

МАГНІТНА СКЛАДНІСТЬ АКТИВНИХ ДІЛЯНОК ПРОТЯГОМ 23–24 СОНЯЧНИХ ЦИКЛІВ

О. А. Баран^{ORCID}, А. І. Присяжний^{ORCID}, М. М. Ковальчук^{ORCID}

*Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія 8, м. Львів, 79005, Україна,
e-mails: oleksandra.baran@lnu.edu.ua, andrii.prysiashnyi@lnu.edu.ua, marmyr.kovalchuk@gmail.com*

(Отримано 30 листопада 2021 р.; в остаточному вигляді — 29 грудня 2021 р.; прийнято до друку — 04 січня 2022 р.;
опубліковано онлайн — 11 лютого 2022 р.)

У роботі досліджено розподіл за магнітною складністю активних ділянок (АД) протягом 1996–2019 рр. (23–24 сонячні цикли). Опрацьовано дані про класи АД згідно з гейлівською класифікацією, що доступні на сайті Геліофізичної інтегрованої обсерваторії HELIO (www.helio-vo.eu).

Проведено розділення класів АД на однополярну й біполярну, а також на просту й комплексну групи класів. Досліджено зміни магнітних конфігурацій під час розвитку кожної ділянки. Розраховано щоденні сумарні площі АД кожного класу складності та проаналізовано їхні річні значення на різних фазах сонячного циклу. Визначено відносну тривалість складних магнітних конфігурацій для кожної АД комплексної групи. Проведено порівняння кількості таких ділянок і тривалості складної магнітної конфігурації в них у періоди максимальної сонячної активності 23-го і 24-го циклів.

Показано, що характеристики ділянок різних груп суттєво варіюють протягом сонячного циклу. Знайдено схожість у зміні річної сумарної площі АД протягом двох циклів окремо для уніполярних та біполярних груп, причому еволюція цих груп відрізняється. Відмінність 23-го і 24-го циклів, яка проявляється насамперед у різниці кількості та сумарної площі всіх АД на фазі максимуму сонячної активності, виявлена також під час аналізу еволюції простих і комплексних класів.

Ключові слова: сонячний цикл, активні ділянки, полярність сонячних плям, магнітні конфігурації, гейлівські класи.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.26.1901>

ВСТУП

Протягом 11-річного циклу ми спостерігаємо на Сонці АД різних розмірів, форм і магнітних конфігурацій. Ще в 1919 р. Гейл [1] увів таку класифікацію: до класу α віднесли ділянки, що містять одиночну пляму чи групу плям однієї полярності, β – ділянки з двох плям чи групи плям протилежної полярності, γ – складні ділянки з плямами змішаної полярності. Ранні дослідження [2] засвідчили відсутність кореляції між розподілом АД за гейлівськими класами та фазою сонячного циклу. У роботі [3] запропоновано додатковий клас δ для позначення магнітної складності ділянок, у яких принаймні одна пляма містить протилежні полярності в півтіні на відстані не більше 2° в геліографічних координатах.

Сучасна гейлівська (маунт-вільсонівська) класифікація наведена в [4], де виділені класи α , β , $\beta\gamma$, γ , δ ; АД у визначений момент може бути віднесена до конкретного класу або комбінації класів, наприклад β чи $\beta\gamma\delta$.

Виявлено, що складніші класи АД корелюють із підвищеною спалаховою активністю [5–11].

У роботі [12] автори дослідили зміни кількості АД різних гейлівських класів протягом сонячного циклу, погрупувавши класи магнітної складності на уніполярні (всі α) і біполярні (всі β), а також на прості (включає класи α і β) та комплексні ($\beta\gamma$, $\beta\delta$, $\beta\gamma\delta$,

γ , $\gamma\delta$). Знайдено, що найбільша кількість ділянок зі складною магнітною конфігурацією (АД, магнітна складність яких відповідає класам комплексної групи) досягається в той же рік, що й максимум загальної кількості; максимальну кількість простих конфігурацій спостерігаємо на 1–2 роки раніше. Подібні результати отримані в [13]; автори припускають, що такий процес формування АД пов'язаний із домінуванням на різних фазах сонячного циклу великомасштабного чи дрібномасштабного динамо. У роботі [14] АД поділені на регулярні групи (з ведучою плямою, що переважає над хвостовою плямою) та нерегулярні групи сонячних плям і поодинокі плями; показано, що основний внесок у розвиток циклу дають саме регулярні активні області.

