

УДК 521.937
PACS 96.60 Tf

ЕМПІРИЧНА МОДЕЛЬ КОРОТКОТЕРМІНОВОГО СТІЙКОГО ПРОГНОЗУ ГЕОМАГНІТНИХ ЗБУРЕНЬ

М. Стоділка¹, І. Лаушник²,
М. Ковальчук¹, М. Гірняк¹

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

² *Львівська філія ДНУЗТ
вул. Блажкєвич, 12а, 79052 Львів, Україна*

Отримано емпіричну модель стійкого прогнозу геомагнітних збурень планетарного індексу A_p як відгуку на вияви активності Сонця. Розроблений прогноз дає добрі результати на різних фазах циклу сонячної активності. Коефіцієнт кореляції між спостережуваними та прогнозованими індексами A_p більший від 0,9.

Ключові слова: геомагнітні збурення, сонячна активність, прогноз.

Об'єктами досліджень в сонячно-земній фізиці в основному є відкриті системи, переважно нелінійні, багатопараметричні з великим числом зв'язків, часто багаторівневі. Засобом дослідження таких об'єктів є часові ряди прямих і опосередкованих геліогеофізичних індексів за тривалі інтервали часу, які мають високу ступінь однорідності і відображають різні процеси на Сонці і в земній атмосфері. Ці індекси містять кодовану інформацію про значення фізичних параметрів, що визначають стан досліджуваної системи, тобто служать діагностичним засобом.

Завдяки інтенсивним дослідженням останнього десятиліття на перше місце серед сонячних явищ по геоєфективності вийшли сплески випромінювання Сонця і корпускулярні потоки. Отже, на сьогодні наявні всі передумови для того, щоб розрахувати за спостережуваними даними сонячної активності її вплив на геофізичні явища з подальшим передбаченням земних збурень на основі спостережень Сонця.

Процеси в системі Сонце–Земля (так звана «космічна погода») формуються через електромагнітні поля на Сонці, в міжпланетному просторі, в магнітосфері та іоносфері і на Землі, де реєструється екстремальне наростання потоку космічних променів. Всі ці фактори відображаються в метеорологічних та біологічних

процесах, мають вплив на технічні та технологічні процеси. У періоди активності Сонця спостерігаються інтенсивні рухи сонячної плазми, які супроводжуються сильними магнітними полями, внаслідок чого на Землі розвивається магнітна буря. Дослідженням зв'язків між викидами сонячної матерії і геомагнітними штормами займалися ряд авторів [1–3]. Активність земного магнітного поля реєструється великою кількістю геомагнітних обсерваторій на різних широтах у різних точках земної кулі. Геомагнітні бурі є флуктуаціями з різними часовими масштабами, які накладаються на головне магнітне поле Землі. Для опису цих флуктуацій служать кілька геомагнітних індексів, що використовуються для статистичних досліджень в сонячно-земній фізиці. Ефективним методом одержання інформації про сонячно-земні зв'язки є статистичний аналіз часових рядів параметрів сонячної активності та геомагнітних індексів. Статистичний підхід поряд із експоненціальним згладжуванням часто використовують в адаптивних моделях прогнозування [4, 5]. У новому підході, розробленому у роботі [6], лежить регресійне моделювання. Значення параметру, який прогнозується, шукають у вигляді лінійної комбінації регресорів, які є вхідними величинами і функціями вхідних величин і їх комбінації.

На практиці для опису сонячно-земних зв'язків широко застосовується планетарний індекс A_p , який є добовою характеристикою магнітного поля і визначається усередненням даних від кількох геомагнітних обсерваторій, розташованих у різних пунктах Землі [7]. Оскільки неспокійне магнітне поле збурює іоносферу не відразу, а поступово, то сьогоднішні значення A_p може характеризувати іоносферу на завтра.

