

ПОВУДОВА МОДЕЛІ ПРОГНОЗУ ЗБУРЕНЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ ПІД ВПЛИВОМ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

О. А. Баран¹, М. І. Стоділка¹, М. М. Ковальчук¹, М. Б. Гірняк¹, І. П. Лаушник²

¹Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, м. Львів, 79005, Україна,
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua,

²Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту,
вул. І. Блажкевич, 12а, м. Львів, 79055, Україна

(Отримано 06 лютого 2018 р.; в остаточному вигляді — 20 березня 2018 р.)

Розроблено методику прогнозування геомагнітних збурень, які є відгуком на зміни сонячної активності. В основу методу прогнозу покладено множинний лінійний регресійний аналіз із виділенням найбільш геоелективних прогнозантів. Ними виявились потоки сонячного вітру, підсилені рентгенівськими потоками від сонячних спалахів. Проведено процедури ідентифікації моделі прогнозу та фільтрації вхідних даних, встановлено критерії, за якими обчислені кількісні характеристики якості та ефективності отриманих результатів. Коефіцієнт кореляції між спостережуваними та спрогнозованими геомагнітними індексами перевищує 0.9, що свідчить про високу оцінку виправданості розробленого методу прогнозу.

Ключові слова: сонячно-земні зв'язки, метод математичної статистики, прогностична модель.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.22.1902>

PACS number(s): 94.05.S—, 95.75.Wx

I. ВСТУП

Однією з основних проблем у сонячно-земній фізиці є дослідження впливу активності Сонця на збурення магнітного поля Землі. На сьогодні можна вважати встановленими основні типи енергетичних потоків (корпускул і випромінювання) від Сонця, які приводять до того чи іншого характеру збурень у навколосферному середовищі, — тобто в магнітосфері, йоносфері та атмосфері Землі [1, 2]. Це — 1) потоки порівняно густої квазінейтральної плазми сонячного вітру, що спричиняє магнітосферні та йоносферні бурі тривалістю від 1 доби й більше; 2) потоки енергетичних “спалахових” протонів малої густини тривалістю близько кількох годин; 3) сплески потоків ультрафіолетового випромінювання від сонячних спалахів із характерним часом близько 1 год; 4) сплески потоків м'якого і жорсткого рентгенівського випромінювання від спалахів, що викликають раптові йоносферні збурення, характерний час яких — кілька хвилин.

II. СПОСТЕРЕЖУВАНІ ДАНІ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У нашій роботі зі створення прогностичної моделі збурень у системі Сонце-Земля ми враховували, як прогнозанті згадані сонячні потоки випромінювання і корпускул та індекси геомагнітних збурень як відгуки на них у магнітосфері Землі.

Отже, як вхідні дані для прогнозування ми брали часові ряди, отримані з сайтів “Daily Solar Data”¹, “Daily Particle Data”² та “Daily Geophysical Data”³ (з бази даних Центру прогнозування космічної погоди SWPC NOAA в поточному 24-му циклі сонячної активності 2009-2016 р.р.):

- 1) числа Вольфа;
- 2) площі сонячних плям;
- 3) радіопотік на довжині хвилі $\lambda = 10.7$ см;
- 4) рентгенівські потоки від спалахів;
- 5) потік протонів з енергією $E_p > 1$ MeV;
- 6) потік електронів з енергією $E_e > 0.8$ MeV;
- 7) значення міжпланетного магнітного поля;
- 8) планетарний геомагнітний індекс $\sum K_p$.

На першому етапі прогнозування ми виділили найбільш геоелективні сонячні потоки. Виявилось, що числа Вольфа, площі сонячних плям та радіопотік на $\lambda = 10.7$ см сильно корелюють, але тільки між собою (коефіцієнт кореляції > 0.95), а їхній внесок у геомагнітні збурення незначний. З решти параметрів найбільш геоелективними прогнозантими виявились потоки сонячного вітру, що підсилювались рентгенівськими потоками від спалахів.

Раніше в роботі [3] для опису геомагнітних збурень застосовано часові ряди геомагнітних індексів D_{st} (середнє за добу значення осесиметричної щодо геомагнітного диполя компоненти збуреного магнітного поля, отримане з чотирьох приєкваторіальних станцій)

¹ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/_DSD.txt (2012,2016)

²ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/_DPD.txt (2012,2016)

³ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/_DGD.txt (2012,2016)



та A_p (середнє значення варіацій магнітного поля, що відповідає K_p -індексу), отримані за 23-й цикл сонячної активності.

