

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕВОЛЮЦІЇ АКТИВНИХ ОБЛАСТЕЙ НА СОНЦІ

*Марія КОВАЛЬЧУК, Марія ГІРНЯК, Іван ЛАБА,
Мирослав СТОДІЛКА*

Львівський національний університет імені Івана Франка,
Астрономічна обсерваторія,
вул. Кирила і Мефодія 8, Львів 79005

Редакція отримала статтю 10 листопада 2009 р.

Розподіл різних видів сонячної активності на Сонці є відображенням його глобального магнітного поля. Генерація останнього відбувається внаслідок стохастичних рухів сонячної плазми, а магнітне поле Сонця є випадковою функцією координат і часу. Цим обґрунтовується застосування стохастичного методу з теорії марківських процесів для дослідження розподілу на поверхні Сонця активних областей і їх зв'язку з великомасштабним магнітним полем.

Аналіз отриманих результатів дав змогу описати еволюцію досліджуваних активних ділянок, а також послужив для короткотермінового прогнозу сонячної активності і для розвитку активної ділянки.

1. ВСТУП

Дослідження динаміки активних областей (АО) на Сонці є складовою частиною більш загальної задачі, яка має суто практичний інтерес, – проблеми прогнозу розвитку АО. Як відомо, на різних етапах розвитку складовим явищам АО – плямам, спалахам, факелам, флокулам, протуберанцям тощо передують різні фізичні умови. Складність проявів сонячної активності, а також їх розмаїття, вимагає комплексного аналізу поведінки складових АО, окремих її характеристичних параметрів або їх сукупності. Із огляду на це, заслуговує на увагу аналіз статистичного спостережуваного матеріалу спостережень про АО на Сонці.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Існування зв'язку між розподілом на поверхні Сонця місць виникнення груп сонячних плям і глобальним магнітним полем стимулювало нас провести обчислення для опису еволюції АО. Це дало змогу вивчити динаміку АО, дослідити процеси накопичення енергії, виявити

специфіку передспалахового стану в ній, а також отримати коротко-терміновий прогноз сонячної активності.

3. СПОСТЕРЕЖУВАНІ ДАНІ

Ми скористалися базою спостережень даних про стан фотосфери і хромосфери, отриманою в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка. Фотогеліограми зняті на фотогеліографі системи Максутава на висококонтрастних ($\gamma = 1.3$) несенсибілізованих пластинах сорту FU-5 фірми ORWO з ефективною довжиною хвилі $\lambda_{\text{еф}} = 4100 \text{ \AA}$. Реєстрацію хромосфери проводили на хромосферно-фотосферному телескопі АФР-2 з інтерференційно-поляризаційним фільтром у лінії H_{α} зі смугою пропускання 0.5 \AA . Спостережуваний матеріал доповнений даними з інтернету.

З 11 по 24 серпня 2002 р. по видимому диску Сонця проходила велика активна область (NOAA AR 10069 S07L298). Спостереження активних процесів у цій АО на нашій обсерваторії тривали дев'ять днів (11, 15, 18–24 08.), що дало змогу вивчати еволюцію цієї ділянки. АО мала дуже велику і складну ведучу пляму з домінуючою S-полярністю (див. рисунок, верхній ряд). На магнітограмі MDI/SOHO АО 10069 була компактною з перемішаними малими магнітними елементами протилежної полярності (див. рисунок, нижній ряд); S-полярність – темний колір, N-полярність – світлий колір.

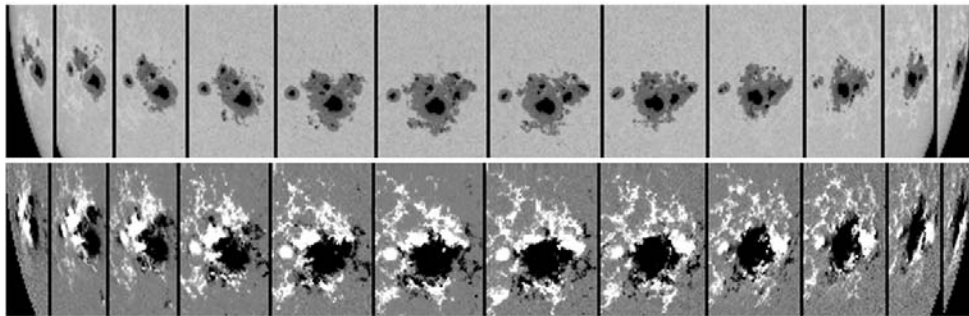


Рис. 1. Проходження по диску Сонця АО 10069 з 12 по 23 серпня 2002 р.: верхній ряд – група плям, нижній ряд – магнетограма MDI/SOHO.

