

## ВИПУСК 2(68)

УДК 523.927, 523.98

DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2023.68.37-44>

Ніна КОНДРАШОВА, канд. фіз.-мат. наук

ORCID ID: 0009-0004-8397-9513

e-mail: kondr@mao.kiev.ua

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, Україна

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

ORCID ID: 0000-0001-7655-8121

e-mail: krivod2@uk.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## НЕЗВИЧАЙНА СОНЯЧНА АКТИВНА ОБЛАСТЬ NOAA 13088/13102

**Вступ.** Глибинні флуктуаційні магнітні поля за певних умов призводять до порушень законів Хейла і Джоя спостереженого магнетизму на поверхні Сонця. Ці магнітні флуктуації можуть збуджуватися двома якісно різними механізмами маломасштабного динамо. Перший механізм – це динамо макроскопічної МГД, другий механізм – дифузійне динамо класичної МГД. Важливою відмінністю між двома механізмами є відсоток спостережених антихейлівських груп сонячних плям (щодо загальної кількості плям) у мінімумах сонячних циклів. У випадку першого механізму відсоток антихейлівських груп не залежить від фази циклу, тоді як зазначений відсоток, пов'язаний із другим механізмом, має досягати свого максимального значення в сонячних мінімумах. Для відокремлення мізерних внесків двох названих джерел магнітних флуктуацій дослідники запропонували теоретичний тест, який ґрунтується на статистичному аналізі даних спостережень за тривалі проміжки часу. Згідно із запропонованим тестом відсоток антихейлівських груп плям зростає під час мінімумів циклів, що свідчить на користь дифузійного динамо. З метою підтвердження домінуючого внеску дифузійного динамо у поверхневий магнетизм у нашій роботі досліджено конкретну аномальну активну область поблизу сонячного мінімуму.

**Методи.** Макроскопічна і класична МГД, які вивчають поведінку електромагнітних і гідродинамічних полів у турбулентній плазмі. Аналіз даних телескопічних спостережень поверхневого магнетизму Сонця за тривалі проміжки часу.

**Результати.** Досліджено еволюцію активної області NOAA 13088/13102, яка вперше з'явилася на сонячному диску 24 серпня 2022 року, невдовзі після мінімуму 25-го циклу. Для аналізу використано дані спостережень із приладів, установлених на борту космічних обсерваторій. Виявлено особливість, що полягає у відхиленні поверхневої магнітної конфігурації цієї активної області від закону Хейла магнітної полярності груп плям і закону Джоя нахилу осей біполярних груп до широтного напрямку. Крім того, встановлено, що активна область NOAA 13088/13102 характеризується досить високою спалаховою активністю.

**Висновки.** Ми вважаємо, що знайдені нами магнітні аномалії активної області NOAA 13088/13102 були спричинені впливом магнітних флуктуацій, що збуджуються механізмом глибинного маломасштабного дифузійного динамо, оскільки саме це джерело дає найпомітніший внесок у поверхневий магнетизм поблизу мінімумів циклів. Виявлення і дослідження незвичайних антихейлівських АО з підвищеною еруптивною активністю, подібних до NOAA 13088/13102, може знайти застосування для завбачення періодів небезпечних проявів космічної погоди і для прогнозування динаміки сонячних циклів.

**Ключові слова:** сонячна конвективна зона, магнітні поля, турбулентне динамо, сонячні плями, сонячні спалахи.

**Вступ**

24 серпня 2022 р. на Сонці з'явилася незвичайна біполярна активна область NOAA 13088. Особливість цієї активної області (АО) полягала у відхиленні її спостереженої поверхневої магнітної конфігурації від закону Хейла магнітної полярності груп плям і закону Джоя нахилу осей біполярних груп до широтного напрямку. Згідно із законом Хейла орієнтації магнітної полярності схід-захід (Hale et al., 1919; Hale, & Nicholson, 1925) протягом одного 11-річного циклу в одній півкулі (північній або південній) головні та хвостові плями біполярних магнітних груп завжди мають ті самі протилежні магнітні знаки. З іншого боку екватора знаки головної і хвостової плям виявляються протилежними. Така ситуація зберігається протягом усього поточного циклу, а потім, коли починається новий цикл, знаки плям змінюються на протилежні. У цьому разі осі біполярних груп плям орієнтовані під невеликим кутом до широтного напрямку "схід-захід" так, що західні головні плями містяться в середньому ближче до екватора, ніж східні хвостові плями (закон Джоя орієнтації магнітної полярності північ-південь) (Hale, & Nicholson, 1925). Середній кут нахилу осей біполярних груп становить близько  $4^\circ$ , зростаючи від кількох градусів (для груп поблизу екватора) до  $8\text{--}10^\circ$  для високоширотних груп (Howard, 1991). В поточному 25-му циклі сонячної активності полярність головних плям біполярних груп у північній півкулі згідно із спостереженнями є позитивною, а в південній – негативною. Водночас виявлено кілька відсотків груп плям (від загальної їхньої кількості), які порушували закон Хейла. Такі аномальні АО прийнято називати антихейлівськими, або нерегулярними. Свого часу ще Д. Е. Хейл і С. Б. Нікольсон (Hale, & Nicholson, 1925) у результаті статистичного аналізу біполярних груп плям з 1913 по 1924 р. виявили, що 2,4% спостережених АО не підкорялися встановленому ними закону магнітних полярностей груп плям. В подальших дослідженнях, проведених упродовж майже століття різними авторами на основі статистичного аналізу довгих серій даних спостережень, отримано подібні оцінки відсотків відхилення від закону Хейла: 3,1% (Richardson, 1948), < 5% (Smith, & Howard, 1968), 1,8% (Vitinsky, 1968), 4% (Wang, & Sheeley, 1989), 4,9% (Sokoloff, & Khlystova, 2010), 4% (Stenflo, & Kosovichev, 2012),  $\approx 8\%$  (Li, 2018; Li, & Ulrich, 2012; McClintock, Norton, & Li, 2014), 3% (Zhukova et al., 2020).

Дослідження властивостей антихейлівських областей показали (Richardson, 1948; Stenflo, & Kosovichev, 2012; Li, 2018), що вони можуть бути будь-якого розміру і можуть існувати кілька обертів. Однак у середньому вони менші за розміром і менш стабільні, ніж звичайні біполярні АО, тоді як кути нахилу їхніх осей відносно екватора в цілому більші (Richardson, 1948; Stenflo, & Kosovichev, 2012). У 23-му і 24-му циклах антихейлівські групи плям не підкорялися закону Джоя широтної залежності кута нахилу осей АО відносно екватора (Li, 2018).