Задача прогнозування геофізичних явищ розроблена набагато гірше, ніж прогнозування сонячної активності. Саме розв'язку задачі короткотермінового прогнозування геомагнітних збурень як відгуку на прояви активності Сонця присвячена дана робота. Ми розробили емпіричну модель стійкого прогнозу геомагнітних збурень із завчасністю, не меншою однієї доби.

У кожній прогностичній моделі необхідно враховувати конкретний набір індексів. У нашій моделі ми використали регресори, які відповідають фізичним параметрам. Вважаємо, що геомагнітне збурення на даний момент часу визначається параметрами сонячної активності та значеннями відповідного геомагнітного збурення за попередні моменти часу. Тому, як геоефективні фактори сонячної активності, ми запозичили часові ряди таких спостережуваних даних (www ftp.ngdc.noaa.gov/STP/Solar data):

- числа Вольфа;
- площі сонячних плям;
- радіопотік на довжині хвилі 10,7 см;
- рентгенівський потік;
- потік протонів з енергією > 1 MeV (GOES-8);
- потік електронів з енергією $> 0,6$ MeV (GOES-8);
- дані вимірювань міжпланетного магнітного поля.

Для опису геомагнітних збурень ми брали часові ряди планетарного індексу A_p (www.swpc.noaa.gov/ftpd/warehouse). Всі ці фізичні параметри x центрувались і нормувались на середньоквадратичне відхилення. Рівняння регресії

прогностичної моделі матиме вигляд:

$$x_k(i+\tau) = \sum_{n=1}^N c_n x_1(i-n+1) + \sum_{n=1}^N c_{n+N} x_2(i-n+1) + \dots + \sum_{n=1}^N c_{n+(K-1)\cdot N} x_K(i-n+1),$$

де $i = N \div I - \tau - N + 1$; τ – проміжок часу, на який розробляється прогноз; K – число параметрів сонячної активності, які відповідають за геомагнітне збурення; N – проміжок часу, за який використовують інформацію для розробки прогнозу; I – довжина ряду значень фізичних параметрів. У нашому випадку: $N \sim 10\text{--}40$, $I \sim 4000$, $K = 8$. У випадку авторегресії коефіцієнти c_i повинні задовольняти умові:

$$\sum_{n=1}^N c_n + \sum_{n=1}^N c_{n+N} + \dots + \sum_{n=1}^N c_{n+(K-1)\cdot N} = 1.$$

Записані рівняння дозволяють підібрати такі коефіцієнти моделі, які забезпечують найменшу похибку прогнозу.

Отримані коефіцієнти c_i визначають прогностичну модель із завчасністю не меншою від однієї доби.

Модель будуюмо не по всій наявній статистиці, а на так званій тестовій вибірці, з якої вилучаються декілька останніх точок. Виходячи з моделі, ми робили прогноз на відповідні інтервали часу, на які припадає тестова вибірка. І на основі різниці між фактичними та спрогнозованими значеннями отримували оцінку прогностичних можливостей нашої моделі.

Результати, отримані за допомогою такої моделі, можуть бути представлені у вигляді інтервального прогнозу: одне значення відповідного параметру на певний момент часу. Під похибкою прогнозу розуміють певну міру відхилення прогнозу від справжнього значення відповідного параметру, тобто залишкове середньоквадратичне відхилення (rms). Хоча зручніше користуватись критеріями якості прогнозу у відносних одиницях: коефіцієнт кореляції (r) між спрогнозованими та істинними значеннями та ефективність передбачення ($p_e = 1 - rms^2/\sigma^2$). Інтервальний прогноз задає верхню і нижню границю прогнозу (довірчий інтервал) для певного моменту часу та відповідну довірчу ймовірність попадання в цей інтервал.

На результаті прогнозу вагомий вплив має сама природа вхідних фізичних параметрів і методика їх отримання: часові ряди цих параметрів є зашумлені. Тому всі вхідні дані, які нами використовувались, були пропущені через відповідні низькочастотні фільтри Ланцоша [8].

