





## РОЗВИТОК АКТИВНИХ ДІЛЯНОК НА СОНЦІ

О. А. Баран<sup>1</sup> , М. М. Ковальчук<sup>1</sup> , М. І. Стоділка<sup>1</sup> , І. П. Лаушник<sup>2</sup> , М. Б. Гірняк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,  
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна,  
e-mail: lesiaab@gmail.com,

<sup>2</sup> Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту,  
вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, 79000, Україна

(Отримано 10 грудня 2020 р.; в остаточному вигляді — 18 лютого 2021 р.; прийнято до друку — 24 лютого 2021 р.;  
опубліковано онлайн — 27 березня 2021 р.)

В роботі представлені дані, що ілюструють розвиток активних ділянок (АД) на Сонці. Дослідження проводилось на основі фотогеліограм, отриманих в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка у вересні 2014 р. Інформацію про плями в АД (кількість плям та їх положення) ми порівнювали з даними HMI/SDO (<https://www.solarmonitor.org/>) для встановлення полярності кожної плями в цій області та визначення площі магнітного збурення навколо цих плям.

Ми розглянули просту область класу  $\beta$  (NOAA AR 12155) та складну область класу  $\beta\gamma\delta$  (NOAA AR 12157). Для аналізу розподілу цих АД на сонячній поверхні ми застосували стохастичний метод з теорії марківських процесів. Застосування цього методу обґрунтовується тим, що спостережувані параметри АД розглядаються як випадкові величини, що є реалізацією деякого випадкового процесу — прояву магнітного поля Сонця.

Розраховано параметри, що визначають величину та характер магнітного поля АД (магнітний дипольний момент, густину магнітного потоку тощо). Досліджено зміни ступеня дисбалансу магнітного поля за площею і за середньою густиною потоку. Встановлено, що ступінь складності (взаємопроникнення полів) для складної області (NOAA AR 12157) втричі більший, ніж для простої (NOAA AR 12155). Це вказує на різницю в енергетиці таких магнітних конфігурацій.

**Ключові слова:** магнітне поле Сонця, активні ділянки, сонячні плями.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.25.2901>

### I. ВСТУП

Дослідження активних ділянок на Сонці є складовою частиною загальнішої задачі, яка має чисто практичний інтерес — проблеми прогнозу розвитку АД. Як відомо, на різних етапах розвитку складовим явищам АД — плямам, спалахам, факелам, флокулам, протуберанцям тощо — передують різні фізичні умови. Складність проявів сонячної активності, а також їхнє різноманіття потребують комплексного аналізу поведінки складників АД, їхніх окремих характеристик параметрів або сукупності [1–4].

Розподіл різних видів сонячної активності є відображенням тороїдальної (азимутальної) компоненти магнітного поля Сонця. 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 АД на поверхні Сонця і зв'язку їх з великомасштабним магнітним полем [5].

З огляду на це заслуговує на увагу проведений аналіз статистичного спостережуваного матеріалу про АД на Сонці з використанням згаданого вище методу.

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Наявність зв'язку між розподілом на сонячній поверхні місць виникнення груп плям і магнітним полем Сонця стимулювало нас провести кількісні розрахунки для опису еволюції АД. Це дало змогу вивчити динаміку таких ділянок, дослідити процеси накопичення енергії, виявити специфіку передспалахового стану в них.

### III. СПОСТЕРЕЖУВАНИЙ МАТЕРІАЛ

З цією метою ми використали спостережувану базу даних про стан фотосфери, отриману в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка. Фотогеліограми знято на фотогеліографі системи Максутова (рис. 1).

Спостережуваний матеріал доповнений даними із сайту <https://www.solarmonitor.org/> космічної обсерваторії SDO (Solar Dynamics Observatory), отриманими на інструменті HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) [6] (рис. 2).