© Кондрашова Ніна, Криводубський Валерій, 2023

В останні десятиліття завдяки використанню даних спостережень космічних апаратів отримано докази впливу порушників законів структури поверхневого магнетизму на інші прояви магнітної активності Сонця, зокрема і на магнітний потік (Abramenko, Zhukova, & Kutsenko, 2018; Abramenko, Suleymanova, & Zhukova, 2023) і спалахову активність (Tian, Liu, & Wang, 2002; Tian et al., 2005; Abramenko, 2021; Xu, et al., 2022). Спостережені в 22-му і 23-му сонячних циклах суперактивні АО, що порушували закони Хейла і Джоя, мали набагато сильнішу тенденцію до породження спалахів рентгенівського класу X, сильних протонних подій і сильних магнітних бур (Tian, Liu, & Wang, 2002; Tian et al., 2005). В результаті опрацювання магнітограм 79-ти АО з надзвичайно високою спалаховою ерупцією (отриманих упродовж 23-го і 24-го циклів за допомогою приладів на борту космічних апаратів), виявлено 72 % випадків, коли виникнення сильних спалахів рентгенівського класу X1.0 і поява порушників полярності поверхневого магнетизму були статистично пов'язані (Abramenko, 2021). В роботі (Xu et al., 2022) зауважено, що хоч антихейлівські АО є рідкісними утвореннями, проте у процесі своєї еволюції вони забезпечують достатню магнітну енергію для спалахів. Зазначимо, що виявлено антихейлівську АО, яка виникла з хейлівської АО і стала спалахово дуже продуктивною після цього. З огляду на це, завчасне виявлення порушників законів Хейла і Джоя може служити для завбачення періодів високої спалахової активності, яка спричиняє небезпечні прояви космічної погоди, зокрема і викликає магнітні бурі в земній атмосфері.

Актуальність досліджень великих індивідуальних активних областей із нетиповими властивостями полягає в тому, що такі області спричиняють значний вплив на довготермінову поведінку сонячної активності. Нещодавно в роботі (Nagy et al., 2017) унаслідок моделювання продемонстровано, що сукупний розподіл магнітних полярностей, кутів нахилу і магнітного потоку навіть однієї біполярної магнітної області суттєво впливає на прогнозований розвиток поточного і наступних сонячних циклів, може збільшувати або зменшувати їхню тривалість і амплітуду. Аномальні АО можуть впливати на динаміку великомасштабного магнітного поля та на накопичення магнітного дипольного моменту (Pal et al., 2023).

Актуальність досліджень порушників законів Хейла і Джоя пов'язана також із необхідністю пошуку критеріїв відокремлення мізерних внесків у поверхневий магнетизм, зумовлених глибинними магнітними флуктуаціями. В роботі (Brandenburg, Sokoloff, & Subramanian, 2012) розроблено теоретичний сценарій, що передбачає збудження глибинних магнітних флуктуацій завдяки двом якісно різним механізмам маломасштабного динамо, дія яких прихована в надрах сонячної конвективної зони (СКЗ). Для розділення внесків цих двох джерел запропоновано теоретичний критерій (Sokoloff, & Khlystova, 2010; Sokoloff, Khlystova, & Abramenko, 2015), згідно з яким глибинні маломасштабні магнітні поля за певних умов можуть призвести до порушення законів Хейла і Джоя спостереженого магнетизму на поверхні Сонця. Статистичний аналіз цих порушень дозволяє розділити внески двох джерел магнітних флуктуацій, оскільки вони по-різному змінюються залежно від фази сонячного циклу. У зв'язку із цим набуває важливості виявлення із спостережень магнітних аномалій АО на різних фазах циклу, які служать маркерами механізмів збудження глибинних магнітних флуктуацій.

У цій роботі ми проаналізували еволюцію активної області NOAA 13088/13102, яка служить яскравим взірцем порушень законів Хейла і Джоя і пов'язаної з ними підвищеної спалахової активності. На основі виявлених магнітних аномалій зроблено висновок, що зазначені порушення законів поверхневого магнетизму спричинені глибинними магнітними флуктуаціями, породженими механізмом дифузійного маломасштабного динамо. Зазначено важливість досліджень антихейлівських АО з підвищеною спалаховою ерупцією для прогнозів небезпечних періодів космічної погоди і динаміки сонячних циклів.

Для аналізу використано дані спостережень космічних обсерваторій. Магнітограми повного диска Сонця, зображення континууму та EUV-зображення були отримані на борту космічного апарата the Solar Dynamics Observatory (SDO) (Scherrer et al., 2012) за допомогою приладів the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) і the Atmospheric Imaging Assembly (AIA). Рентгенівські дані одержано на геостационарному експлуатаційному супутнику спостереження за доквіллям Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES).

#### Методи

**Аналіз механізмів виникнення антихейлівської активної області NOAA 13088.** Нині серед дослідників набула поширення концепція, що сонячна магнітна активність зумовлена дією механізму динамо в СКЗ (див. огляд (Charbonneau, 2020)). Однак ототожнення окремих деталей сонячного динамо з поверхневими проявами динамо, доступними для спостережень, залишається дискусійною проблемою. Це пов'язано з тим, що багато важливих деталей дії динамо, прихованих у сонячних глибинах, неможливо спостерігати безпосередньо. Тому дослідники змушені дізнаватися про них, спираючись на непрямі трасери (індикатори) магнітної активності на поверхні Сонця. Зв'язок між конкретними параметрами, важливими для моделей сонячного динамо, і спостереженими індикаторами сонячної магнітної активності може бути досить складним.

Сонячне магнітне поле містить деякі маломасштабні деталі, які навряд чи можна включити у глобальне сонячне магнітне поле, створене традиційними моделями динамо глобального поля на основі спільної дії диференційного обертання та спіральної турбулізованої конвекції (Krause, & Rädler, 1980; Krivodubskij, 2005; Krivodubskij, 2021; Kryvodubskij, 2006; Charbonneau, 2020). Тому для розв'язання зазначеної проблеми в роботі (Brandenburg, Sokoloff, & Subramanian, 2012) розроблено теоретичний сценарій, що передбачає додатковий механізм самозбудження магнітного поля, так зване **маломасштабне динамо**, яке створює маломасштабне магнітне поле. Однак ситуація ускладнюється тим, що у глибинах СКЗ можуть одночасно функціонувати **два якісно різні механізми** збудження маломасштабних полів. Перший механізм забезпечує генерацію маломасштабних магнітних полів  $b$  завдяки взаємодії турбулентних рухів  $u$  з глобальним магнітним полем  $B$  (маломасштабне динамо макроскопічної МГД – МД1) (Krause, & Rädler, 1980; Charbonneau, 2020), тоді як другий механізм викликає самозбудження магнітних флуктуацій  $h$  за рахунок турбулентних пульсацій  $u$  високوپровідної плазми (дифузійне маломасштабне динамо класичної МГД – МД2) (Biermann, & Schlüter, 1951; Zeldovich, Ruzmaikin, & Sokoloff, 1990; Brandenburg, Sokoloff, & Subramanian, 2012). Процес збудження маломасштабного поля  $b$  в межах механізму МД1 описують гідромагнітним рівнянням