Для побудови моделі прогнозу геомагнітних збурень під впливом сонячних потоків ми використали часові ряди оцінки планетарного K -індексу (NOAA/estimated K_p). Ми вибрали два інтервали поточного 24-го циклу сонячної активності — на гілці росту до максимуму (період від 1.08 до 29.09 2012 р.) та на гілці спаду до мінімуму (період від 1.11 до 30.12 2016 р.). Часові ряди щодобових даних потоків сонячного вітру, рентгенівських потоків та значень планетарного геомагнітного індексу $\sum K_p$ були центровані та нормовані на середнє квадратичне відхилення. А для фільтрації спостережуваних даних ми використали комбінацію рекурсивних і нерекурсивних фільтрів.

III. МЕТОДИКА ПОВБУДОВИ ПРОГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Розв'язуючи задачу прогнозування як математичну модель, розглядали рівняння лінійної множинної регресії випадкового процесу, яке має вигляд [3, 4]:

$$Y_{j+\tau} = \sum_{k=1}^K \left(c_{k,0} + \sum_{i=1}^N c_{k,i} x_{k,j-i+1} \right), \quad (1)$$

де K — кількість параметрів моделі (K -й параметр відповідає за геомагнітний індекс); Y_j — математична модель процесу $x_{K,j}$, який спостерігали в дискретні моменти часу j , ($j = 1, 2, \dots, M$), M — довжина рядів параметрів; τ — період прогнозу (проміжок часу, на який розробляється прогноз); N — час передісторії (проміжок часу, за який використовують інформацію для розробки прогнозу); $x_{k,j}$ — часові ряди зміни стану процесів-аргументів; $c_{k,i}$ ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) — дійсні константи, значення яких вибираються так, щоб забезпечити мінімум P , що визначається співвідношенням [5]:

$$P = \sum_{j=1}^M (Y_j - x_{K,j})^2. \quad (2)$$

Значення $c_{k,i}$ знаходимо за допомогою методу найменших квадратів, згідно з яким

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}, \quad (3)$$

де \mathbf{C} — вектор коефіцієнтів моделі $c_{k,i}$, що містить $(N + 1) \cdot K$ компонентів; \mathbf{A}^{-1} — квадратна матриця розміром $(N + 1) \cdot K \times (N + 1) \cdot K$, що є оберненою до матриці \mathbf{A} . При цьому матриця \mathbf{A} теж має розмір $(N + 1) \cdot K \times (N + 1) \cdot K$ і визначається як:

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X};$$

\mathbf{B} — вектор, що також містить $(N + 1) \cdot K$ компонентів і має вигляд:

$$\mathbf{B} = \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}.$$

Однією з характеристик якості моделі (1) є значення P за умови, що її коефіцієнти визначені зі співвідношення (3). У цьому випадку фізичний зміст P — дисперсія помилки моделювання. Отже, записані рівняння (1) і (2) дозволяють дібрати такі коефіцієнти моделі, які справді забезпечують найменше значення P .

Коефіцієнти $c_{k,i}$ визначають прогностичну модель із завчасністю не менше 1 доби. Причому значення цих коефіцієнтів залежать від завчасності прогнозу — одна, дві чи три доби. Ці коефіцієнти моделі уможливають отримання прогнозу на кілька діб наперед.

IV. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУ

Ідентифікація моделі прогнозу полягає у використанні розв'язку цієї задачі з пристосуванням до конкретних умов: вибір сонячного вітру, підсиленого рентгенівськими потоками, як найбільш геофізичного прогностанта; вибір часових проміжків, що відповідають високій активності Сонця на початку та наприкінці сонячного циклу.

Процедура ідентифікації моделі прогнозу (1) не проста. Обчислювальні труднощі зростають тим більше, чим більша кількість прогностантів, що враховуються в моделі [3]. Вони визначають ранг матриці \mathbf{A} .

Розв'язуючи задачу щодо якості ідентифікованої моделі, враховували не тільки точність отриманого на її основі прогнозу, але і його незалежність від зсувів часових рядів, використовуваних під час прогнозування щодо рядів, які використовуються при ідентифікації [6]. Похибка прогнозу — це міра відхилення прогнозу від справжнього значення відповідного параметра; переважно вона описується залишковим середньоквадратичним відхиленням σ_{rms} . Для оцінки виправданості прогнозу часто користуються критеріями, які визначаються, головню, коефіцієнтом кореляції r між спрогнозованими та істинними значеннями параметра, а також — ефективністю передбачення: $p_e = 1 - \sigma_{\text{rms}}^2 / \sigma^2$, σ — середньоквадратичне відхилення значень спрогнозованого параметра.