У дослідженні [12] автори вибрали для аналізу класи магнітної складності в момент найбільшої площі АД, а в [13] – щоденні кількості АД певних класів. Тобто в цих роботах не розглядали змін магнітної конфігурації окремих ділянок у процесі їх розвитку. З огляду на це ми вважаємо доцільним також проаналізувати площу, яку займають АД різних груп, і час, протягом якого спостерігалися відповідні конфігурації під час розвитку кожної ділянки. Отже, маємо на меті глибше дослідити еволюцію магнітної складності в окремих АД і порівняти її зміни для різних груп класів протягом 23–24-го сонячних циклів.



I. СПОСТЕРЕЖУВАНИЙ МАТЕРІАЛ

Із метою дослідження змін магнітної складності активних ділянок ми проаналізували щоденні дані зі сайту Геліофізичної інтегрованої обсерваторії HELIO (www.helio-vo.eu), а саме: 1) кількість днів, протягом яких спостерігали конкретну АД; 2) клас згідно з гейлівською класифікацією, до якого віднесли ділянку в конкретний день (у різні дні клас АД змінюється залежно від модифікації структури її магнітного поля); 3) щоденні площі ділянок.

Протягом періоду від січня 1996 р. до грудня 2019 р., що вкладається в часові межі 23–24-го циклів, на Сонці спостерігали 4820 АД, тобто 33839 варіантів щоденної магнітної складності. Ці варіанти магнітної складності відповідають таким гейлівським класам: α , $\alpha\gamma$, $\alpha\delta$, $\alpha\gamma\delta$, $\alpha\delta$ — уніполярна група (28.38% від загальної кількості); β , $\beta\gamma$, $\beta\gamma\delta$, $\beta\delta$ — біполярна група (71.58%); γ , $\gamma\delta$ — мультиполярна група (0.04%). Класів мультиполярної групи γ (NOAA AR 08485) і $\gamma\delta$ (NOAA AR 08210, 08948, 09087, 09283, 10397) не враховували під час подальшого аналізу через незначну відносну кількість таких магнітних конфігурацій (за аналогією з роботою [13], однак ми не виключали із розрахунків дані, що відповідають класу $\beta\delta$).

У масиві даних, використаних у цій роботі, для певних активних ділянок відсутня інформація стосовно їхнього гейлівського класу в певні дні: 2001.9.3, 2002.1.15–16, 2002.3.13–16, 2002.5.22–26, 2004.5.30, 2012.3.5–7, 2012.4.16–17, 2013.7.17. Ці некоректні дані виключено із подальшого аналізу.

Аналогічно до робіт [12, 13] ми виділили біполярну комплексну групу класів ($\beta\gamma$, $\beta\gamma\delta$, $\beta\delta$); далі класи цієї групи ми називаємо комплексними, а інші — простими.

II. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Загальна картина змін протягом сонячного циклу кількості АД, їхньої тривалості життя та магнітної складності відповідно до класу схематично показана на рис. 1. Тут кожна вертикальна смужка відповідає окремій АД, ілюструє тривалість життя цієї ділянки та еволюцію її магнітної складності — довжина смужки відповідає кількості днів, протягом яких спостерігалась відповідна ділянка; кольори на смужці свідчать про різні класи. Бачимо, що в процесі розвитку АД часто відбувається зміна їхнього класу.

На діаграмах помітно, що в максимальних фазах 23-го та 24-го циклів не лише збільшується кількість АД, а й відбувається різке ускладнення їхньої магнітної конфігурації (це проявляється в зміні кольорів порівняно з кольорами для років на фазі зростання циклу та фазі його загасання). Також треба зазначити, що кількість АД у 24-му циклі суттєво менша, ніж у попередньому 23-му циклі.

Раніше в роботі [13] автори підсумовували щоденні дані щодо кількості окремих класів АД. Так врахову-

вали всі класи, до яких належала кожна ділянка щодня протягом спостереження її на диску Сонця, тобто об'єднано інформацію про тривалість життя та магнітну складність АД. Ми ж використали для аналізу щоденні значення площ АД. Аналогічно до [13] ми підсумовували значення площ усіх спостережуваних АД конкретної групи класів для кожного дня протягом року. У результаті отримано річні сумарні площі АД уніполярних та біполярних груп і побудовано графіки, що відображають їхні зміни від 1996 р. до 2019 р. (рис. 2).

Бачимо, що річні сумарні площі всіх АД у 23-му циклі досягають максимальних значень у 2002 р., у 24-му циклі — у 2014 р. Сумарна площа АД в період максимуму сонячної активності 24-го циклу суттєво менша, ніж у період максимуму попереднього 23-го циклу. Ділянки уніполярної групи займають більшу сумарну площу на фазі зростання до максимуму. Графік сумарної площі АД біполярної групи приблизно повторює хід відповідного графіка для всіх ділянок. У 23-му циклі максимальні значення площ для біполярної групи понад 1.5 раза більші, ніж у слабшому 24-му; для уніполярної групи таке відношення дещо менше — 1.4.