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \text{rot}[(U \times b) + (u \times B) + G - v_m \text{rot} b], \quad (1)$$

де  $U$  – швидкість диференційного обертання СКЗ,  $u$  – швидкість турбулентних пульсацій,  $G = u \times b - \langle u \times b \rangle$ ,  $v_m = c^2/4\pi\sigma$  – коефіцієнт магнітної в'язкості,  $\sigma$  – газокінетична електропровідність плазми, кутові дужки  $\langle \rangle$  означають процедуру усереднення за просторовими або часовими масштабами, які значно перевищують кореляційні масштаби довжини або часу турбулентних пульсацій. Амплітуду збуджуваних магнітних флуктуацій  $h$  (у межах механізму МД2) можна оцінити з умови рівнорозподілення густин кінетичної  $\rho u^2/2$  і магнітної  $h^2/8\pi$  енергій маломасштабних пульсацій:

$$\rho u^2/2 \approx h^2/8\pi, \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина плазми.

Мізерні внески цих джерел у поверхневий магнетизм дуже важко розрізнити за допомогою спостережень. Тому для усунення цього ускладнення авторами (Sokoloff, & Khlystova, 2010; Sokoloff, Khlystova, & Abramenko, 2015) запропоновано тест відокремлення внесків двох джерел магнітних флуктуацій на основі статистичного аналізу даних спостережень за тривалі проміжки часу (статистична ймовірнісна модель). Суть нового підходу полягає в тому, що приховані у глибинах маломасштабні магнітні флуктуації можуть за певних умов приводити до невеликої кількості порушень законів Хейла і Джоя, спостережених на поверхні біполярних груп сонячних плям. Статистичний аналіз цих порушень дозволяє виявити відмінності в еволюції спостережуваних проявів двох джерел маломасштабних полів, оскільки внески двох глибинних механізмів маломасштабного динамо в поверхневий магнетизм по-різному змінюються з фазою сонячного циклу. Такою важливою ознакою є поведінка відсотка антихейлівських груп сонячних плям (щодо загальної кількості плям) протягом циклів. У випадку маломасштабного динамо макроскопічної МГД – МД1 відсоток антихейлівських груп не залежить від фази циклу, тоді як відсоток антихейлівських груп, пов'язаних із дифузійним маломасштабним динамо класичної МГД – МД2, має досягати свого максимального значення в сонячних мінімумах. Отже, дослідження варіацій магнітних аномалій дозволяє відокремити мізерні внески двох механізмів маломасштабного динамо в поверхневий магнетизм. У зв'язку із цим набуває актуальності задача виявлення за спостереженнями поверхневих провісників маломасштабного динамо в сонячних глибинах.

На основі статистики активних областей за проміжок часу 1917–2004 рр. автори роботи (Sokoloff, Khlystova, & Abramenko, 2015) виявили, що відсоток антихейлівських областей змінюється з фазою сонячних циклів, досягаючи максимальних значень  $\approx 5\text{--}7\%$  **під час мінімумів циклів**. Подібний результат підтверджено в роботі (Zhukova et al., 2022), в якій дані спостережень для п'яти 11-річних циклів (16–18 і 23, 24) об'єднано в синтетичний цикл. Скомбінований синтетичний цикл містив дані спостережень 14838 активних областей, 367 з яких були антихейлівськими. Протягом циклу відсоток антихейлівських АО становив близько 2,5 %, причому **поблизу сонячного мінімуму** виявлено виражений пік близько 5 %.

В роботах (Sokoloff, & Khlystova, 2010; Sokoloff, Khlystova, & Abramenko, 2015) в результаті опрацювання спостережених даних різних каталогів за період 1920–2004 рр. продемонстровано, що **відсоток антихейлівських груп плям зростає саме під час мінімумів 11-річних циклів сонячної активності**. Важливо, що і зростання порушень закону Джоя властиве саме антихейлівським групам плям. Відповідно до ймовірнісної моделі магнітних полів (Sokoloff, & Khlystova, 2010; Sokoloff, Khlystova, & Abramenko, 2015) збільшення відсотка антихейлівських груп під час сонячних мінімумів **передбачає дифузійне маломасштабне динамо**, оскільки саме цей механізм забезпечує незалежний від фази циклу абсолютний дохід кількості антихейлівських груп. Тому на тлі (фоні) спостереженого зменшення загальної кількості сонячних груп плям під час мінімуму стає помітним збільшення відсотка антихейлівських груп, породжуваних джерелом випадкових магнітних флуктуацій (дифузійного маломасштабного динамо МД2).

В роботі (Stenflo, & Kosovichev, 2012) на основі аналізу біполярних активних областей на магнітограмах Сонця, отриманих у 1995–2011 рр. на борту космічного апарата SOHO, виявлено активні області з протилежною орієнтацією магнітних полярностей і аномальними кутами нахилів їхніх осей до екватора (до  $90^\circ$ ). Дійшли висновку, що спостережені магнітні аномалії зумовлені магнітними флуктуаціями маломасштабного турбулентного динамо.

### Результати

**Аналіз еволюції активної області NOAA 13088/13102.** Активна область NOAA 13088 з'явилася на заході південної півкулі сонячного диска 24 серпня 2022 р. і спостерігалася на диску з 24 по 30 серпня 2022 р. На рис. 1 наведено зображення інтенсивності континууму та магнітограму Сонця, отримані обсерваторією SDO/HMI 24 серпня 2022 р. В поточному 25-му циклі відповідно до закону Хейла магнітна полярність головної плями в південній півкулі має бути негативною (на магнітограмі має розміщуватися праворуч), хвостова пляма позитивної полярності мусить розташовуватися ліворуч. З магнітограми видно, що орієнтація магнітних полярностей плям активної області NOAA 13088 не відповідає цій умові (полярність головної плями виявилася позитивною) і суттєво відрізняється від орієнтації полярностей інших груп плям південної півкулі (які підкоряються закону Хейла). Причому магнітна вісь досліджуваної АО повернута майже на  $90^\circ$  порівняно з осями інших АО (тобто орієнтація полярностей майже ортогональна до екватора). Це свідчить, що активна область NOAA 13088 належить до класу порушників законів Хейла та Джоя. На рис. 2 наведено зображення інтенсивності континууму та магнітограму активної області NOAA 13088 за 26 серпня 2023 р. Видно, що структура області швидко і значно змінювалася із часом. Кількість і площа плям збільшилися. Порівняння магнітограм, отриманих 24 та 26 серпня, показує, що складність її магнітного поля швидко зростала. Якщо на початку спостережень магнітна конфігурація області відносилася до класу  $\beta$ , то 28 серпня вона змінилася на конфігурацію магнітного поля класу  $\beta\gamma$  (див. таблицю). Зображення Сонця на довжині хвилі 17,1 нм, отримані обсерваторією SDO/AIA 25 і 26 серпня 2022 р. (рис. 3), свідчать про складну структуру досліджуваної активної області у короні.