Для нашого випадку час передісторії — $N = 40$, число параметрів моделі — $K = 5$. Довжина ряду значень вхідних параметрів, за якими проводили тренування моделі, становило 1000. Оцінку якості прогнозу зроблено за результатами 100 послідовних точкових прогнозів.

V. ФІЛЬТРАЦІЯ ВХІДНИХ ДАНИХ

Ще один чинник суттєво впливає на виправданість прогнозу, а саме — наявність квазідобових шумових складників у часових рядах використовуваних фізичних параметрів — прогностантів. Ці шумові складники мають вагомий вплив на результати прогнозу — вони погіршують його якість. Тому вхідні дані були пропущені через відповідні низькочастотні фільтри Ланцоша [7], які пригнічували високочастотні шуми. Для

такої фільтрації оптимальними є фільтри другого порядку за ширини вікна 3. Для такого фільтра останній елемент часового ряду буде нефільтрованим. Для фільтрації цього елемента ми використали рекурсивні фільтри (Баттерворта, наприклад [7]). Виявилось, що застосування фільтрів до високочастотних шумів поліпшує якість прогнозу — зокрема для прогнозу із завчасністю 1 доба коефіцієнт кореляції між спостережуваними та спрогнозованими значеннями індексу зростає на 10 – 12%; причому величина частоти фільтра f_s , яка задає частоти згладжування вхідних даних, також впливає на ефективність прогнозу. Згідно з результатами наших досліджень для оптимального прогнозу із завчасністю 1 доба слід використовувати середньопівторадобові значення, із завчасністю 2 доби — середньодводобові значення, із завчасністю 3 доби — середньотридобові значення.

VI. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Ми отримали прогноз планетарного геомагнітного індексу $\sum K_p$ на двох ділянках поточного 24-го циклу сонячної активності. На рис. 1,а показано результати прогнозу на висхідній (до максимуму) гілці сонячної активності (від 1 серпня до 2 жовтня 2012 р.); на рис. 1,б — прогноз на низхідній (до мінімуму) гілці сонячного циклу (від 1 листопада 2016 р. до 2 січня 2017 р.).

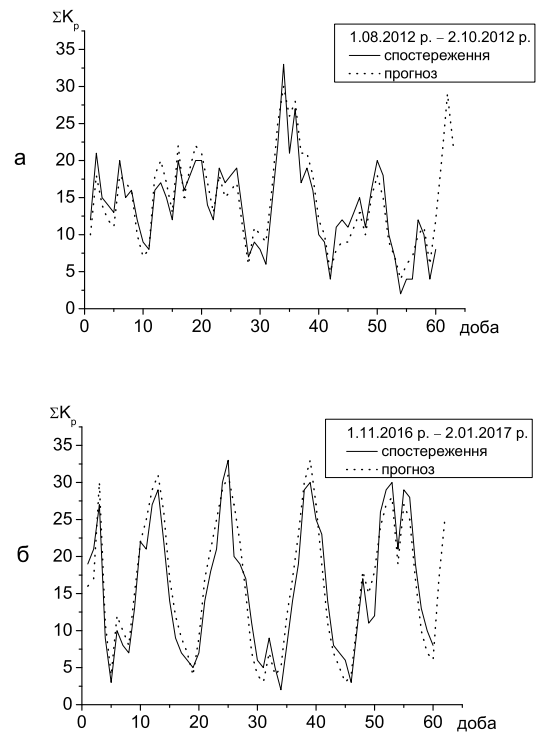


Рис. 1. Прогноз планетарного геомагнітного індексу $\sum K_p$ із завчасністю прогнозування на 3 доби: а — прогноз на висхідній гілці сонячної активності, б — прогноз на низхідній гілці активності 24-го сонячного циклу.

Кількісні характеристики якості та ефективності отриманих результатів наведені в таблиці.

Завчасність, доба	2012 р.			2016 р.		
	$r(r_0)$	σ_{rms}/σ	p_e	$r(r_0)$	σ_{rms}/σ	p_e
1	0.93(0.70)	0.28	0.92	0.93(0.70)	0.28	0.92
2	0.91(0.33)	0.35	0.88	0.91(0.33)	0.34	0.89
3	0.88(0.19)	0.45	0.80	0.89(0.20)	0.43	0.82

Таблиця. Ефективність прогнозів різної завчасності для планетарного геомагнітного індексу $\sum K_p$.

