., McCracken, K. G., Miller, H., Miyahara, H., Oerter, H., & Wilhelm, F. (2012). 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(16), 5967–5971.
- Stix, M. (2002). *The Sun: An Introduction* (2nd ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Usoskin, I. G., Berdyugina, I. G., & Poutanen, J. (2005). Preferred sunspot longitudes: non-axisymmetry and differential rotation. *Astronomy and Astrophysics*, 441, 347–352.

Vitinskij, Ju. I., Kopecky, M., & Kuklin G. V. (1986). *Statistics of sunspot activity of the Sun*. Nauka [in Russian].

Wolf, R. (1859). Extract of a letter to Mr. Carrington. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 19, 85–86.

Wolfer, A. (1897). *Publications of Sternwarte Eidgenössischen Polytechnic School in Zürich*, 1, 1–41.

Zeilik, M., de Blasi, C., Rhodes, M., Budding, E. (1988). A half-century of starspot activity on SV Camelopardalis. *The Astrophysical Journal*, 332, 293–298.

Отримано редакцією журналу / Received: 27.12.22

Прорецензовано / Revised: 30.01.23

Схвалено до друку / Accepted: 19.09.23

Valery KRIVODUBSKIJ, DSc (Phys. & Math.)

ORCID ID: 0000-0001-7655-8121

e-mail: krivod2@uk.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

## MAGNETO-ACTIVE LONGITUDES IN THE SUN AND STARS

*An overview of studies of long-term increased magnetic activity in two discrete longitudinal intervals observed on the Sun and on the surface of stars of certain types is reviewed. Active longitudes on the Sun were first discovered at the end of the 19th century. Today, as a result of statistical analysis of data observed for more than a century, it has been established that there are two active longitudinal sectors on the solar surface, shifted by approximately 180° relative to each other, which can stably maintain the phase coherence of activity for a long time. At each given moment of time, one of the two longitude intervals are more active (dominant). The occasionally observed "flip-flop" phenomenon, the essence of which consists in a sudden rapid switching of the specified dominance between two active longitudes, is highlighted. The detected phenomenon is regularly repeated, which indicates the existence of stellar magnetic flip-flop cycles. At the same time, solar-type cycles are also characteristic of young analogues of the Sun. On the other hand, based on the study of the evolution of the spot area, a magnetic flip-flop cycle with a duration of about 3.7 years was also detected on the Sun. It is relevant that the ratio of the periods of both types of cycles for young dwarfs and the Sun is the same: the flip-flop cycle is approximately 3–4 times shorter than the cycle of the solar type. That is, the structure and evolution of active longitudes on the Sun is similar to the observed active longitudes on the surface of cold stars that rotate quickly and have outer convective shells. Mechanisms of excitation of magnetically active longitudes proposed by the researchers were analyzed. Dynamo-excitation models of axially asymmetric magnetic harmonics look promising. Our calculations showed that the  $\alpha\Omega$ -dynamo models with the involvement of helioseismological data on the internal rotation of the Sun ensure the coexistence of dipole and quadrupole harmonics of the global magnetic field, which are necessary for the reproduction of selected longitudinal sectors of increased magnetic activity.*

**Keywords:** magnetic activity of the Sun, sunspots, magnetic spotting of stars, "flip-flop" phenomenon, dynamo model of the magnetic cycle.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.