Активна область NOAA 13088 викликала багато еруптивних подій, зокрема і спалахи, струмені та корональні викиди маси. У таблиці наведено щоденну кількість спалахів різних рентгенівських класів і магнітну конфігурацію області. Кількість спалахів, зокрема й потужних, зростала з часом. Якщо 24 серпня відбувалися слабкі спалахи рентгенівсько-

го класу В, то 25 серпня додалися спалахи класів С і М. Їхня кількість і потужність поступово зростала, досягнувши свого максимуму 29–30 серпня, коли магнітна конфігурація групи сонячних плям стала найскладнішою (належала до класу  $\beta\gamma$ ). Найпотужніший в АО спалах класу М8.6 спостерігався 29 серпня ([www.SolarMonitor.org](http://www.SolarMonitor.org))

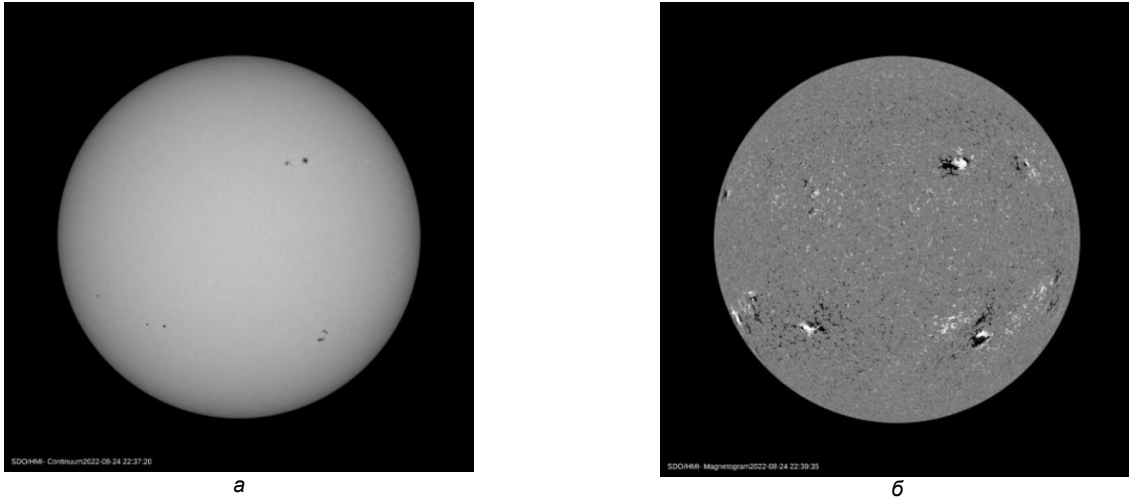


Рис. 1. Інтенсивність континууму Сонця 24 серпня 2022 р. (а), активна область NOAA 13088 з'явилася у південній півкулі Сонця недалеко від західного краю диска; магнітограма Сонця, отримана 24 серпня 2022 р. (б), білий і чорний кольори вказують ділянки позитивної та негативної полярностей магнітного поля, відповідно

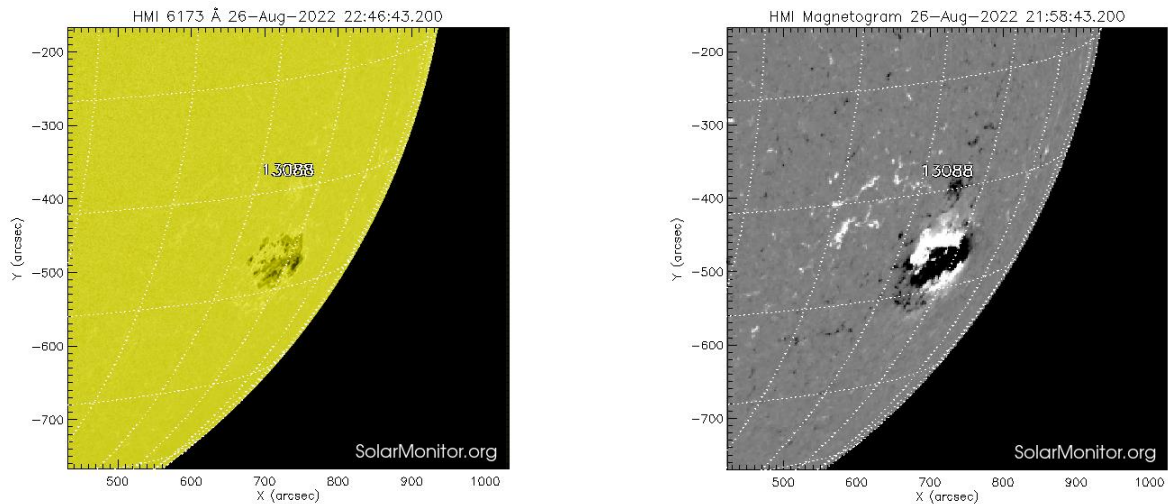


Рис. 2. Інтенсивність континууму і магнітограма сонячної активної області NOAA 13088 26 серпня 2022 р.

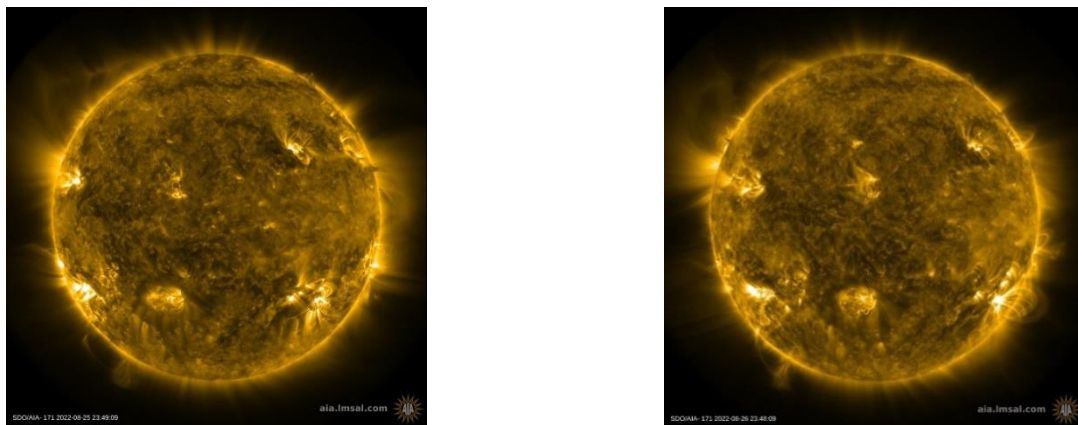


Рис. 3. Зображення Сонця на довжині хвилі 17,1 нм, отримані 25 і 26 серпня 2022 р.