тут r — коефіцієнт кореляції між спостережуваними та спрогнозованими значеннями індексу $\sum K_p$, r_0 — значення коефіцієнта кореляції у випадку найпростішого прогнозу (“завтра буде так, як сьогодні”); σ_{rms}/σ — це відношення залишкової середньоквадратичної похибки між спрогнозованими та спостережуваними значеннями індексу $\sum K_p$ до середньоквадратичної похибки значень цього індексу; p_e — ефективність передбачення: $p_e = 1 - \sigma_{rms}^2/\sigma^2$.

Отже, коефіцієнти кореляції між спостережуваними та спрогнозованими індексами $\sum K_p$ із завчасністю 1–3 доби набувають значень у межах $0.88 \leq r \leq 0.93$; ефективність передбачення також висока — $0.80 \leq p_e \leq 0.92$, що свідчить про хорошу оцінку вправдовуваності прогнозу.

VII. ВИСНОВКИ

- Розроблено методу короткострокового прогнозу індексів геомагнітних збурень $\sum K_p$, які є відгуком на зміни активності Сонця протягом 11-літнього циклу. В основі математичної моделі прогнозу лежить рівняння лінійної множинної регресії випадкового процесу; виділені найбільш геоелективні прогнозанти — ними виявились потоки сонячного вітру, підсилені рентгенівськими потоками від сонячних спалахів.
- Обчислено кількісні характеристики якості та ефективності отриманих результатів: коефіцієнт кореляції між спостережуваними та спрогнозованими планетарними геомагнітними індексами

перевищує 0.9, що свідчить про високу ефективність передбачення.

- Розроблена методика прогнозування методом лінійної множинної регресії дає добрі результа-

ти на різних фазах циклу сонячної активності, що підтверджується адекватністю отриманих короткострокових прогнозів геомагнітних збурень із завчасністю 1–3 доби.

-
- [1] V. Bothmer, in *Solar System Update*, edited by P. Blondel, J. W. Mason (Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006), p. 1.
- [2] E. Saiz, Y. Cerrato, C. Cid, *Lect. Notes Essays Astrophys.* **2**, 139 (2006).
- [3] М. І. Стоділка, *Косм. наук. технол.* **16**, 46 (2010).
- [4] Э. М. Браверман, И. Е. Мучник, *Структурные методы обработки эмпирических данных* (Наука, Москва, 1983).
- [5] А. В. Холопцев, М. П. Никифорова, *Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна, сер.: екол.* **6**, 13 (2011).
- [6] A. S. Pagnovski, *Astrophys. Space Sci.* **323**, 169 (2009).
- [7] П. В. Хемминг, *Цифровые фильтры* (Сов. радио, Москва, 1980).

CONSTRUCTION OF A MODEL FOR PREDICTION OF THE MAGNETIC FIELD OF THE EARTH PERTURBATIONS DUE TO SOLAR ACTIVITY

O. A. Baran¹, M. I. Stodilka¹, M. M. Koval'chuk¹, M. B. Hirnyak¹, I. P. Laushnyk²

¹ *The Ivan Franko National University of Lviv, Astronomical Observatory, 8, Kyrylo and Mephodij St., Lviv, UA-79005, Ukraine*
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

² *Lviv branch of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 12-a, Blazhkevich St., Lviv, UA-79055, Ukraine*

A method for the short-term prediction of magnetic perturbations of the Earth as a response to changes in solar activity during an 11-year cycle has been developed. The basis of the mathematical model is the equation of linear multiple regression of the random process.

We used the time series of data obtained from the database of NOAA SWPC in the current 24th cycle of solar activity. We have studied fluxes of solar radiation, the flows of the corpuscles and the indices of geomagnetic disturbances in the Earth's magnetosphere caused by the radiation. The flows of solar wind (proton fluence with energy $E_p > 1$ MeV and electron fluence with energy $E_e > 0.8$ MeV) enhanced by X-ray streams from solar flares turned out to be the most geoeffective predictors.

Identification procedures for the prognostic model have been carried out. The input data were passed through the appropriate low-frequency Lancos filters that suppressed high-frequency noise. We found that the use of the filters improves the quality of the prediction. We established the criteria by which the quantitative characteristics of the quality and effectiveness of the results were calculated. The correlation coefficient between the observed and predicted planetary geomagnetic indices is greater than 0.9 (the use of the filters for the prediction with one day lead time increases the correlation coefficient by 10–12%). The efficiency of the prediction with 1–3 days lead time is greater than 0.8. This indicates the validity of the developed prediction method.