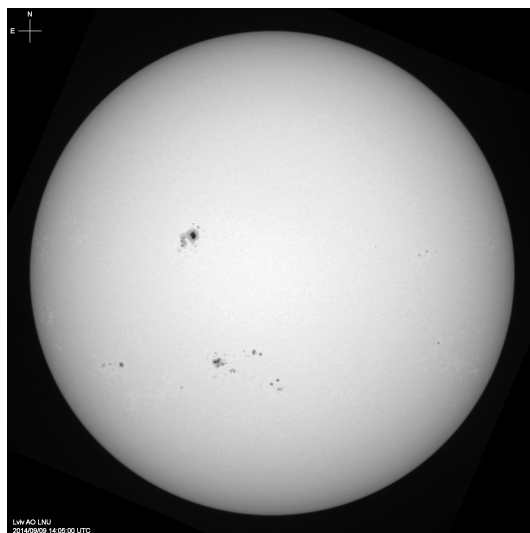


Рис. 1. Фотогеліограма Сонця 9 вересня 2014 р., отримана на фотогеліографі системи Максутова в Астрономічній обсерваторії ЛНУ імені Івана Франка

Fig. 1. Photoheliogram of the Sun on September 9, 2014, received on a photoheliograph of the Maksutov system at the Astronomical Observatory of the Ivan Franko National University of Lviv

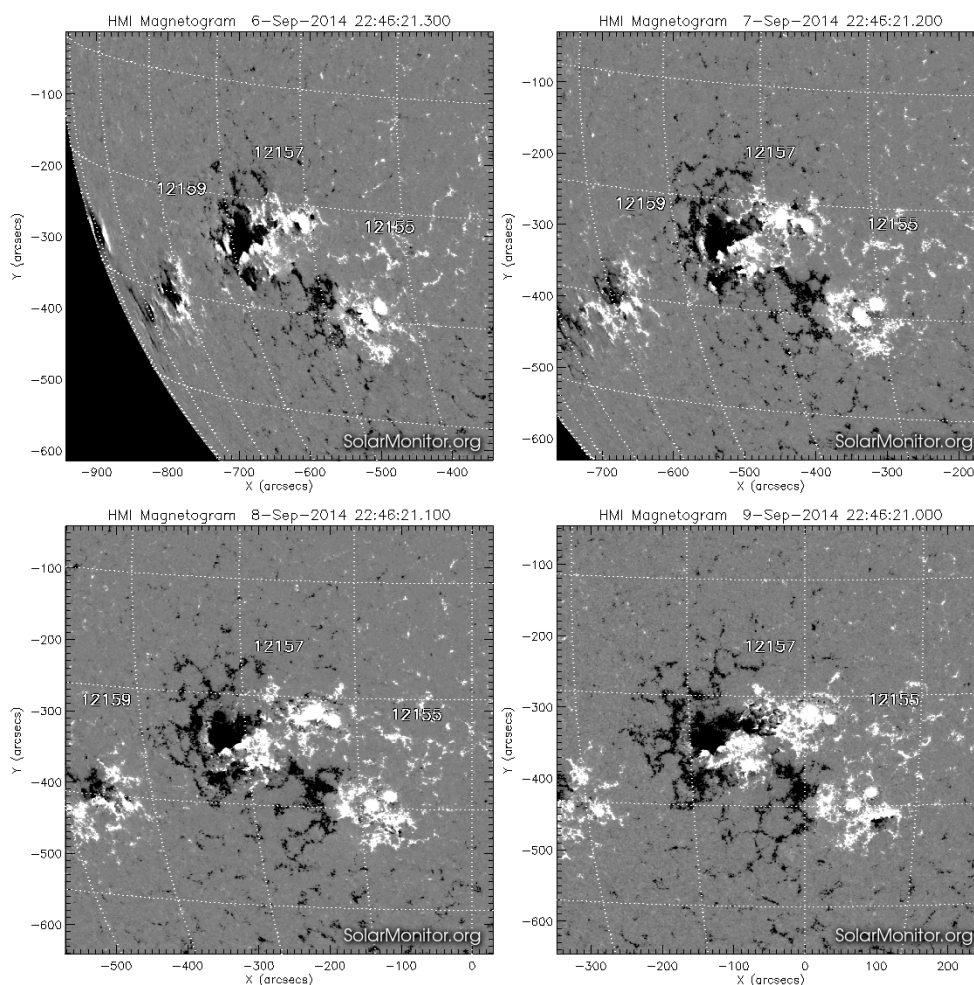


Рис. 2. Магнітограми АД на Сонці з даних спостережень протягом 6.09.14–9.09.14 на SDO/HMI (<https://www.solarmonitor.org/>)

Fig. 2. Magnetograms of ARs on the Sun from observational data during 6.09.14–9.09.14 on SDO / HMI (<https://www.solarmonitor.org/>)

Інформацію про плями в АД (кількість плям та їх розташування) отримували з даних спостережень фотогеліографом, яку згодом зіставляли з даними НМІ/SDO для встановлення полярності кожної з плям у цій ділянці та визначення площі магнітного збурення в околі цих плям.