27 серпня обсерваторія SDO зафіксувала ударну хвилю через сонячну атмосферу від спалаху класу M4. Коронаграфи Сонячно-геліосферної обсерваторії (Solar and Heliospheric Observatory) зареєстрували корональний викид маси з місця спалаху. 28 серпня спалах класу M6.7 спричинив корональний викид маси та короткохвильовий блекаут над Америкою. 31 серпня група плям зникла за краєм диска. 5 вересня космічний апарат STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) зафіксував дуже потужний корональний викид маси й ударну хвилю з досліджуваного регіону на зворотному боці Сонця.

Активна область NOAA 13088 повернулася на сонячний диск 13 вересня. Її було перейменовано на NOAA 13102. Магнітограма цієї області за 15 вересня (рис. 4, ліворуч) показує значні зміни структури магнітного поля порівняно з його структурою під час попереднього проходження АО диском Сонця. Полярність головної плями стала негативною (як у інших груп плям південної півкулі Сонця), а кут нахилу області значно зменшився, що свідчить про перехід цієї АО до класу нормальних регулярних груп плям. Конфігурація магнітного поля спростилася до класу  $\beta$ , а спалахова активність зменшилася (див. таблицю). Хоча 18–20 вересня кількість сонячних плям і площа АО трохи збільшилися, проте вони не досягли рівнів активності антихейлівської АО NOAA 13088. На рис. 4 праворуч від магнітограми за 15 вересня наведено магнітограму активної області NOAA 13102 за 19 вересня. Видно, що в області вийшли нові магнітні потоки, які знову викликали незначне посилення спалахової активності АО 20 вересня. Згодом 23 вересня в області відбулася ерупція волокна, яка викликала корональний викид маси зі швидкістю 820 км/с та ударну хвилю. Спостерігався радіосплеск другого типу. Згодом спалахова активність області різко зменшилася. Область зникла за сонячним лімбом 25 вересня.

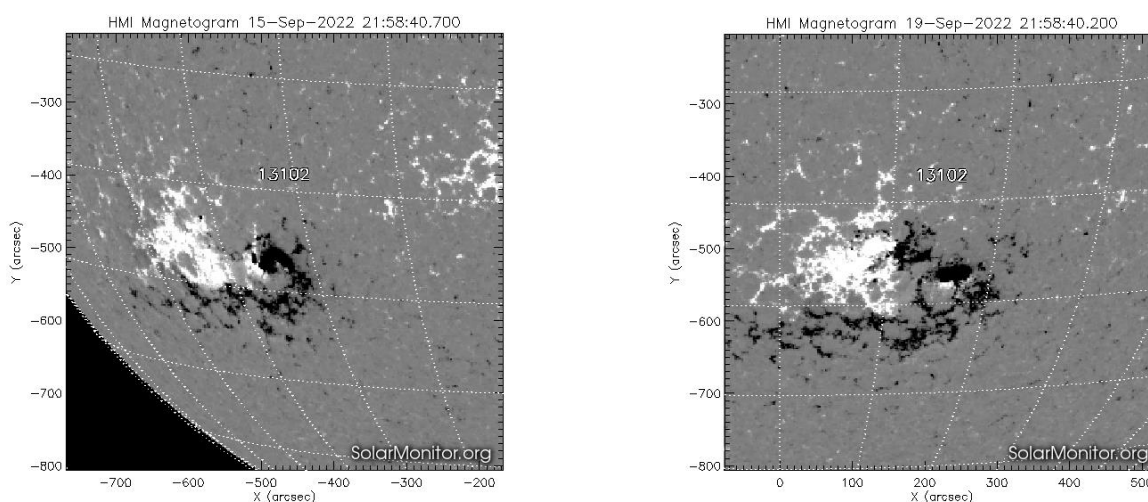


Рис. 4. Магнітограми сонячної активної області NOAA 13102, отримані SDO/HMI 15 і 19 вересня 2022 р.

Таблиця

Кількість спалахів різних рентгенівських класів в активній області NOAA 13088/13102 та її магнітна конфігурація (дані геостационарного супутника GOES, [www.SolarMonitor.org](http://www.SolarMonitor.org))

Дата	Кількість спалахів	Магнітна конфігурація
25.08.22	M – 1, C – 8	$\beta$
26.08.22	M – 3, C – 11	$\beta$
27.08.22	M – 4, C – 15	$\beta$
28.08.22	M – 4, C – 15	$\beta\gamma$
29.08.22	M – 6, C – 13	$\beta\gamma$
30.08.22	M – 7, C – 12	$\beta\gamma$
13.09.22	C – 3	$\beta$
14.09.22	C – 6	$\beta$
15.09.22	C – 3	$\beta$
16.09.22	C – 2	$\beta$
17.09.22	C – 2	$\beta$
18.09.22	C – 10	$\beta$
19.09.22	C – 5	$\beta$
20.09.22	M – 1, C – 7	$\beta$
21.09.22	C – 2	$\beta$
22.09.22	–	$\beta$
23.09.22	C – 3	$\beta$
24.09.22	C – 1	$\beta$
25.09.22	C – 2	$\beta$

Як видно з таблиці, спалахова активність в антихейлівській активній області NOAA 13088 була суттєво вищою, ніж у регулярній області NOAA 13102. Зважаючи на актуальність завбачення періодів підвищених рівнів спалахової ерупції набувають важливості дослідження АО, яким притаманні порушення законів Хейла і Джоя.

#### Дискусія і висновки

Нині актуальною проблемою сонячної активності є пошук спостережених доказів існування недавно теоретично запропонованої нової фізичної сутності – прихованих у сонячних глибинах маломасштабних (флуктуаційних) магнітних полів, що збуджуються двома якісно різними механізмами маломасштабного динамо (Brandenburg, Sokoloff, & Subramanian, 2012). Перший механізм – це маломасштабне динамо макроскопічної МГД – МД1, другий – дифузійне маломасштабне динамо класичної МГД – МД2. Зазначимо, що мізерні внески цих двох механізмів у поверхневий магнетизм дуже важко розрізнити за допомогою спостережень. Вийти із скрутного становища можна, якщо використати статистичну ймовірнісну модель (Sokoloff, & Khlystova, 2010; Sokoloff, Khlystova, & Abramenko, 2015). Згідно із запропонованим критерієм глибинні маломасштабні магнітні поля спричиняють порушення законів Хейла і Джоя біполярних груп сонячних плям. Важливою ознакою відмінностей спостережених проявів впливу двох джерел магнітних флуктуацій служить відсоток антихейлівських груп (щодо загальної кількості плям) у мінімумах сонячних циклів.

