

ВИВЧЕННЯ МОРФОДИНАМІКИ АКТИВНИХ ДІЛЯНОК НА СОНЦІ ДЛЯ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУ СПАЛАХІВ

М. Ковальчук, М. Гірняк

Астрономічна обсерваторія

Львівського національного університету імені Івана Франка

вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна

(Отримано 30 листопада 2006 р.)

Проаналізовано статистичну поведінку головних характеристик сонячної активності — флокул, плям, спалахів і зроблено прогноз спалахової активності всієї активної ділянки. Використано спостережувану базу даних про стан сонячної фотосфери і хромосфери, отриману в Астрономічній обсерваторії Львівського університету, доповнено даними з INTERNET'у. Для розв'язку цієї задачі застосовано метод розпізнавання образів. Одержано ймовірність виникнення спалахів у групах плям: помилковий прогноз становить 17% від кількості груп плям (131); невпевний прогноз — 3%; правильний прогноз — 80%.

Ключові слова: активні ділянки на Сонці, прогноз спалахової активності.

PACS number(s): 96.60. Fs

I. ВСТУП

Вивчення морфодинаміки активних ділянок (АД) на Сонці є складовою частиною загальнішої задачі, що має чисто практичний інтерес — проблеми прогнозу розвитку АД. Як відомо, на різних етапах розвитку АД і для різних моментів 11-річного циклу явищам АД — спалахам, плямам, флокулам, факелам, протуберанціям (волоконкам) — передують різні фізичні умови. Можливо, в цьому і заховано причини того, що досі немає чітко розроблених методів прогнозу активних явищ на Сонці.

Завдання роботи полягає в знаходженні морфодинамічних відмінностей між спостережуваними на Сонці короткотривалими (однообертними) і рекурентними (кількообертними) активними процесами. Такі морфодинамічні відмінності можуть бути корисними при прогнозі сонячної активності.

Завдання прогнозування розв'язують на основі аналізу поведінки складників АД, окремих її характеристик параметрів чи сукупності їх. З цією метою ми послідовно аналізували поведінку головних характеристик сонячної активності — флокул, плям, спалахів. Розв'язуючи цю задачу, ми спиралась на базу отриманих в Астрономічній обсерваторії Львівського університету даних про стан фотосфери і хромосфери, доповнену даними з бюлетенів “Солнечные данные” [1], “Solar Geophysical Data” [2] і даними з INTERNET'у.

На першому етапі нашої роботи об'єктами вивчення були флокули, на другому — групи плям і, нарешті, III етап — це спроба дати прогноз спалахової активності всієї АД. Подібні підходи описані у працях Степаняна та ін. [4, 5], Бернштейна [6], Ейгенсона [7].

У перший день появи флокула спостерігач має у своєму розпорядженні дуже обмежену інформацію. По-перше, це характеристика місця утворення фло-

кула, по-друге, характеристика самого флокула. Слід зауважити, що ми розглядали тільки флокули, що виникли на диску Сонця в зоні лише $\pm 60^\circ$ від центра диску. Ми використовували такі характеристики місця утворення флокула:

1. Розпад волокна на місці утворення флокула в межах дня його утворення;
2. Наявність сусідніх флокул в околицях 5° ;
3. Наявність флокул у цьому місці в попередньому оберті.

За вхідні параметри, що характеризують народжений флокул, узяті величини, виражені у двійковому кодї, причому 0 відповідає слабкішому і менш активному флокулові, а 1 — активнішому:

1. Компактність флокула (0 — некомпактний, 1 — компактний).
2. Розпад волокна поблизу місця народження флокула (0 — не розпалося, 1 — розпалося).
3. Наявність сусідніх флокул в околиці 5° (0 — нема сусідніх флокул, 1 — є).
4. Наявність флокула на цьому місці в попередньому оберті (0 — нема в попередньому оберті, 1 — є).

За характеристики розвитку флокула, тобто за прогнозовані параметри, узяті:

1. Наявність цього флокула в наступному оберті (так, ні).
2. Спалахова активність флокула в цьому оберті (0 — нема спалахів, 1 — є).
3. Характер розвитку флокула в цьому оберті (d — шез на диску, l — зайшов за край).
4. Наявність плям у флокулі (нема, є).
5. Кількість днів існування флокула ($< 3^d$, $\geq 3^d$).