На початку вересня 2014 р. (в максимальній фазі 24-го циклу сонячної активності) по видимому диску Сонця проходили дві активні ділянки NOAA AR 12155 та NOAA AR 12157. Спостереження активних процесів у цих АД проводили в нашій обсерваторії 4 дні (від 6 до 9 вересня), що дало змогу вивчати еволюцію цих ділянок. У першій АД ведучі плями з домінантною N-полярністю були значно більшими за хвостові з S-полярністю. Друга АД, навпаки, на початку спостережень мала дрібні ведучі плями з N-полярністю і велику хвостову пляму з S-полярністю, що розпадалась у наступні дні. На магнітограмі MDI/SOHO в цій ділянці активно перемішувались малі магнітні елементи протилежної полярності (рис. 2, N-полярність — світлий колір, S-полярність — темний колір).

Основні дані про АД, вибрані для досліджень, подані в табл. 1. Тут указано: дата і час (UT) початку спостережень; геліографічні координати ділянок; їхні площі, виражені в мільйонних частках півсфери (м.ч.п.); кількість плям у цих ділянках; спалахи, які відбувались під час спостережень, а також зазначено час їх початку, максимуму й закінчення.

|                     |                          | Дата    | 6.09    | 7.09    | 8.09    | 9.09  |
|---------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|-------|
|                     |                          | UT      | 11:20   | 11:50   | 11:25   | 12:05 |
| NOAA<br>AR<br>12155 | Геліографічні координати | S20 E33 | S20 E19 | S20 E05 | S19 W08 |       |
|                     | Площа $S$ (м.ч.п.)       | 120     | 120     | 120     | 100     |       |
|                     | К-сть плям $n$           | 6       | 5       | 6       | 4       |       |
|                     | Спалахи (бал)            | —       | —       | —       | —       |       |
| NOAA<br>AR<br>12157 | Геліографічні координати | S14 E44 | S14 E30 | S14 E17 | S14 E03 |       |
|                     | Площа $S$ (м.ч.п.)       | 520     | 540     | 420     | 450     |       |
|                     | К-сть плям $n$           | 14      | 17      | 27      | 37      |       |
|                     | Спалахи (бал;            | C2.5    | C2.2    | —       | C3.2    |       |
|                     | час початку,             | 11.24   | 12.01   |         | 12.19   |       |
|                     | максимуму,               | 11.29   | 12.10   |         | 12.26   |       |
| закінчення)         | 11.37                    | 12.28   |         | 12.35   |         |       |

Табл. 1. Основні дані про АД, згідно з SDO (<https://www.solarmonitor.org/>)

Table 1. Basic data on ARs, according to SDO (<https://www.solarmonitor.org/>)

#### IV. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

Для теоретичних розрахунків ми використали стохастичний метод із теорії марківських процесів [5]. Правомірність застосування цього методу для опису

еволюції АД на Сонці, а також для короткотермінового прогнозу сонячної активності досить добре обґрунтована в роботах [5, 7–9]. Це пояснюється тим, що отримані зі спостережень параметри АД розглядаються як випадкові величини, що є реалізацією деякого випадкового процесу.

Як репрезентативні параметри, що описують АД, ми вибрали доступні нам характеристики сонячних плям, що утворюють цю ділянку, а саме: кількість плям  $n$ , причому  $n = n_p + n_f$  ( $n_p$  — кількість плям однієї полярності,  $n_f$  — протилежної полярності); їхні площі  $S = S_p + S_f$ , тобто  $S_p = \sum_{i=1}^{n_p} S_i$ ,  $S_f = \sum_{i=1}^{n_f} S_i$ ; їхні координати — керінгтонівська довгота  $\lambda_i$  і широта  $\varphi_i$ . Причому допускається, що площі  $S_p$  і  $S_f$  пропорційні величині потоку магнітного поля  $p$ - і  $f$ -полярності, а  $S$  — повному магнітному потоку АД.