Аналогічно ми порівняли хід графіків річних сумарних площ АД простих і комплексних класів (рис. 3). Можна відзначити, що в період максимуму сонячної активності переважає сумарна площа АД комплексних груп, у період мінімуму більшою є сумарна площа АД простих груп. Проте хід обох графіків в 23-му і 24-му циклах суттєво відрізняється. У 23-му циклі спостерігаємо значно більші сумарні площі АД простих і комплексних груп порівняно з відповідними площами у 24-му циклі. У 23-му циклі максимум сумарної площі АД простої групи спостерігаємо на рік швидше, ніж для комплексної групи; графік для простих класів має подвійний пік (у 2000 р. і вдвічі нижчий — у 2002 р.) зі зменшенням сумарної площі АД у 2001 р.; для комплексних класів у 2000–2001 рр. спостерігаємо різке збільшення сумарної площі АД до максимального значення. У 24-му циклі сумарні площі АД в обох групах досягають найбільших значень одночасно, проте хід відповідних графіків суттєво відрізняється: для простої групи маємо більш-менш плавне збільшення сумарної площі АД до максимального значення у 2014 р.; для комплексної групи у 2010–2011 рр. відбувається її різке збільшення до першого пікового значення, і пізніше, у 2014 р., бачимо наступний, дещо вищий пік (проте вдвічі нижчий, ніж у 23-му циклі).

Далі ми визначили, якого найвищого класу магнітної складності досягла кожна АД у процесі свого розвитку. На рис. 4 наведено гістограми розподілу АД за їхнім найвищим гейлівським класом, прономовані на сумарну кількість ділянок для кожного року. Легко бачити, що характер гістограм суттєво відрізняється для різних фаз сонячного циклу: в період мінімуму сонячної активності суттєво переважає проста група (89–100%), у період максимуму сонячних циклів співвідношення між класами змінюється

— переважає комплексна група (найбільше значення у 23-му циклі — 83% у 2001 р., у 24-му циклі — 58% у 2013 р.). Схожу картину бачимо, якщо розглядаємо розподіл АД за їхнім гейлівським класом у день

досягнення ними найбільшої площі, як це зроблено в роботі Джеглі та Нортон [12]. Отже, найвища складність досягається приблизно тоді, коли АД займає найбільшу площу.