У випадку механізму маломасштабного динамо макроскопічної МГД **відсоток** антихейлівських груп не залежить від фази циклу. Це пов'язано з тим, що впродовж циклу зрівноважено відбувається спочатку підсилення (на фазі зростання циклу), а потім виснаження (у разі наближення до мінімуму) двох полів  $b$  і  $B$ . Відповідно до цього будуть **пропорційно змінюватися із часом** абсолютні кількості двох категорій груп плям. Зокрема, у випадку наближення до мінімуму циклу зменшується кількість "неправильних" груп, породжених флуктуаційним полем  $b$ . Однак водночас із цим у мінімумі **зменшується і кількість** "правильних" груп плям, породжених глобальним полем  $B$ . В результаті відсоток антихейлівських груп залишається сталим у часі.

Зауважимо, що **відсоток** антихейлівських груп, пов'язаних із флуктуаційними полями  $h$  механізму дифузійного динамо, в сонячних мінімумах повинен досягати свого максимального значення. Це зумовлено тим, що маломасштабне магнітне поле  $h$ , яке збуджується незалежними від часу турбулентними пульсаціями  $u$ , залишається сталим упродовж циклу, тоді як глобальне тороїдальне магнітне поле  $B$  мусить із необхідністю виснажуватися у разі наближення до мінімуму циклу. Згідно із цим, абсолютна кількість антихейлівських груп, пов'язаних із флуктуаційним полем  $h$ , не залежить від фази циклу. Проте, як уже зазначено вище, в мінімумі циклу кількість "правильних" груп плям зменшується (оскільки в цю епоху виснажується глобальне поле  $B$ ). В результаті відсоток антихейлівських груп (відношення антихейлівські/"правильні" групи) зростає поблизу сонячних мінімумів. Причому в мінімумах має більше спостерігатися і порушників закону Джоя, оскільки останні більшою мірою притаманні саме антихейлівським групам.

З огляду на викладене вище, дослідження спостережених часових варіацій магнітних аномалій поверхневого магнетизму надає унікальну можливість відокремити мізерні внески двох механізмів маломасштабного флуктуаційного динамо в магнітну структуру АО Сонця. Тому набуває актуальності задача виявлення із спостережень поверхневих провідників прихованого в сонячних глибинах маломасштабного динамо. Згідно із статистичними дослідженнями довгих рядів спостережень встановлено, що відсоток антихейлівських груп плям зростає під час мінімумів сонячних циклів (Sokoloff, & Khlystova, 2010; Sokoloff, Khlystova, & Abramenko, 2015), що свідчить на користь дифузійного динамо.

З метою підтвердження домінантного внеску дифузійного динамо у поверхневий магнетизм Сонця у цій роботі ми вивчили еволюцію активної області NOAA 13088/13102, яка спостерігалася незабаром після мінімуму 25-го циклу. Для аналізу використано дані спостережень, отриманих за допомогою приладів the Helioseismic and Magnetic Imager і the Atmospheric Imaging Assembly, установлених на борту космічної обсерваторії the Solar Dynamics Observatory, Geostationary Operational Environmental Satellite. Особливість цієї АО згідно з нашими дослідженнями полягала у відхиленні її спостереженої поверхневої магнітної конфігурації від закону Хейла магнітної полярності груп плям і закону Джоя нахилу осей біполярних груп до широтного напрямку. Ми вважаємо, що виявлені нами аномалії магнітної конфігурації активної області NOAA 13088/13102 були спричинені механізмом дифузійного маломасштабного динамо, оскільки внесок цього джерела у поверхневий магнетизм досягає свого максимального значення саме в мінімумах сонячних циклів. Крім того, дослідженій АО була властива підвищена спалахова активність. Виявлення і дослідження незвичних антихейлівських АО з підвищеною еруптивною активністю, подібних до активної області NOAA 13088/13102, може знайти застосування для завбачення періодів небезпечних проявів космічної погоди і для прогнозування динаміки сонячних циклів.

**Внесок авторів:** Ніна Кондрашова – аналіз еволюції активної області NOAA 13088/13102 на підставі спостережених даних, отриманих за допомогою приладів, установлених на борту космічних обсерваторій; дискусія і висновки. Валерій Криводубський – концептуалізація; теоретичний аналіз перебудови магнетизму в турбулентному середовищі в межах макроскопічної і класичної МГД; аналіз механізмів виникнення антихейлівської активної області NOAA 13088/13102; дискусія і висновки.

**Подяки і джерела фінансування.** Роботу виконано 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

- Abramenko, V. I. (2021). Signature of the turbulent component of the solar dynamo on active region scales and its association with flaring activity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507, 3698–3706.
- Abramenko, V. I., Suleymanova, R. A., & Zhukova, A. V. (2023). Magnetic fluxes of solar active regions of different magneto-morphological classes: I. Cyclic variations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518, 746–775.
- Abramenko, V. I., Zhukova, A. V., & Kutsenko, A. S. (2018). Contributions from different-type active regions into the total solar unsigned magnetic flux. *Geomagnetism and Aeronomy*, 58, 1159–1169.
- Biermann, L., & Schlüter, A. (1951). Cosmic radiation and cosmic magnetic fields. II. Origin of cosmic magnetic fields. *Physical Review*, 82, 863–868.
- Brandenburg, A., Sokoloff, D., & Subramanian, K. (2012). Current status of turbulent dynamo theory. From large-scale to small-scale dynamos. *Space Science Reviews*, 169, 123–159.
- Charbonneau, P. (2020). Dynamo Models of the Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 7, 1–104.