Квадрат віддалі між підсистемами  $p$  і  $f$  дорівнює:

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

де  $\bar{\lambda}_p, \bar{\varphi}_p, \bar{\lambda}_f, \bar{\varphi}_f$  — середні зважені за площами значення координат  $p$  і  $f$  плям.

Тоді безрозмірна величина  $\gamma = \alpha \cdot S/l^2$ , де  $\alpha = 0.1266/2\pi$ , характеризує середнє значення градієнта магнітного поля в групі на цей момент часу, тобто визначає магнітний дипольний момент АД.

Другі моменти, тобто дисперсія координат плям в АД,

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

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

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

становлять симетричний тензор другого рангу  $d_{ik}^p$ . Аналогічно визначається тензор другого рангу  $d_{ik}^f$ . Тоді для складників тензора  $d_{jk}$ , що характеризує всю АД:

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

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

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

Позначимо через  $D_p, D_f, D$  визначники тензорів  $d_{ik}^p, d_{ik}^f, d_{jk}$ . Тоді три безрозмірні параметри

$$h_p = \alpha \cdot S / \sqrt{D_p}, h_f = \alpha \cdot S / \sqrt{D_f}, h = \alpha \cdot S / \sqrt{D}$$

є пропорційні густині магнітного потоку полярності  $p$ ,  $f$  та інтегральному потоку всієї АД.

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 АД:  $r_s$  — за площею;  $r_h$  — за середньою густиною потоків;  $r_l$  характеризує ступінь складності взаємопроникнення полів протилежного знака. Що більше значення  $r_l$ , то більш складніша АД, то більше можуть бути переплетеними в цій зоні поля протилежного знака.

### V. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У табл. 2 і 3 подані значення фізичних характеристик, що описують дві різні АД та їх еволюцію протягом кількох днів вересня 2014 р.

|   |          | Дата | 6.09  | 7.09  | 8.09  | 9.09  |
|---|----------|------|-------|-------|-------|-------|
|   |          | УТ   | 11:20 | 11:50 | 11:25 | 12:05 |
| Параметри   |          |      |       |       |       |       |
| Кількість плям різної полярності                            | $n_p$    |      | 4     | 3     | 4     | 2     |
|   | $n_f$    |      | 2     | 2     | 2     | 2     |
| Площа частини АД різної полярності                          | $S_p$    |      | 92    | 91    | 90    | 70    |
|   | $S_f$    |      | 28    | 29    | 30    | 30    |
| Магн. дипольний момент                                      | $\gamma$ |      | 0.25  | 0.24  | 0.27  | 0.21  |
| Густина магн. потоку різної полярності                      | $h_p$    |      | 6.54  | 6.27  | 6.52  | 5.67  |
|   | $h_f$    |      | 1.87  | 1.76  | 2.25  | 2.09  |
| Інтегральний магнітний потік                                | $h$      |      | 6.31  | 5.32  | 5.85  | 5.00  |
| Ступінь дисбалансу магн. поля за площею                     | $r_s$    |      | 3.29  | 3.14  | 3.00  | 2.33  |
| Ступінь дисбалансу магн. поля за середньою густиною потоків | $r_h$    |      | 3.50  | 3.56  | 2.90  | 2.70  |
| Ступінь складності (взаємопроникнення полів)                | $r_l$    |      | 0.08  | 0.10  | 0.09  | 0.07  |

Табл. 2. Фізичні характеристики активної ділянки NOAA AR 12155

Table 2. Physical characteristics of NOAA AR 12155

Бачимо, що активна ділянка NOAA AR 12155 є невеликою (до 6 елементів) групою плям у вигляді двох частин — більшої ведучої з N-полярністю і меншої хвостової частини з S-полярністю. За час спостережень спалахи у цій АД не відбувались (табл. 1). Протягом 4-х днів спостерігались лише незначні зміни ступеня дисбалансу магнітного поля за площею й за середньою густиною потоків. Магнітний дипольний момент та інтегральний магнітний потік теж суттєво не змінились. Отже, ступінь складності ділянки NOAA AR 12155 виявився досить низьким ( $r_l \leq 0.1$ ).