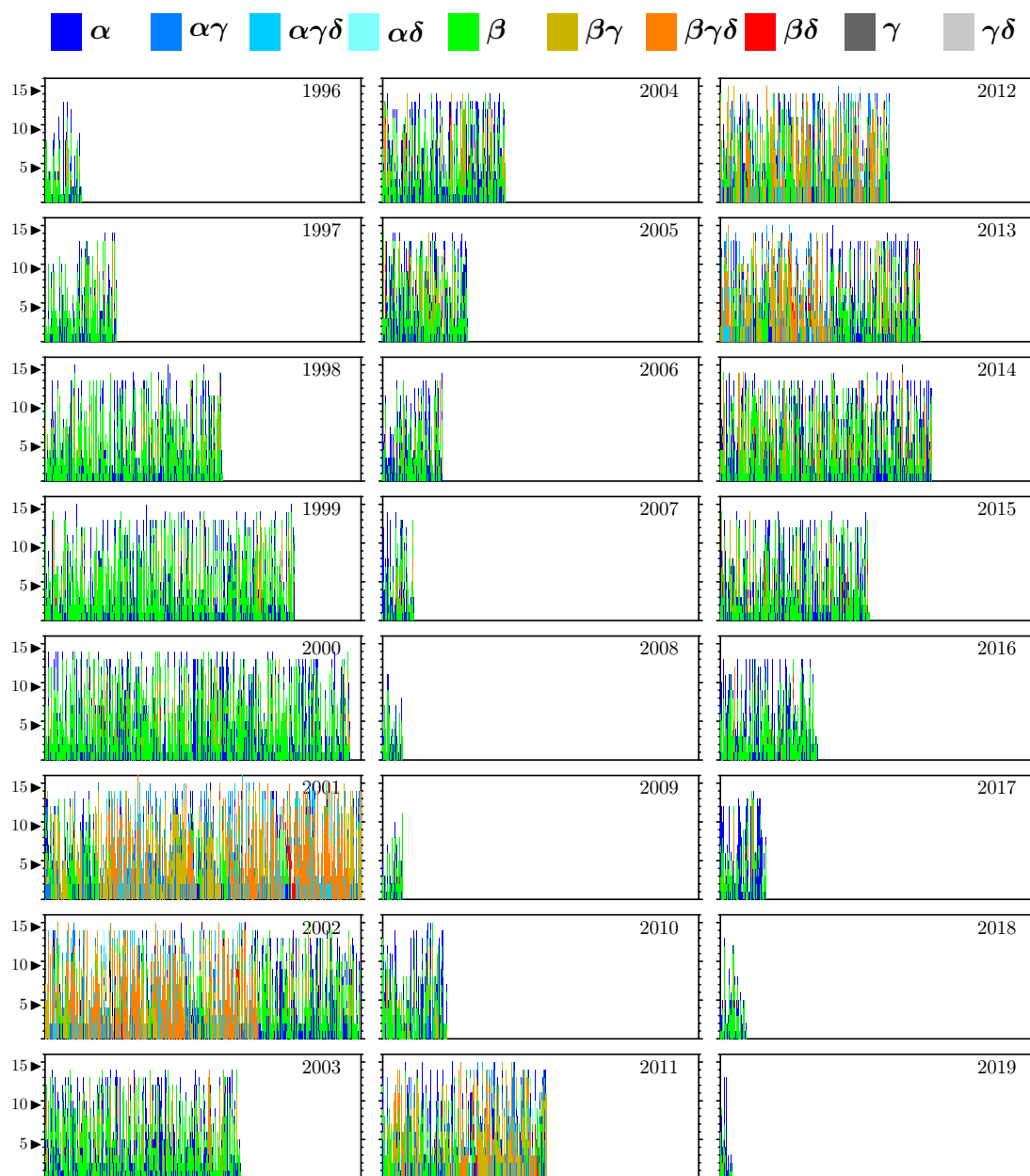


Рис. 1. Еволюція магнітної складності активних ділянок на Сонці протягом 23–24-го сонячних циклів (за даними www.helio-vo.eu). Кожна вертикальна кольорова смужка ілюструє зміни магнітної складності однієї з АД. Смужки розташовані по осі абсцис за порядком виникнення цих ділянок на Сонці (крайня ліва смужка на кожній із діаграм відповідає першій АД, яку спостерігали в конкретному році). По осі ординат узказано номери днів, протягом яких спостерігали АД, короткими чорними стрілками показано відповідні відрізки на рисунку. Відповідність кольорів гейлівським класам показано на рисунку зверху. Чорним кольором позначено некоректні дані (див. текст)

Fig. 1. Evolution of the magnetic complexity of active regions on the Sun during solar cycles 23–24 (according to www.helio-vo.eu). Each vertical color bar illustrates changes in the magnetic complexity of a particular AR. The bars are located along x-axis in order of emergence of the regions on the Sun (the leftmost bar on each diagram corresponds to the first AR which was observed in a particular year). Y-axis indicates the number of days during which the AR was observed, short black arrows point to the corresponding segments in the figure. The correspondence of colors to Hale classes is shown at the top. Incorrect data (see text) is marked in black

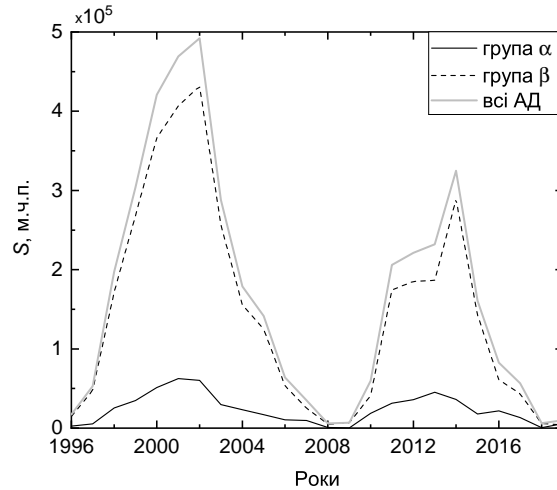


Рис. 2. Графіки зміни річної сумарної площі S , вираженої у мільйонних частках півсфери (м.ч.п.), для АД уніполярної (суцільна чорна лінія) і біполярної груп (штрихована чорна лінія) протягом 23–24-го сонячних циклів; для порівняння на рисунку подано аналогічний графік для всіх АД (суцільна сіра лінія)

Fig. 2. Graphs of changes in the yearly total area S , expressed in millionths of hemisphere, for ARs of the unipolar (solid black line) and the bipolar group (dashed black line) during solar cycles 23–24; for comparison, a similar graph for all ARs is shown (solid gray line)