- Hale, G. E., Ellerman, F., Nicholson, S. B., & Joy, A. H. (1919). The magnetic polarity of sun-spots. *The Astrophysical Journal*, 49, 153–186.
- Hale, G. E., & Nicholson, S. B. (1925). The low of sun-spot polarity. *The Astrophysical Journal*, 62, 270.
- Howard, R. F. (1991). Axial tilt angles of sunspot groups. *Solar Physics*, 136, 251–262.
- Khlystova, A. I., & Sokoloff, D. D. (2009). Toroidal magnetic field of the Sun from data on Hale-rule-violating sunspot groups. *Astronomy Reports*, 53(3), 281–285.
- Krause, F., & Rädler, K.-H. (1980). *Mean Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory*. Oxford: Pergamon Press, Ltd.
- Krivodubskij, V. N. (2005). Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone. *Astronomische Nachrichten*, 326, 61–74.
- Krivodubskij, V. N. (2021). Role of rotational radial magnetic advection in possible explaining a cycle with two peaks. *Advances in Space Research*, 68, 3943–3955.
- Kryvodubskiy, V. N. (2006). Dynamo parameters of the solar convection zone. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 22, 1–20.
- Li, J. (2018). A systematic study of Hale and anti-Hale sunspot physical parameters. *The Astrophysical Journal*, 867, id. 89, 16.
- Li, J., & Ulrich, R. K. (2012). Long-term measurements of sunspot magnetic tilt angles. *The Astrophysical Journal*, 758, id. 115, 12.
- McClintock, B. H., Norton, A. A., & Li, J. (2014). Re-examining sunspot tilt angle to include anti-hale statistics. *The Astrophysical Journal*, 797, id.130, 10.
- Nagy, M., Lemerle, A., Labonville, F., Petrovay, K., & Charbonneau, P. (2017). The effect of "rogue" active regions on the solar cycle. *Solar Phys.*, 292(11), id. 167, 22.
- Pal, S., Bhowmik, P., Mahajan, S. S., & Nandy, D. (2023). Impact of anomalous active regions on the large-scale magnetic field of the Sun, *eprint arXiv:2305.13145*, 19.
- Richardson, R. S. (1948). Sunspot groups of irregular magnetic polarity. *The Astrophysical Journal*, 107, 78–93.
- Scherrer, P. H., Schou, J., Bush, R. I., Kosovichev, A. G., Bogart, R. S., Hoeksema, J. T., Liu, Y., Duvall, T. L., Zhao, J., Title, A. M., Schrijver, C. J., Tarbell, T. D., & Tomczyk, S. (2012). The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics*, 275, 207–227.
- Smith, S. F., & Howard, R. (1968). Magnetic classification of active regions. In: Kiepenheuer, K. O. (ed.) *Structure and Development of Solar Active Regions*. *IAU Symposium*, 35, 33.
- Sokoloff, D., & Khlystova, A. (2010). The solar dynamo in the light of the distribution of various sunspot magnetic classes over butterfly diagram. *Astronomische Nachrichten*, 331, 82–87.
- Sokoloff, D., Khlystova, A., & Abramenko, V. (2015). Solar small-scale dynamo and polarity of sunspot groups. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451, 1522–1527.
- Stenflo, J. O., & Kosovichev, A. G. (2012). Bipolar magnetic regions on the Sun: global analysis of the SOHO/MDI data set. *The Astrophysical Journal*, 745(129), id. 129, 12.
- Tian, L., Liu, Y., & Wang, J. (2002). The most violent super-active regions in the 22nd and 23rd cycles. *Solar Physics*, 209(2), 361–374.
- Tian, L., Alexander, D., Liu, Y., & Yang, J. (2005). Magnetic twist and writhe of  $\delta$  active regions. *Solar Physics*, 229(1), 63–77.
- Vitinsky, Y. I. (1968). On sunspot groups with irregular magnetic polarities. *Byulleten Solnechnye Dannye*, 9, 86.
- Wang, Y.-M., & Sheeley, J. N. R. (1989). Average properties of bipolar magnetic regions during sunspot cycle-21. *Solar Physics*, 124, 81–100.
- Xu, Zh., Yan, X., Yang, L., Xue, Zh., Wang, J., & Qin, Y. (2022). Evolution of an emerging anti-Hale region and its associated eruptive solar flares in NOAA AR 12882. *The Astrophysical Journal Letters*, 937, id. L11, 9.
- Zeldovich, Y. B., Ruzmaikin, A. A., & Sokoloff, D. D. (1990). *The Almighty Chance*. *World Scientific Lecture Notes in Physics*. World Scientific Publication.
- Zhukova, A., Khlystova, A., Abramenko, V., & Sokoloff, D. (2020). A catalog of bipolar active regions violating the Hale polarity law, 1989–2018. *Solar Physics*, 295, id.165, 18.
- Zhukova, A., Khlystova, A., Abramenko, V., & Sokoloff, D. (2022). Synthetic solar cycle for active regions violating the Hale's polarity law. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512, 1365–1370.