Ми отримали прогноз із різною завчасністю: одна доба, дві доби, три доби. Для кожного випадку ми вибирали відповідні значення довжини навчальної вибірки N з інтервалу від 40 до 80, а також частоти зрізу низькочастотного фільтра f_s .

Оцінку якості прогнозу ми проводили за результатами 100-а послідовних інтервальних прогнозів. У табл. 1 приведені отримані результати: r — коефіцієнт кореляції між спрогнозованими (по моделях, отриманих з фільтрованих даних)

Табл. 1. Вплив фільтрації вхідних даних на якість прогнозу планетарного індексу A_p

Завчасність, доба	r	σ_{rms}/σ_0	f_s	$K \times N$	p_e
1	2	3	4	5	6
1	0,94	0,23	0,32	160	0,88
2	0,92	0,33	0,24	160	0,85
3	0,90	0,39	0,19	120	0,81
1	0,83	0,47	0,5	24	0,70

та спостережуваними (не фільтрованими) значеннями індексу A_p ; σ_{rms}/σ_0 — відношення залишкового (між спрогнозованими та спостережуваними значеннями індексу A_p) середньоквадратичного відхилення до середньоквадратичного відхилення центрованих значень індексу; f_s — частота зрізу фільтра; $K \times N$ — загальне число регресорів; p_e — ефективність передбачення.

У перших трьох випадках (із завчасністю одна доба, дві доби, три доби) моделі побудована за фільтрованими регресорами. У нижньому рядку приведені

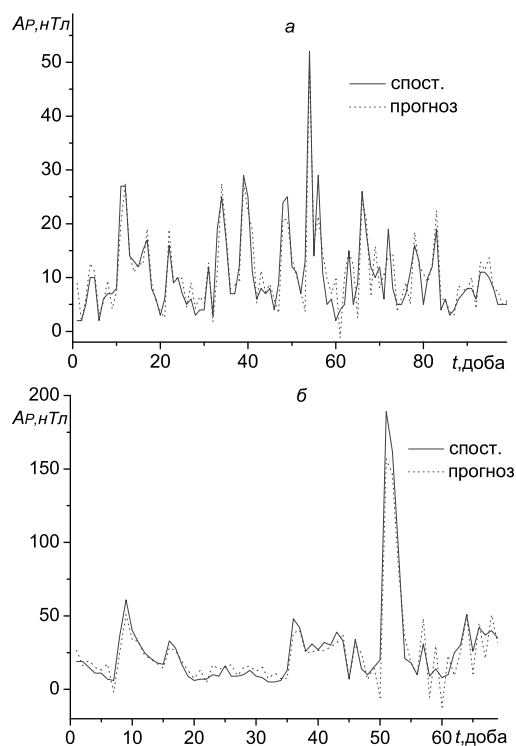


Рис. 1. Прогноз геомагнітних індексів A_p із реальною завчасністю прогнозу на 1 добу: а) перший інтервал циклу сонячної активності; б) другий інтервал

результати прогнозу з використанням не фільтрованих даних для побудови моделі прогнозу; частота Найквіста становить 0,5, їй відповідає період дві доби, коли розглядаються середньодобові значення.

Як бачимо, фільтрація високочастотних шумів суттєво покращує якість прогнозу: так за прогнозу із завчасністю в одну добу коефіцієнт кореляції r зростає від 0,83 до 0,94. Однак, із збільшенням завчасності прогнозу, коефіцієнт кореляції r та ефективність прогнозу p_e зменшуються. Отже, ефективність роботи отриманої прогностичної моделі найвища для короткотермінового прогнозу геомагнітного планетарного індекса A_p із завчасністю в одну добу.