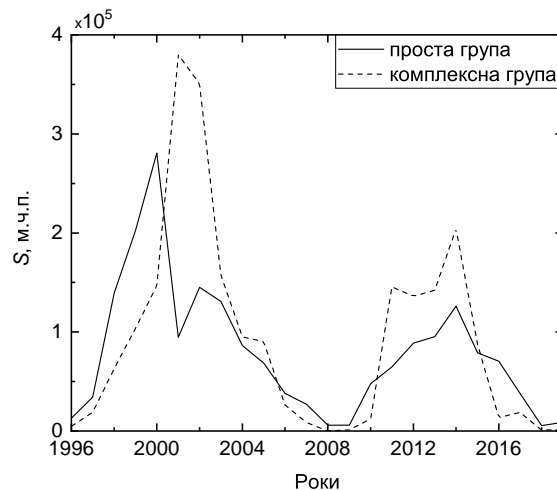


Рис. 3. Графіки зміни річної сумарної площі S , вираженої у мільйонних частках півсфери (м.ч.п.), для АД простої (суцільна лінія) та комплексної груп (штрихована лінія) протягом 23–24-го сонячних циклів

Fig. 3. Graphs of changes in the yearly total area S , expressed in millionths of hemisphere, for ARs of the simple (solid line) and the complex group (dashed line) during solar cycles 23–24

Наостанок для кожної АД ми виділили дні, коли в них спостерігали складну магнітну конфігурацію, — час перебування АД в комплексній групі. Ми вирішили порівняти цей час із повною тривалістю життя цих АД для різних фаз сонячного циклу. Зрозуміло, що окремі АД спостерігали неоднакову кількість днів — через різний реальний час їх існування й залежно від того, чи перебували вони на видимій стороні Сонця. На жаль, ми можемо порівнювати лише спостережувану кількість днів, тому саме її вважаємо тривалістю життя АД.

Ми визначили відносний час перебування АД в комплексній групі та побудували гістограми розподілу ділянок за цим параметром для кожного року протягом 23–24-го сонячних циклів у такий спосіб: кількість днів, коли спостерігалася АД, ми прийняли за 100%, поділили цю тривалість на 10 проміжків і встановили, у яких часових межах досліджувана АД належала до комплексних класів. На рис. 5 показано відповідні гістограми для 4-х років у максимальній фазі сонячної активності (у решті часу, як було показано раніше, складних магнітних конфігурацій було значно менше).