#### References

- Abramenko, V. I. (2021). Signature of the turbulent component of the solar dynamo on active region scales and its association with flaring activity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507, 3698–3706.
- Abramenko, V. I., Suleymanova, R. A., & Zhukova, A. V. (2023). Magnetic fluxes of solar active regions of different magneto-morphological classes: I. Cyclic variations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518, 746–7454.
- Abramenko, V. I., Zhukova, A. V., & Kutsenko, A. S. (2018). Contributions from different-type active regions into the total solar unsigned magnetic flux. *Geomagnetism and Aeronomy*, 58, 1159–1169.
- Biermann, L., & Schlüter, A. (1951). Cosmic radiation and cosmic magnetic fields. II. Origin of cosmic magnetic fields. *Physical Review*, 82, 863–868.
- Brandenburg, A., Sokoloff, D., & Subramanian, K. (2012). Current status of turbulent dynamo theory. From large-scale to small-scale dynamos. *Space Science Reviews*, 169, 123–159.
- Charbonneau, P. (2020). Dynamo Models of the Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 7, 1–104.
- Hale, G. E., Ellerman, F., Nicholson, S. B., & Joy, A. H. (1919). The magnetic polarity of sun-spots. *The Astrophysical Journal*, 49, 153–186.
- Hale, G. E., & Nicholson, S. B. (1925). The low of sun-spot polarity. *The Astrophysical Journal*, 62, 270.
- Howard, R. F. (1991). Axial tilt angles of sunspot groups. *Solar Physics*, 136, 251–262.
- Khlystova, A. I., & Sokoloff, D. D. (2009). Toroidal magnetic field of the Sun from data on Hale-rule-violating sunspot groups. *Astronomy Reports*, 53(3), 281–285.
- Krause, F., & Rädler, K.-H. (1980). *Mean Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory*. Oxford: Pergamon Press, Ltd.
- Krivodubskij, V. N. (2005). Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone. *Astronomische Nachrichten*, 326, 61–74.
- Krivodubskij, V. N. (2021). Role of rotational radial magnetic advection in possible explaining a cycle with two peaks. *Advances in Space Research*, 68, 3943–3955.
- Kryvodubskiy, V. N. (2006). Dynamo parameters of the solar convection zone. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 22, 1–20.
- Li, J. (2018). A systematic study of Hale and anti-Hale sunspot physical parameters. *The Astrophysical Journal*, 867, id.89, 16.
- Li, J., & Ulrich, R. K. (2012). Long-term measurements of sunspot magnetic tilt angles. *The Astrophysical Journal*, 758, id.115, 12.
- McClintock, B. H., Norton, A. A., & Li, J. (2014). Re-examining sunspot tilt angle to include anti-hale statistics. *The Astrophysical Journal*, 797, id.130, 10.
- Nagy, M., Lemerle, A., Labonville, F., Petrovay, K., & Charbonneau, P. (2017). The effect of "rogue" active regions on the solar cycle. *Solar Phys.*, 292(11), id. 167, 22.
- Pal, S., Bhowmik, P., Mahajan, S. S., & Nandy, D. (2023). Impact of anomalous active regions on the large-scale magnetic field of the Sun, *eprint arXiv:2305.13145*, 19.
- Richardson, R. S. (1948). Sunspot groups of irregular magnetic polarity. *The Astrophysical Journal*, 107, 78–93.
- Scherrer, P. H., Schou, J., Bush, R. I., Kosovichev, A. G., Bogart, R. S., Hoeksema, J. T., Liu, Y., Duvall, T. L., Zhao, J., Title, A. M., Schrijver, C. J., Tarbell, T. D., & Tomczyk, S. (2012). The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics*, 275, 207–227.
- Smith, S. F., & Howard, R. (1968). Magnetic classification of active regions. In: Kiepenheuer, K. O. (ed.) *Structure and Development of Solar Active Regions*. *IAU Symposium*, 35, 33.
- Sokoloff, D., & Khlystova, A. (2010). The solar dynamo in the light of the distribution of various sunspot magnetic classes over butterfly diagram. *Astronomische Nachrichten*, 331, 82–87.
- Sokoloff, D., Khlystova, A., & Abramenko, V. (2015). Solar small-scale dynamo and polarity of sunspot groups. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451, 1522–1527.
- Stenflo, J. O., & Kosovichev, A. G. (2012). Bipolar magnetic regions on the Sun: global analysis of the SOHO/MDI data set. *The Astrophysical Journal*, 745(129), id. 129, 12.
- Tian, L., Liu, Y., & Wang, J. (2002). The most violent super-active regions in the 22nd and 23rd cycles. *Solar Physics*, 209(2), 361–374.
- Tian, L., Alexander, D., Liu, Y., & Yang, J. (2005). Magnetic twist and writhe of  $\delta$  active regions. *Solar Physics*, 229(1), 63–77.
- Vitinsky, Y. I. (1968). On sunspot groups with irregular magnetic polarities. *Byulleten Solnechnye Dannye*, 9, 86.
- Wang, Y.-M., & Sheeley, J. N. R. (1989). Average properties of bipolar magnetic regions during sunspot cycle-21. *Solar Physics*, 124, 81–100.
- Xu, Zh., Yan, X., Yang, L., Xue, Zh., Wang, J., & Qin, Y. (2022). Evolution of an emerging anti-Hale region and its associated eruptive solar flares in NOAA AR 12882. *The Astrophysical Journal Letters*, 937, id. L11, 9.

- Zeldovich, Y. B., Ruzmaikin, A. A., & Sokoloff, D. D. (1990). *The Almighty Chance. World Scientific Lecture Notes in Physics*. World Scientific Publication.
- Zhukova, A., Khlystova, A., Abramenko, V., & Sokoloff, D. (2020). A catalog of bipolar active regions violating the Hale polarity law, 1989–2018. *Solar Physics*, 295, id. 165, 18.
- Zhukova, A., Khlystova, A., Abramenko, V., & Sokoloff, D. (2022). Synthetic solar cycle for active regions violating the Hale's polarity law. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512, 1365–1370.

Отримано редакцією журналу / Received: 31.07.23

Прорецензовано / Revised: 28.08.23

Схвалено до друку / Accepted: 19.12.23

Nina KONDRASHOVA, PhD (Phys. & Math.)  
ORCID ID: 0009-0004-8397-9513  
e-mail: kondr@mao.kiev.ua  
Main Astronomical Observatory of NAS, Kyiv, Ukraine

Valery KRIVODUBSKIJ, DSc (Phys. & Math.)  
ORCID ID: 0000-0001-7655-8121  
e-mail: krivod2@uk.net  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

## UNUSUAL SOLAR ACTIVE REGION NOAA 13088/13102

**Background.** Under certain conditions, deep fluctuating magnetic fields lead to violations of Hale's and Joy's laws of observed magnetism on the surface of the Sun. These magnetic fluctuations can be excited by two qualitatively different mechanisms of a small-scale dynamo. The first mechanism is a macroscopic MHD dynamo, while the second mechanism is a classical MHD diffusion dynamo. An important difference between the two mechanisms is the percentage of observed anti-Hale sunspot groups (relative to the total number of sunspots) in solar cycle minima. In the case of the first mechanism, the percentage of anti-Hale groups does not depend on the phase of the cycle, while the specified percentage associated with the second mechanism should reach its maximum value in solar minima. To separate the minor contributions of the two named sources of magnetic fluctuations, the researchers proposed a theoretical test based on statistical analysis of observational data over long periods of time (Sokoloff, & Khlystova, 2010). According to the proposed test, the percentage of anti-Hale groups of spots increases during the minima of the cycles, which indicates the favor of the diffusion dynamo. In order to confirm the dominant contribution of the diffusion dynamo to the surface magnetism, this work investigates a specific anomalous active region near the solar minimum.

**Methods.** Macroscopic and classical MHD, which study the behavior of electromagnetic and hydrodynamic fields in turbulent plasma. Analysis of data from observations of the surface magnetism of the Sun.

**Results.** We investigated the evolution of the NOAA 13088/13102 active region observed on August 24, 2022, shortly after the cycle 25 minimum. For the analysis, data from observations using instruments installed on board space observatories were used. A feature was revealed, which consists in the deviation of the surface magnetic configuration of this active region from Hale's law of the magnetic polarity of groups of spots and Joy's law of the inclination of the axes of bipolar groups to the latitudinal direction. In addition, it was established that the active region of NOAA 13088/13102 is characterized by rather high flare activity.

**Conclusions.** We believe that the magnetic anomalies of the active region of NOAA 13088/13102 that we found were caused by the influence of magnetic fluctuations excited by the mechanism of the deep small-scale diffusion dynamo, since it is this source that gives the most noticeable contribution to the surface magnetism near the cycle minima. The detection and study of unusual anti-Hale's AOs with increased eruptive activity, similar to NOAA 13088/13102, may find application in predicting periods of dangerous manifestations of space weather and in forecasting the dynamics of solar cycles.

**Keywords:** solar convective zone, magnetic fields, turbulent dynamo, sunspots, solar flares.

Автори заявляють 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 authors declare 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; or in the decision to publish the results.