Часовий інтервал тривалістю три дні вибраний тому, що це мінімальний час, протягом якого ми можемо спостерігати флокул до його заходу за лімб.

Цю задачу розв'язували так. Кожному флокулові надавали “вагу”, що дорівнює сумі значень чотирьох

вхідних параметрів. Це може бути ціле число від 0 до 4. Ми намагались виявити зв'язок між "вагою" флокула і значеннями параметрів розвитку, тобто дізнатися, чи можна прогнозувати дальшу поведінку флокула, знаючи зі спостережень у день його появи чотири величини (4 вхідні параметри).

Залежно від "ваги" всі флокули були розбиті на 5 класів (з вагою 0, 1, 2, 3, 4). Для флокулів кожного класу визначили переважаючі значення всіх п'яти параметрів розвитку. Вони наведені в таблиці 1. У дужках під значеннями параметрів указано частку P кількості флокулів цього класу, що має це значення параметра. У двох правих стовпцях таблиці показа-

но кількість флокулів із даною "вагою" і відсоток їх від повної кількості всіх флокулів. Нижні дві лінійки подають відсоток усіх флокулів, для яких значення параметра розвитку можна визначити з імовірністю $P \geq 0.7$ (передостання лінійка) і з $P \geq 0.8$ (остання лінійка). Так, наприклад, для параметра "Нааявність у наступному оберті" тільки для флокулів класу 3 імовірність $P \leq 0.7$. До цього класу належить 19% усіх флокулів (останній стовпчик, 4-й рядок), тобто для 81% усіх флокулів цей параметр можна визначити з $P \geq 0.7$, що й показано в 11-му рядку другого стовпчика.

Вага флокула	Нааявн. у наст. оберті	Спалах. активн.	Характер розвитку	Нааявн. плям	Кількість днів існуван.	Кількість флокулів	% від заг. кількості
0	нема (0.92)	0 (0.94)	d (0.86)	нема (0.75)	≥ 3 (0.62)	57	22
1	нема (0.95)	0 (0.92)	d (0.78)	нема (0.59)	≥ 3 (0.73)	65	26
2	нема (0.88)	1 (0.51)	1 (0.71)	так (0.80)	≥ 3 (0.94)	60	24
3	так, ні (0.50)	1 (0.72)	1 (0.79)	так (0.94)	≥ 3 (1)	48	19
4	так (0.86)	1 (0.98)	1 (0.88)	так (1)	≥ 3 (1)	22	9
% флокулів з $P \geq 0.7$	81	76	100	74	78		
% флокулів з $P \geq 0.8$	81	57	31	52	52		

Таблиця 1. Прогноз параметрів розвитку флокула.

На основі цієї таблиці можна зробити такі висновки. Визначивши чотири параметри флокула в день його виникнення, можна з імовірністю $P \geq 0.7$ сказати, чи шезне він на диску, чи зайде за край, чи вийде з-за краю, чи можна очікувати спалахів у цьому флокулі за час його проходження по диску. З імовірністю $P \geq 0.7$ можна говорити про кількість днів існування флокула ($< 3^d$ або $\geq 3^d$) і про виникнення плям у ньому. Такі висновки можна зробити для 75% усіх флокулів. Для решти 25% флокулів імовірність визначення параметрів нижча від 0.7.

Тепер ми розглянемо наступний етап у розвитку активної ділянки — виникнення у флокулі групи плям. Завдання ставиться так. Кожна з тих груп плям, що виникли на диску, описується значеннями десяти вхідних параметрів. Вони характеризують усю активну ділянку в попередньому і в теперішньому обертах, включаючи день виникнення групи. Знаючи ці величини, треба знайти значення прогнозованих параметрів. Розглянемо як прогнозований параметр спалахову активність групи, а саме, середньодобовий спалаховий індекс на місці групи з моменту появи групи і до заходу цього місяця флокула.