4. МЕТОДИКА ОБЧИСЛЕНЬ

Для теоретичних обчислень ми використали стохастичний метод з теорії марківських процесів. Правомочність застосування цього методу для опису еволюції АО на Сонці, а також для короткотермінового прогнозу сонячної активності досить добре обґрунтована в [1-4]. Це пояснюється тим, що отримувані зі спостережень параметри – координати АО, швидкості їх переміщення, площі, полярності потоків маг-

нітного поля в них тощо – розглядаються як випадкові величини, що є реалізацією деякого випадкового процесу.

Зупинимось дещо докладніше на використовуваному нами стохастичному методі [3].

Марківські (дифузні) процеси тісно пов'язані з диференціальними рівняннями в частинних похідних.

АО можна описати функцією розподілу $f(g_i, t)$:

$$\int f(g_i, t) d\Omega = 1. \quad (1)$$

Значення функції розподілу $f(g_i, t)$ дає змогу обчислити для будь-якого моменту часу t найбільш імовірні значення параметрів g_i , очікуваний ступінь відхилення індивідуальних величин параметрів від їх середніх значень, ступінь асиметрії цих відхилень:

$$\bar{g}_i = \int g_i f(g_k, t) d\Omega$$

(перший момент, або найбільш імовірне значення параметрів g_i),

$$\Delta \bar{g}_i^2 = \int (g - \bar{g})_i^2 f(g_k, t) d\Omega = d_{ii} \quad (2)$$

(другий момент, або середнє зважене по площі),

$$\overline{\Delta g_i \Delta g_j} = \int (g - \bar{g})_i (g - \bar{g})_j f(g_k, t) d\Omega = d_{ij}$$

(другий момент, або величина асиметрії площі).

Таким чином, якщо вибір параметрів g_i досить представницький, то значення функції $f(g_i, t)$ дає змогу описати систему в будь-який заданий момент часу t з будь-яким заданим ступенем точності. І навпаки, якщо відомі моменти розподілу, тобто ліві частини формул (2), то за ними можна знайти функцію розподілу.

У випадку марківських процесів цей зв'язок в першому наближенні описується рівнянням Фоккера-Планка (або прямим рівнянням Колмогорова):

$$\frac{\partial f(g_i, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial g_i} \left[\frac{d\bar{g}_i}{dt} f(g_i, t) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial g_k} \left(\frac{d(\overline{\Delta g_i \Delta g_k})}{dt} f(g_k, t) \right) \right]. \quad (3)$$

Якщо вибір змінних g_i вдається здійснити так, що моменти g_i і $\overline{\Delta g_i \Delta g_k}$ є лише функціями часу, і залежністю їх від g_i можна знехтувати, то рівняння (3) набуває простішого вигляду

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{2} d_{ik}(t) \frac{\partial^2 f}{\partial g_i \partial g_k} - a_i(t) \frac{\partial f}{\partial g_i}, \quad (4)$$

де тензор II рангу

$$d_{ik}(t) = \frac{d}{dt}(\overline{\Delta g_i \Delta g_k})$$

описує дифузію в фазовому просторі, а вектор $a_i(t) = \frac{dg_{ik}}{dt}$, відповідно, є коефіцієнтом переносу.

Рівняння (3) і (4) є еволюційними рівняннями. Ними можна скористатися для прогнозів властивостей АО різної завчасності – від кількох годин до кількох діб.

Як репрезентативні параметри g_i , що описують АО, ми обрали доступні нам характеристики сонячних плям, що утворюють цю область, а саме: кількість плям n , причому $n = n_p + n_f$ (n_p – число плям однієї полярності, n_f – число плям протилежної полярності); їх площі у мільйонних частках півсфери (м.ч.п.) $S = S_p + S_f$, тобто $S_p = \sum_{i=1}^{n_p} S_i$, $S_f = \sum_{i=1}^{n_f} S_i$, де сумування проводиться по всіх плямах p - і f -полярності; їх координати – керінгтонівська довгота λ_i і широта φ_i . Причому допускається, що площі S_p і S_f пропорційні потоку магнітного поля p - і f -полярності, а S – повному магнітному потоку АО.