|   |          | Дата | 6.09  | 7.09  | 8.09  | 9.09  |
|---|----------|------|-------|-------|-------|-------|
|   |          | УТ   | 11:20 | 11:50 | 11:25 | 12:05 |
| Параметри   |          |      |       |       |       |       |
| Кількість плям різної полярності                            | $n_p$    |      | 7     | 8     | 15    | 23    |
|   | $n_f$    |      | 7     | 9     | 12    | 14    |
| Площа частини АД різної полярності                          | $S_p$    |      | 200   | 215   | 180   | 220   |
|   | $S_f$    |      | 320   | 325   | 240   | 230   |
| Магн. дипольний момент                                      | $\gamma$ |      | 2.08  | 2.24  | 1.81  | 1.94  |
| Густина магн. потоку різної полярності                      | $h_p$    |      | 4.30  | 6.55  | 7.98  | 10.73 |
|   | $h_f$    |      | 34.78 | 25.10 | 19.35 | 16.49 |
| Інтегральний магнітний потік                                | $h$      |      | 13.05 | 14.94 | 16.80 | 18.99 |
| Ступінь дисбалансу магн. поля за площею                     | $r_s$    |      | 0.63  | 0.66  | 0.75  | 0.96  |
| Ступінь дисбалансу магн. поля за середньою густиною потоків | $r_h$    |      | 0.12  | 0.26  | 0.41  | 0.65  |
| Ступінь складності (взаємопроникнення полів)                | $r_l$    |      | 0.25  | 0.28  | 0.31  | 0.30  |

Табл. 3. Фізичні характеристики активної ділянки NOAA AR 12157

Table 3. Physical characteristics of NOAA AR 12157

На початку спостережень активна ділянка NOAA AR 12157 — це більша (з 14 елементами), ніж попередня АД, група плям із дрібними ведучими плямами N-полярності та більшою за площею хвостовою частиною S-полярності. За час спостережень у цій АД відбувалась перебудова магнітних полярностей (див. рис. 2): у хвостовій частині АД з панівною S-полярністю були виявлені осередки з протилежною N-полярністю. У процесі розвитку цієї АД у хвостовій частині також спостерігались спалахи класу C (табл. 1). Перемішування осередків протилежних полярностей призвело до змін магнітного дипольного моменту.

Протягом 4-х днів у цій АД кількість плям збільшувалась до 37 елементів: ведуча частина ділянки активно розвивалась, а у хвостовій частині плями здебільшого ділились. Ступінь дисбалансу за площею протягом днів спостережень збільшився й наблизився до 1. Ступінь дисбалансу магнітного поля за середньою густиною потоків також збільшився до 1, що свідчить про вирівнювання густин магнітних потоків різної полярності. Збільшився інтегральний магнітний потік. Отже, ступінь складності ділянки NOAA AR 12157 виявився втричі більшим, ніж для попередньої АД ( $r_l = 0.25 \div 0.31$ ).

Аналіз магнітних конфігурацій двох досліджуваних АД дозволяє провести класифікацію згідно з [10]. NOAA AR 12155 належить до класу  $\beta$  — це група плям із додатною та від'ємною полярністю (біполярна) з чітко вираженою межею між ділянками з різною полярністю. NOAA AR 12157 треба віднести до класу

$\beta\gamma\delta$  — це багатополярна (змішана) група з біполярною конфігурацією, що домінує; вона містить групу плям із конфігурацією  $\delta$  (комплексну групу плям із двох біполярних тіней, оточених спільною півтінню).

Отже, ми розглянули еволюцію двох різних за складністю АД, які одночасно спостерігались на Сонці. Установлені параметри, що, по суті, визначають величину й характер магнітного поля АД, указують на різницю в енергетиці таких магнітних конфігурацій.

## VI. ВИСНОВКИ

У статті наведено дані, що ілюструють розвиток АД на Сонці. Дослідження проводили на основі фотогеліограм, отриманих в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка у вересні 2014 р. Спостережуваний матеріал доповнений даними із сайту

<https://www.solarmonitor.org>.