Перерахуймо вхідні параметри задачі:

- 1) кількість старих груп плям у флокулі;
- 2) середньодобовий спалаховий індекс на місці групи до дати виникнення групи;

- 3) вік флокула в обертах;
- 4) відношення потужності флокула до потужності комплексу;
- 5) сумарний спалаховий індекс по всьому флокулу до моменту появи групи;
- 6) сумарний спалаховий індекс флокула в попередньому оберті;
- 7) потужність флокула в попередньому оберті;
- 8) загальна кількість груп у флокулі в попередньому оберті;
- 9) кількість нових груп у флокулі в попередньому оберті;
- 10) потужність флокула в день появи групи;
- 11) середньодобовий спалаховий індекс на місці групи з моменту появи групи й до заходу цього місяця флокула.

Під потужністю флокула розуміємо добуток яскравості флокула, виражений в умовних одиницях на його площу, виражену в м. д. д.

За спалаховий індекс прийнято деяку величину, що приблизно пропорційна до енергії в лінії H_α , яка виділена за добу під час усіх спалахів у цій АД. Для кожного спалаху індекс отримуємо перемноженням тривалості спалаху на деякий коефіцієнт. Ці коефіцієнти пропорційні добуткові середніх для спалахів цього ба-лу ширини й центральної інтенсивності H_α на площу спалаху.

Під комплексом флокулів ми розуміємо кілька близьких флокулів, віддалей між межами яких $< 5^\circ$.

Вхідні параметри задано у вигляді реальних числових значень. Прогнозований параметр перетворюється пізніше у двійковий код після вибору порогового значення R параметра, стосовно якого весь матеріал розбивається на два класи.

До розгляду приймаємо тільки групи, що виникли на диску Сонця в межах $\pm 60^\circ$ від центрального меридіана. Усього розглянуто 85 груп. Увесь матеріал подано у вигляді таблиці, кількість рядків якої дорівнює k — кількість розглянутих груп (85), а кількість стовпців i — кількості параметрів (із них 10 вхідних і 1 прогнозований).

Для кожної i -ї ознаки (параметра) знайдено середні значення \bar{y}_i по всіх групах плям і дисперсії σ_i , після чого вся вхідна інформація була нормована за формулою

$$x_{ik} = \frac{y_{ik} - \bar{y}_i}{\sigma_i},$$

де $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m$.

$$\sigma_i = \sqrt{D_i}; D_i = \overline{y_i^2} - (\bar{y}_i)^2;$$

y_{ik} — вхідне значення i -ї ознаки у k -й групі. Тобто ми створили нову таблицю, де вхідними, але вже нормованими параметрами є x_{ik} .

Дуже цікавим і великим спрощенням для наступного етапу роботи є встановлення найбільшої залежності прогнозованого 11-го параметра від значень кожного з 10-ти вхідних параметрів. Для цього ділянку зміни кожного з 10-ти параметрів розбивали на кілька інтервалів. Маємо обчислені середні значення кожного параметра \bar{x}_i (з 10-и) і відповідні йому середні значення прогнозованої 11-ї ознаки для всього масиву даних. Але для повнішої характеристики цієї залежності було виконано обернену процедуру. Ділянку зміни прогнозованого параметра розбивали на кілька інтервалів і в кожному з них визначали середні значення прогнозованої величини й середні значення кожного з решти параметрів. Так, найліпшими, тобто найінформативнішими для прогнозованого параметра — появи спалахів у групі плям і в ділянці флокула — виявились параметри, що характеризують спалахову активність флокула до моменту появи групи плям, потужність флокула та кількість груп плям у флокулі. Це дало змогу зменшити кількість параметрів, необхідних для прогнозування.

Потім ми вибираємо порогове значення прогнозованого параметра й перетворюємо всі значення цього прогнозованого параметра у двійковий код, зрозуміло, що стосовно цього порогового значення.

Для розв'язку цієї задачі ми використали метод розпізнавання образів, бо він добре задовольняє особливості отриманої інформації — різну форму даних, об'єм статистичного матеріалу і т. п. Згідно з цим методом проводили розбивку таблиці вхідних даних на

таблицю навчання і на таблицю контролю. Тому синонімом методу розпізнавання образів є термін “класифікація з навчанням”. Таблиця навчання включала вектори, що описували окремі групи плям трьома найважливішими, попередньо вибраними ознаками, решту векторів становила таблиця контролю. Цю таблицю навчання ми розбили на два класи щодо порогового значення прогнозованої ознаки. Клас α містить групи плям у флокулах, де виникли спалахи, і клас β , де вони не з'явилися.