Середні зважені по площах значення координат p і f плям визначаються так:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{1}{S_p} \sum_{i=1}^{n_p} \lambda_i S_i; \bar{\varphi}_p = \frac{1}{S_p} \sum_{i=1}^{n_p} \varphi_i S_i;$$

$$\bar{\lambda}_f = \frac{1}{S_f} \sum_{i=1}^{n_f} \lambda_i S_i; \bar{\varphi}_f = \frac{1}{S_f} \sum_{i=1}^{n_f} \varphi_i S_i;$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{S}(S_p \bar{\lambda}_p + S_f \bar{\lambda}_f); \bar{\varphi} = \frac{1}{S}(S_p \bar{\varphi}_p + S_f \bar{\varphi}_f).$$

Квадрат віддалі між підсистемами p і f дорівнює:

$$l^2 = [(\bar{\lambda}_f - \bar{\lambda}_p)^2 + (\bar{\varphi}_f - \bar{\varphi}_p)^2].$$

Тоді безрозмірна величина $\gamma = \alpha \cdot s / l^2$, де $\alpha = 0.1266 / 2\pi$ характеризує середнє значення градієнта магнітного поля в групі на даний момент часу. Цей параметр має практичне значення. Коефіцієнт α переводить площі в м.ч.п., у яких вимірюється величина S , і дугові градуси, в яких виражається величина l , в одну систему одиниць так, щоб величина γ була безрозмірною. Далі, коефіцієнт α – це коефіцієнт пропорційності між магнітним потоком F_H і площею плями, вираженої в м.ч.п. Тобто величина $\alpha \cdot S$ характеризує повний потік усієї АО, а величина γ визначає магнітний дипольний момент АО.

Тепер розглянемо дисперсію координат плям в АО. Це такі величини:

$$\overline{\Delta \lambda_p^2} = d_{\lambda\lambda}^p = \frac{1}{S_p} \sum_{i=1}^{n_p} (\bar{\lambda}_p - \lambda_i)^2 S_i;$$

$$\overline{\Delta\varphi_p^2} = d_{\varphi\varphi}^p = \frac{1}{S_p} \sum_{i=1}^{n_p} (\bar{\varphi}_p - \varphi_i)^2 S_i;$$

$$\overline{\Delta\lambda_p \Delta\varphi_p} = d_{\lambda\varphi}^p = d_{\varphi\lambda}^p = \frac{1}{S_p} \sum_{i=1}^{n_p} (\bar{\lambda}_p - \lambda_i)(\bar{\varphi}_p - \varphi_i) S_i.$$

Величини d_{jk}^p складають симетричний тензор другого рангу. Аналогічно визначається тензор другого рангу d_{jk}^f . Тоді для складових тензора d_{jk} , що характеризує всю АО,

$$\overline{\Delta\lambda^2} = d_{\lambda\lambda} = \frac{1}{S} (S_p \overline{\Delta\lambda_p^2} + S_f \overline{\Delta\lambda_f^2});$$

$$\overline{\Delta\varphi^2} = d_{\varphi\varphi} = \frac{1}{S} (S_p \overline{\Delta\varphi_p^2} + S_f \overline{\Delta\varphi_f^2});$$

$$\overline{\Delta\lambda \Delta\varphi} = d_{\lambda\varphi} = d_{\varphi\lambda} = \frac{1}{S} (S_p \overline{\Delta\lambda_p \Delta\varphi_p} + S_f \overline{\Delta\lambda_f \Delta\varphi_f}).$$

Отримані моменти другого порядку теж мають практичний інтерес. Вони дають змогу визначити додаткові величини, що характеризують АО. Позначимо через D_p, D_f, D визначники тензорів $d_{ik}^p, d_{ik}^f, d_{ik}$. Тоді три безрозмірні параметри:

$$n_p = \alpha \cdot S / \sqrt{D_p}; h_f = \alpha \cdot S / \sqrt{D_f}; h = \alpha \cdot S / \sqrt{D}$$

пропорційні густині магнітного потоку полярності p, f та інтегрального потоку всієї АО.

Ще три безрозмірні параметри $r_s = S_p/S_f$, $r_h = h_p/h_f$, $r_l = \sqrt{D}/l^2$ є індикаторами ступеня дисбалансу магнітного поля АО: r_s – по потоках; r_h – по середній густині потоків; r_l – характеризує ступінь складності групи, тобто ступінь взаємопроникнення полів протилежного знаку. Що більше це відношення, то складніша АО, то більш переплетеними можуть бути в ній ділянки з полями протилежного знаку.