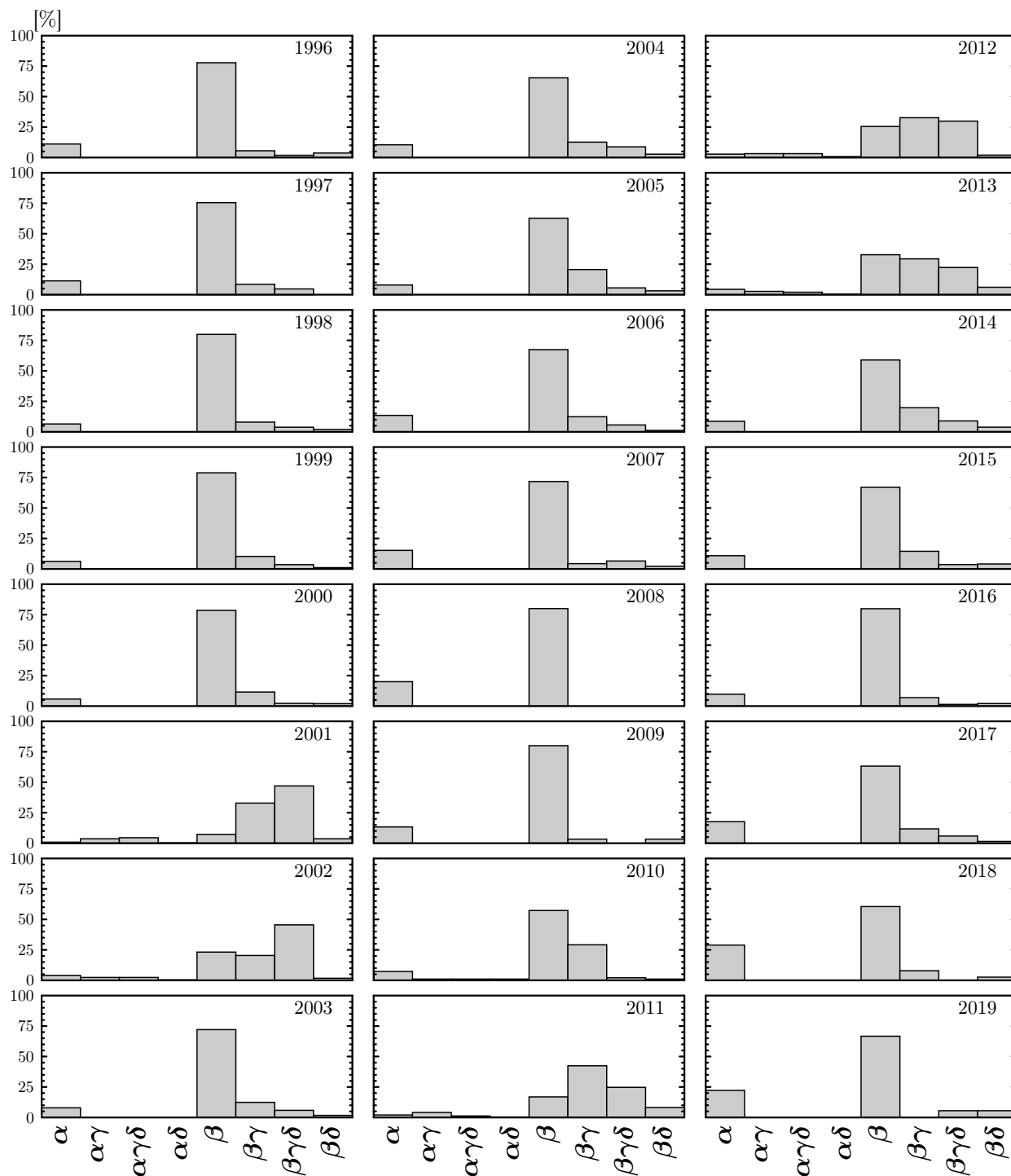


Рис. 4. Гістограми розподілу активних ділянок за їхнім найвищим гейлівським класом протягом 23–24-го сонячних циклів. Вісь абсцис: гейлівські класи. Вісь ординат: кількість АД у відсотках від загальної кількості АД, які спостерігали у відповідному році

Fig. 4. Histograms of the distribution of active regions by their highest Hale class during solar cycles 23–24. X-axis: Hale classes. Y-axis: the number of ARs as a percentage of the total number of ARs observed in the corresponding year