За інформацією, поданою у таблиці навчання, треба знайти ймовірність належності будь-якого об'єкта (групи плям) до одного з класів. Для перевірки якості отриманої інформації використано контрольний матеріал. Процедура полягає в тому, що в таблицю навчання по чергово підставляємо характеристики кожного об'єкта з уже відомих класів.

Коли класів усього два, то в методі розпізнавання образів використовуємо лінійну дискримінантну функцію. Аргументами цієї функції є змінні x, y, z , а коефіцієнти при змінних визначаються з деякого матричного рівняння за допомогою процедури, описаної нижче.

Нехай клас α містить N_α (у нас 85) об'єктів, клас β відповідно $N_\beta = 46$ об'єктів. Після зменшення кількості вхідних ознак ми розглядали задачу у 3-мірному просторі (узагальнення на випадок більшої розмірності проводиться автоматично).

Для класу α вхідною матрицею A є:

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N_\alpha} & y_{N_\alpha} & z_{N_\alpha} \end{pmatrix}.$$

Це матриця об'єкт-ознака: кожен рядок перераховує значення ознак цього об'єкта, а кожен стовпчик — значення цього параметра на множині об'єктів. Аналогічно запишемо матрицю даних B для класу β .

Послідовність наступних процедур така [3]:

1. Для класу α знаходимо коваріаційну матрицю A_{cov} , тобто матрицю сум квадратів і змішаних добутків:

$$\Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{N_\alpha}; \Sigma xy - \frac{\Sigma x \Sigma y}{N_\alpha}; \Sigma xz - \frac{\Sigma x \Sigma z}{N_\alpha}$$

$$A_{cov} = \Sigma xy - \frac{\Sigma y \Sigma x}{N_\alpha}; \Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{N_\alpha}; \Sigma yz - \frac{\Sigma y \Sigma z}{N_\alpha}$$

$$\Sigma zx - \frac{\Sigma z \Sigma x}{N_\alpha}; \Sigma zy - \frac{\Sigma z \Sigma y}{N_\alpha}; \Sigma z^2 - \frac{(\Sigma z)^2}{N_\alpha},$$

де сумування проводимо за всіма N_α об'єктах. Аналогічну матрицю будемо для класу β .

2. Обчислюємо об'єднану коваріаційну матрицю:

$$S = \frac{1}{N_\alpha + N_\beta - 2}(A_{cov} + B_{cov}).$$

3. Знаходимо обернену матрицю S^{-1} .

4. Обчислюємо вектори багатомірних середніх для кожного класу:

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} \bar{x}_\alpha \\ \bar{y}_\alpha \\ \bar{z}_\alpha \end{pmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} \bar{x}_\beta \\ \bar{y}_\beta \\ \bar{z}_\beta \end{pmatrix},$$

де риска зверху означає усереднення по всіх об'єктах класу, і знаходимо їхню різницю:

$$D = \bar{A} - \bar{B}.$$

5. Множимо матрицю S^{-1} на D і маємо матрицю-стовпчик:

$$\Lambda = S^{-1}D = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix},$$

ми отримали, що $\lambda_1 = 0.188$; $\lambda_2 = 0.243$; $\lambda_3 = 0.081$.

Ці три значення використовуємо як коефіцієнти лінійної дискримінантної функції R :

$$R = \lambda_1 x + \lambda_2 y + \lambda_3 z.$$

6. У функцію підставляємо замість x, y, z відповідні півсуми середніх (з обох класів) значень відповідних параметрів, тобто

$$\bar{x}_\alpha + \bar{x}_\beta = \bar{x}_{\alpha\beta}.$$

Якщо позначити

$$R = \frac{1}{2}(\lambda_1 \bar{x}_{\alpha\beta} + \lambda_2 \bar{y}_{\alpha\beta} + \lambda_3 \bar{z}_{\alpha\beta})$$

і ввести аналогічні позначення для інших параметрів, отримуємо дискримінантну мітку, або "поріг":

$$R' = \frac{1}{2}(\lambda_1 \bar{x}_{\alpha\beta} + \lambda_2 \bar{y}_{\alpha\beta} + \lambda_3 \bar{z}_{\alpha\beta}).$$

У нашому випадку $R' = 0.233$.