Про характер рухів у АО можна судити за променевими швидкостями, які безпосередньо виміряти нам недоступно.

Але зі спостережуваних даних, які є у нашому розпорядженні, можемо отримати важливу інформацію про характер рухів у АО. Для цього розглянемо кінематику плям. Кожному інтервалу часу $\Delta t = (t_{k+1} - t_k)$ ставимо у відповідність компоненти швидкості $\theta_{\lambda i}$ і $\theta_{\varphi i}$ i -ої плями за правилом: $\theta_{\lambda i} = \Delta\lambda_i/\Delta t_k$, $\theta_{\varphi i} = \Delta\varphi_i/\Delta t_k$.

Дана АО залежно від кількості кінематичних елементів, які входять до неї, може бути одноелементною, двоелементною і т.д.

Отже, перші моменти кожного кінематичного елемента визначаються таким чином:

$$\bar{\theta}_{\lambda e} = \frac{1}{m_e} \sum_{i=1}^{m_e} \theta_{\lambda i};$$

$$\bar{\theta}_{\varphi e} = \frac{1}{m_e} \sum_{i=1}^{m_e} \theta_{\varphi i},$$

де m_e – кількість складових в кінематичному елементі.
Аналогічно для всієї АО маємо:

$$\bar{\theta}_{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{\lambda i};$$

$$\bar{\theta}_{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{\varphi i}.$$

Енергія рухів окремих плям характеризується величиною

$$\bar{\theta}_e^2 = \sum_{i=1}^e (\bar{\theta}_{\lambda e}^2 + \bar{\theta}_{\varphi e}^2).$$

Величина $\bar{\theta}^2$ і темп її зміни з часом $\frac{d}{dt}\bar{\theta}^2$ виявляються такими параметрами, які суттєво характеризують енергетику АО, а також швидкості її накопичення $\left(\frac{d}{dt}\bar{\theta}^2 > 0\right)$ або зменшення $\left(\frac{d}{dt}\bar{\theta}^2 < 0\right)$. На практиці змінні $\bar{\theta}^2$ і $\frac{d}{dt}\bar{\theta}^2$ є вагомими прогностичними параметрами, що передбачають спалахову активність АО і момент часу, коли ця активність може реалізуватись.

Ще одна безрозмірна величина

$$\beta = \bar{\theta}_e^2 / \bar{\theta}^2$$

пропорційна відношенню енергії, що міститься у впорядкованих рухах кінематичних елементів, до всієї енергії рухів АО. Ця величина β кількісно характеризує ступінь упорядкованості кінематики АО. Величина β і її похідна за часом $\frac{d}{dt}\beta$ теж є прогностичними параметрами щодо еволюції АО.

5. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У таблиці подані значення фізичних характеристик, що описують АО і її еволюцію впродовж кількох днів серпня 2002 р.

6. ВИСНОВКИ

Із аналізу цих величин були зроблені такі висновки.

У перші дні спостережень АО (див. рисунок) ступінь її складності був досить низьким. На сході з'явилася група плям у вигляді двох частин – ведучої р-плями і хвостової f-плями; хвостова частина групи плям розташувалась ближче до екватора і, рухаючись швидше,

повільно наближалася до ведучої частини. р-пляма була дуже великою з домінуючою S-полярністю і невеликими осередками протилежної N-полярності; в окремій f-частині помітно 4 осередки перемішаних полярностей, а також початки відокремлення двох із них у NW- і SE-напрямах.

Складність із часом неухильно зростала (дивись таблицю). Свідченням цього була зміна полярності деяких плям у даній АО 15.08-17.08, р- і f-частини групи плям зблизились і через день злились в одну гігантську пляму перемішаних полярностей, причому помітно наростала N-полярність і, відповідно, зменшувалася S-полярність. У північній частині великої плями (18.08) виникають нові ядра N-полярності, що засвідчило впливання нового вихрового магнітного потоку N-полярності, який упродовж наступних днів продовжував зростати. Зі зміною полярностей зменшився магнітний дипольний момент АО. За рахунок цього значно зменшилася густина магнітного потоку північної полярності, що привело до загального зменшення густини інтегрального потоку магнітного поля АО.

Таким чином, зріс ступінь дисбалансу магнітного поля АО по потоках, тоді як ступінь дисбалансу по середній густині потоків зменшився і майже наблизився до 1, що свідчить про співрозмірність густин магнітних потоків різної полярності.