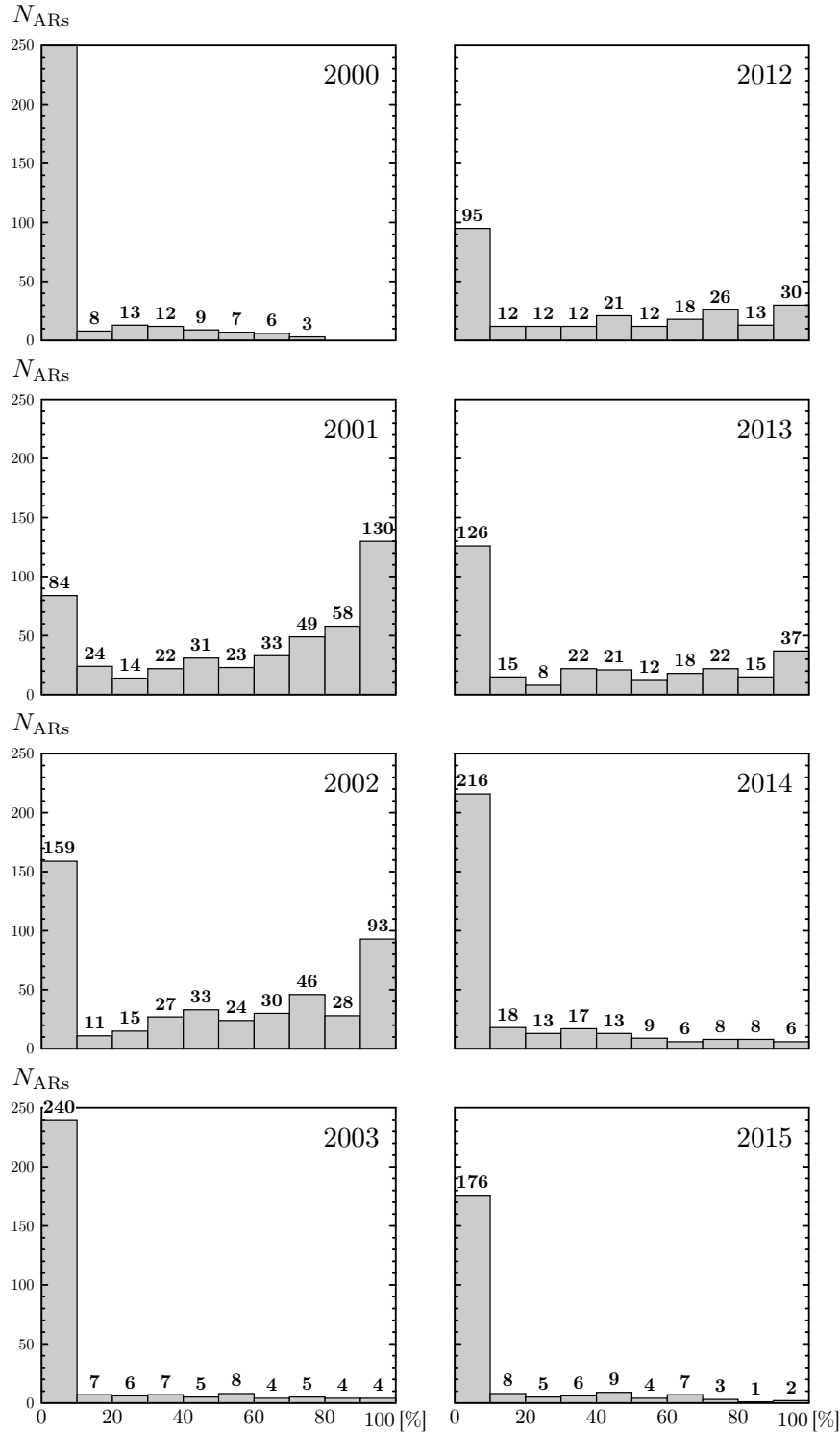


Рис. 5. Гістограми розподілу активних ділянок за часом, протягом якого вони належали до комплексної групи, у максимальній фазі 23-го циклу — у 2000–2003 рр. (зліва) та аналогічно для 24-го циклу — у 2011–2015 рр. (справа). Вісь абсцис: час у відсотках від загального часу спостережень АД, протягом якого її магнітна складність відповідала гейлівським класам комплексної групи. Вісь ординат: кількість АД N_{ARs}

Fig. 5. Histograms of the distribution of active regions by the time period during which they belonged to the complex group in the maximum phase of cycle 23 — years 2000–2003 (left) and similarly for cycle 24 — years 2011–2015 (right). X-axis: the time period as a percentage of the total duration of observations of AR during which its magnetic complexity corresponds to Hale classes of the complex group. Y-axis: the number of ARs N_{ARs}

У 23-му циклі бачимо більший час перебування АД у комплексній групі та більшу кількість таких ділянок, ніж у 24-му циклі. Сумарна кількість АД комплексної групи за 2001–2002 роки в 1.5 раза більша за сумарну кількість таких ділянок за 2013–2014 роки; сумарна кількість АД, у яких складну магнітну конфігурацію спостерігали протягом 90–100% тривалості життя, відрізняється в 5 разів у відповідні роки.

Отже, ми доповнили дослідження щодо зміни кількості АД різних класів протягом сонячного циклу, проведені в роботах [12, 13], та підтвердили основні закономірності розвитку АД, дослідивши також площу ділянок і тривалість складних магнітних конфігурацій. Виявлено відмінності під час порівняння АД простої та комплексної груп у максимальних фазах 23–24-го циклів (чого не знайдено в згаданих роботах), які особливо проявляються в часі перебування АД у комплексній групі.

ВИСНОВКИ

У роботі ми провели розширений аналіз даних щодо різних за магнітною складністю АД, розділивши їх на групи гейлівських класів. У результаті дослідження змін протягом 23–24-го сонячних циклів кількості та сумарної площі всіх АД й окремих груп, а також тривалості АД зі складною магнітною конфігурацією, виявлені такі особливості:

1. У максимальних фазах 23-го та 24-го циклів збільшуються кількість і сумарна площа всіх АД, а також відбувається різке ускладнення їхньої магнітної конфігурації. Кількість і сумарна площа АД (всіх

груп класів) у 24-му циклі суттєво менші, ніж у попередньому 23-му циклі.

2. Ділянки уніполярної групи займають більшу сумарну площу на фазі зростання до максимуму сонячної активності, графік сумарної площі АД біполярної групи приблизно повторює хід відповідного графіка для всіх ділянок. У 24-му циклі максимальні значення сумарних площ АД окремо уніполярної та біполярної груп менші, ніж у 23-му циклі.

3. АД простих класів переважають у період мінімуму сонячної активності, АД комплексних класів займають більшу сумарну площу і їх є більше в околі максимуму. Виявлено суттєве зменшення сумарної площі АД простої та комплексної груп у 24-му циклі порівняно з 23-м циклом. Особливо виражена різниця в кількості та тривалості АД зі складною магнітною конфігурацією на максимальних фазах обох циклів.

Отже, основні закономірності в еволюції окремих груп зберігаються в обох циклах. Однак 24-й цикл відзначився зменшенням кількості та сумарної площі АД порівняно з 23-м циклом, причому ця відмінність найбільш виразно проявляється в еволюції простої та комплексної груп у період максимуму сонячної активності відповідних циклів.