7. Тепер правило класифікації таке:

якщо $R \geq R'$, об'єкт належить до класу α ;

якщо $R \leq R'$, об'єкт належить до класу β .

У результаті вияснимо, наскільки правильно класифікувалися б об'єкти, щодо яких їхня належність до класів уже наперед відома (з таблиці контролю). Якщо % правильних відповідей досить високий, класифікацію вважають задовільною. На цій основі формулюємо правило, згідно з яким кожен об'єкт, що знову подається, можна б віднести до того чи іншого класу.

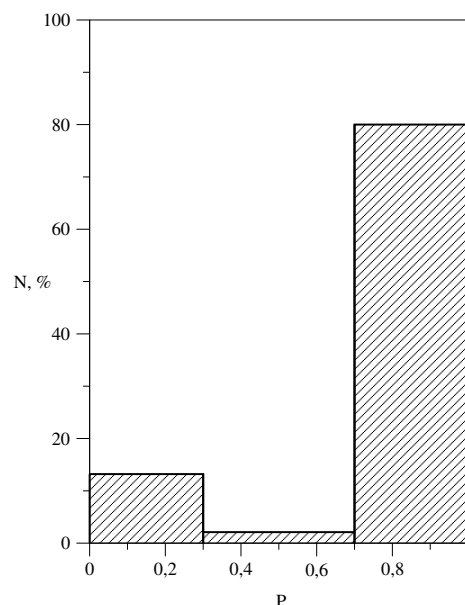


Рис. 1. Діаграма розподілу ймовірностей P виникнення спалахів у групах плям (у % від загальної кількості 131 розглянутих груп).

Кінцеві результати розпізнавання представлено у вигляді діаграми на рис. 1. На ній зображено кількість груп плям (у відсотках від загальної кількості всіх розглянутих груп (131)), для яких, унаслідок розпізнавання методом лінійної дискримінантної функції, отримано ймовірність виникнення спалахів у групах, тобто ймовірність віднесення до свого класу $P < 0.3$ (тобто помилковий прогноз) для 17% від кількості всіх груп плям, непевний прогноз, тобто $0.3 \leq P < 0.7$ — для 3% груп плям і правильний прогноз $P \geq 0.7$ для 80% усіх груп плям. Інакше кажучи, правильно прогнозована спалахова активність стосується 80% від усіх розглянутих груп плям.

[1] Солн. данные, **1-12**, (1991).

[2] Solar Geophys. Data, Part I **558-570**, (1991).

[3] Б. Болч, К. Д. Хуань, *Многомерные статистические методы для экономики* (Статистика, Москва, 1979).

[4] Н. Н. Степанян, Изв. Крым. астрофиз. обсерв. **51**, 8 (1974).

[5] Т. Л. Слущкая, Н. Н. Степанян, Изв. Крым. астрофиз. обсерв. **52**, 131 (1974).

[6] П. Б. Бернштейн, Солн. данные **10**, 73 (1977).

[7] А. М. Эйгенсон, Геомагнетизм и аэрномия **6**, 974 (1982).

М. КОВАЛЬЧУК, М. ПІРНЯК

**A STUDY OF MORFODYNAMIC OF ACTIVE REGIONS ON THE SUN
FOR SHORT-TERM FLARE PROGNOSIS**

M. Koval'chuk, M. Hirnyak
*Ivan Franko National University of Lviv,
Astronomical Observatory
8 Kyryla i Mefodija St., Lviv, UA-79005, Ukraine
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

A statistical analysis of the behaviour of main descriptions of solar activity — floccules, spots and flares — is made. The prognosis of flash activity of the whole active region is carried out. The observing basis of data of the state of solar photosphere and chromosphere was received at the Astronomical Observatory of the Lviv University. It was also supplemented by Internet sources. The pattern recognition method was applied. The probability of the appearance of flares in groups of spots as follows: mistaken prognosis is equal to 17% of the number all the group of spots (131); uncertain prognosis — 3%; correct prognosis — 80%.