Ми розглянули просту ділянку класу  $\beta$  (NOAA AR 12155) та складну ділянку класу  $\beta\gamma\delta$  (NOAA AR 12157). Для аналізу розподілу цих АД на сонячній поверхні ми застосували стохастичний метод із теорії марківських процесів.

Установлено параметри, що визначають величину й характер магнітного поля АД, та простежено їх еволюцію. Зміни ступенів дисбалансу магнітного поля за площею та за середньою густиною потоків, а також різний ступінь складності (взаємопроникнення полів) свідчать про різницю в енергетиці таких магнітних конфігурацій.

Наші спостережувані дані мають практичне застосування, оскільки дають змогу описати еволюцію АД, а також зробити короткотерміновий прогноз сонячної активності та виявити специфіку передспалахового розвитку АД.

- 
- [1] V. Gaizauskas, *Adv. Space Res.* **13**, 5 (1993); [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(93\)90450-P](https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90450-P).  
 [2] S. Dacie, *Astron. Astrophys.* **596**, A69 (2016); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628948>.  
 [3] S. Toriumi, H. Wang, *Liv. Rev. Sol. Phys.* **16**, 3 (2019); <https://doi.org/10.1007/s41116-019-0019-7>.  
 [4] S. Nikbakhsh, E. I. Tanskanen, M. J. Kapyla, T. Hackman, *Astron. Astrophys.* **629**, A45 (2019); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935486>.  
 [5] О. В. Чумак, З. Н. Чумак, *Кинем. физ. небес. тел* **3**, 7 (1987).  
 [6] P. H. Scherrer *et al.*, *Sol. Phys.* **275**, 207 (2012); <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2>.  
 [7] E. I. Mogilevsky, *Phys. Sol. Terr.* **16**, 5 (1981).  
 [8] N. N. Stenanyan, *Phys. Sol. Terr.* **16**, 71 (1981).  
 [9] Т. Постон, И. Стюарт, *Теория катастроф и ее приложения* (Мир, Москва, 1980).  
 [10] L. van Driel-Gesztelyi, L. M. Green, *Liv. Rev. Sol. Phys.* **12**, 1 (2015); <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-1>.

## DEVELOPMENT OF ACTIVE REGIONS ON THE SUN

O. A. Baran<sup>1</sup>, M. M. Koval'chuk<sup>1</sup>, M. I. Stodilka<sup>1</sup>, I. P. Laushnyk<sup>2</sup>, M. B. Hirnyak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Astronomical Observatory of the Ivan Franko Lviv National University, 8, Kyrylo & Mefodiy St., Lviv, UA-79005, Ukraine, e-mail: lesiaab@gmail.com,*

<sup>2</sup>*Lviv branch of Dnipro National University of Railway Transport, 12-A, I. Blazhkevych St., Lviv, UA-79000, Ukraine*

The paper presents data illustrating the development of active regions (ARs) on the Sun. The research was based on photoheliograms received at the Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv in September 2014. Information on spots in ARs (the number of spots and their position) was compared with HMI/SDO data (<https://www.solarmonitor.org/>) to establish the polarity of each spot in this region and determine the area of magnetic perturbation around these spots.

We considered a simple region of class  $\beta$  (NOAA AR 12155) and a complex region of class  $\beta\gamma\delta$  (NOAA AR 12157). To analyze the distribution of these ARs on the solar surface, we applied the stochastic method from the theory of Markov processes. The application of this method is substantiated by the fact that the observed parameters of ARs are considered as random variables, which are the realization of some random process — the manifestation of the Sun's magnetic field. We calculated the parameters determining the magnitude and nature of the magnetic field of ARs (magnetic dipole moment, magnetic flux density, etc.).

We tracked the evolution of these parameters during the observations. We explored the changes in the degree of the magnetic field imbalance in the area and average flux density. The degree of complexity (interpenetration of fields) for the complex region (NOAA AR 12157) was found to be three times larger than for the simple one (NOAA AR 12155). This indicates a difference in the energy of such magnetic configurations.

**Key words:** magnetic field of the Sun, active regions, sunspots.