Зазначимо, що, крім 11-річного циклу сонячної активності, є також гейлівський 22-річний цикл, пов'язаний зі змінами полярності магнітних полів сонячних плям, а також подвійний цикл Гейла тривалістю близько 44 років, виявлений під час дослідження інтегрального розподілу еквівалентних діаметрів великих груп сонячних плям [15]. Отже, є потреба продовжити наше дослідження, розширивши часовий інтервал з метою опрацювання даних з інших циклів.

-
- [1] G. E. Hale, F. Ellerman, S. B. Nicholson, A. H. Joy, *Astrophys. J.* **49**, 153 (1919); <https://doi.org/10.1086/142452>.
- [2] G. E. Hale, S. B. Nicholson, *Magnetic Observations of Sunspots, 1917–1924* (Carnegie Inst., Washington DC, 1938).
- [3] H. Künzel, *Astron. Nachr.* **288**, 177 (1965).
- [4] L. van Driel-Gesztelyi, L. M. Green, *Liv. Rev. Solar Phys.* **12**, 1, (2015); <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-1>.
- [5] H. Künzel, *Astron. Nachr.* **285**, 271 (1960); <https://doi.org/10.1002/asna.19592850516>.
- [6] S. F. Smith, R. Howard, in *Structure and Development of Solar Active Regions*, edited by K. O. Kiepenheuer (Springer, 1968), p. 33.
- [7] T. Atac, *Astrophys. Space Sci.* **129**, 203 (1987); <https://doi.org/10.1007/BF00717871>.
- [8] I. Sammis, F. Tang, H. Zirin, *Astrophys. J.* **540**, 583 (2000); <https://doi.org/10.1086/309303>.
- [9] M. Ternullo, L. Contarino, P. Romano, F. Zuccarello, *Astron. Nachr.* **327**, 36 (2006); <https://doi.org/10.1002/asna.200510485>.
- [10] J. Guo, J. Lin, Y. Deng, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441**, 2208 (2014); <https://doi.org/10.1093/mnras/stu695>.
- [11] P. X. Gao, *Astrophys. J.* **894**, 77 (2020); <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8466>.
- [12] S. A. Jaeggli, A. A. Norton, *Astrophys. J. Lett.* **820**, L11 (2016); <https://doi.org/10.3847/2041-8205/820/1/L11>.
- [13] S. Nikbakhsh, E. I. Tanskanen, M. J. Käpylä, T. Hackman, *Astron. Astrophys.* **629**, A45 (2019); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935486>.
- [14] A. V. Zhukova *et al.*, *Geomagn. Aeron.* **60**, 673 (2020); <https://doi.org/10.1134/S001679322006016X>
- [15] V. M. Efimenko, V. G. Lozitsky, *Geomagn. Aeron.* **58**, 1057 (2018); <https://doi.org/10.1134/S0016793218080066>.

MAGNETIC COMPLEXITY OF ACTIVE REGIONS DURING 23–24 SOLAR CYCLES

O. A. Baran, A. I. Prysiazhnyi, M. M. Koval'chuk
*Astronomical Observatory, Ivan Franko National University of Lviv,
8, Kyrylo & Mefodiy St., Lviv, UA-79005, Ukraine*

e-mails: oleksandra.baran@lnu.edu.ua, andrii.prysiashnyi@lnu.edu.ua, marmyr.kovalchuk@gmail.com

The paper examines the distribution of the magnetic complexity of active regions (ARs) during 1996–2019 (solar cycles 23–24). The research is based on the ARs data from the website of the Heliophysical Integrated Observatory HELIO (www.helio-vo.eu). ARs are grouped according to their magnetic complexity using Hale classification.

We divided ARs classes into a unipolar and a bipolar group of classes, as well as into a simple and a complex group. We studied changes in magnetic configurations during the development of each region. We calculated daily total areas of ARs of each complexity class and analyzed their yearly values in different phases of the solar cycle. We determined the relative duration of complex magnetic configurations for each AR of the complex group. We compared the numbers of such ARs and the durations of their complex magnetic configuration in the maximum phases of cycles 23 and 24.

The study has shown that the characteristics of ARs of different groups vary significantly during the solar cycle. ARs of the unipolar group occupy a larger total area in the ascending phase; the graph for the total area of the bipolar group is similar to the corresponding graph for all regions. ARs of simple classes prevail during the periods of solar activity minimum; ARs of complex classes occupy a larger total area and there are more of them around the period of maximum.

The difference between cycles 23 and 24 is manifested primarily in the number and the total area of all ARs in the maximum phase. For all groups separately the maximal values of the total ARs area are smaller in cycle 24 than in cycle 23. The numbers and the durations of ARs with a complex magnetic configuration in the maximum phases of cycles 23 and 24 are significantly different.

Key words: solar cycle, active regions, sunspot polarity, magnetic configurations, Hale classes.