У перші дні спостережень АО була 12-18-19-елементною; відбувалося швидке накопичення енергії. У наступні дні спостережень унаслідок високої складності в попередні дні відбулась перебудова магнітних полярностей – декілька плям зникли взагалі, інші злились. З'явилась велика пляма зі значною площею і N-полярністю. Магнітна конфігурація АО й надалі залишилась складною.

АО стала 15-16-елементною. Такі явища перебудови в АО відбилися на загальній ситуації на поверхні Сонця: неухильно накопичувалася енергія ($\frac{d}{dt}\theta^2 > 0$) і перетворювалася з одного виду в інший.

Урешті-решт 21.08. ця АО 10069 вперше продукувала спалах бала 1В, який теж виявився і в рентгенівському діапазоні. Спалахова активність виявилась у місцях контакту протилежних полярностей. З наближенням АО до західного лімба зросла кількість спалахів у оптичному діапазоні.

Після цього знизився ступінь складності АО, магнітний дипольний момент став ще меншим. Водночас густина магнітних потоків N-полярності й інтегрального потоку значно зросла порівняно з попередніми днями, коли було більше плям. Зросли також ступені дисбалансу магнітного поля по потоках і по середній густині потоку.

Інтенсивність упорядкованих рухів окремих кінематичних елементів у АО зростала з кожним днем, що можна розглядати як добрий кількісний індикатор енергії підфотосферних рухів. Зауважимо, що це зростання інтенсивності рухів окремих кінематичних елементів дуже випереджало інтенсивності рухів у всій АО, унаслідок чого збільшився ступінь впорядкованості кінематики АО.

Ці параметри, по суті, визначають величину і характер магнітного поля АО, описують морфодинаміку комплексу активності. Отже, наші спостережувані дані мають практичне застосування, оскільки дають змогу описати еволюцію АО, а також зробити короткотерміновий прогноз сонячної активності і виявити специфіку передспалахово-

Таблиця 1. Фізичні характеристики, що описують активну область в серпні 2002 р.

Дата UT		12.08 11:25	16.08 12:15	18.08 11:18	19.08 10:34	20.08 12:41	21.08 13:20
Параметри							
Магн. дипольн. момент	γ	6.32	6.03	5.84	6.41	7.12	6.95
Густ. магн. потоків різн. полярностей	h_s	34.73	22.43	16.15	12.71	9.63	17.54
	h_N	15.27	28.52	40.43	61.22	69.85	51.81
Інтегр. магн. потік	h	26.62	24.17	28.25	36.62	31.47	33.80
Ступ. дисбал. магн. поля по сер. густині потоків	r_p	1.18	2.16	2.60	3.05	2.97	3.02
	r_s	5.44	4.82	4.30	2.28	0.98	3.57
Ступінь склад., тобто ступінь взаємоп. полів	r_l	0.52	0.60	0.64	0.70	0.96	0.93
Енергія рухів окремих плям	θ^2	3.7×10^{-6}	5.2×10^{-5}	4.3×10^{-4}	8.6×10^{-2}	9.4×10^{-2}	2.4×10^{-3}
Швид. накоп. енергії	$\frac{d\theta^2}{dt}$	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0
Ступ. впорядк. кінематики АО	β	0.56	0.62	0.71	0.74	0.82	0.89
Кільк. кінемат. елем. в АО		12	19	18	16	15	8

го розвитку АО.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] *Могилевский Е.И.* Phys. sol. letters. 1981. N 16. 5-17.
- [2] *Степанян Н.М.* Ibid. 71-81.
- [3] *Чумак О.В., Чумак З.Н.* Кинематика и физика небесных тел. 1987. Т.3, № 3. 7-13.
- [4] *Постон Т., Стюарт И.* Теория катастроф и ее приложения. М., 1980. 608 с.

THE INVESTIGATION OF EVOLUTION AT ACTIVE SOLAR REGION

*Mariya KOVAL'CHUK, Mariya HIRNYAK, Ivan LABA,
Myroslav STODILKA*

The Ivan Franko State University of L'viv,
8 Kyrylo and Mefodiy Street, L'viv, 79005, Ukraine

The distribution of different types of solar activity is the reflection of its global magnetic field. The generation of the global magnetic field occurs as a result of stochastic movements of solar plasma, while the solar magnetic field is an accidental function either of coordinates or of time. This fact grounds the application of stochastic method from the theory of Markov-processes to the research of the distribution of active regions on the solar surface and their connection with large-scale magnetic field.

The analysis of the obtained results (data) enabled us to describe the evolution of an active region that had been explored and become a base for a short-term forecast of solar activity.