Для детальнішої розробки методики прогнозу середньодобових геомагнітних збурень планетарного A_p -індексу ми розглянули отримані ряди прогнозів у двох фазах 23-го одинадцятилітнього циклу сонячної активності (1996–2008 рр.), а саме:

- у кінці вітки росту (перед першим максимумом; початок — грудень 1999 р.);
- середина вітки спаду; початок — вересень 2003 р.

Результати прогнозу геомагнітних індексів A_p представлені на рис. 1.

Коефіцієнт кореляції між спрогнозованими (по моделях з фільтрованими даними) та спостережуваними (не фільтрованими) індексами A_p становить 0,93 для першого участку та 0,95 — для другого. Авторегресія теж дає високі коефіцієнти кореляції: 0,91 та 0,93 для відповідних участків.

Отже, запропонований алгоритм прогнозу дає непогані результати, особливо для великих збурень.

За результатами спостережень можна зробити такі висновки:

1. Розроблено методику прогнозу середньодобових геомагнітних збурень планетарного A_p -індексу.
2. Отримано емпіричну модель стійкого прогнозу геомагнітних збурень із завчасністю не меншою від однієї доби.
3. Показано, що фільтрація високочастотних шумів суттєво покращує якість прогнозу; тому коефіцієнти моделі слід шукати за відфільтрованими значеннями часових рядів спостережуваних даних сонячної активності та параметрів геофізичних збурень.
4. Коефіцієнт кореляції між спостережуваними та спрогнозованими індексами A_p більший від 0,9.
5. Розроблений прогноз дає добрі результати на різних фазах циклу сонячної активності.

-
1. *Gonzalez W. D.* Interplanetary origin of geomagnetic storms / W. D. Gonzalez, B. T. Tsurutani, A. L. Gonzalez // *Space Sci. Rev.* – 1999. – Vol. 88. – P. 529–562.
 2. *Kane R. P.* How good is the relation ship of Solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms / R. P. Kane // *J. Geophys. Res.* – 2005. – Vol. 110. – P. 2213–2215.

3. *Yermolaev Y.I.* Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on Solar and interplanetary events a review / Y.I. Yermolaev, M.Y. Yermolaev, G.N. Zastenker, et.al. // *Planet. Space Sci.* – 2005. – Vol. 53. – P. 189–196.
4. *Lundstedt H.* Operational forecasts of the geomagnetic index Dst index / H. Lundstedt, H. Gleisner, P. Wintoft // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – Vol. 29. – Is. 24. – P. 2181–2184.
5. *Wu J.* Geomagnetic storm predictions from solar wind data with the use of dynamic neural networks / J. Wu, H. Lundstedt // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102. – Is. A7. – P. 14255–14268.
6. *Parnowski A.S.* Regression modeling method of space weather prediction / A.S. Parnowski // *Astrophysics and Space Science.* – 2009. – Vol. 323. – Is. 2. – P. 169–180.
7. *Акасофу С.-И.* Солнечно-земная физика / С.-И. Акасофу, С. Чепмен – М. : Мир, 1974. – Ч. 1. – 384 с. ; – М. : Мир, 1975. – Ч. 2. – 512 с.
8. *Хемминг Р. В.* Цифровые фильтры / Р. В. Хемминг – М. : Советское радио, 1990. – 224 с.

THE EMPIRICAL MODEL FOR RELIABLE SHORT-TERM FORECAST OF GEOMAGNETIC PERTURBATIONS

M. Stodilka¹, I. Laushnyk²,
M. Koval'chuk¹, M. Hirnyak¹

¹ *Astronomical Observatory
of the Ivan Franko National University of Lviv
Kyrylo and Mefodiy str., 8, 79005 Lviv, Ukraine*

² *Lviv branch of DNURT
Blazhkevych str., 12a, 79052 Lviv, Ukraine*

The empirical model is developed for reliable short-term forecast of geomagnetic perturbations of the planetary index A_p as a response to manifestations of solar activity. The forecast suggested by us gives good results on the different phases of solar activity cycle. The correlation coefficient between the observed and predicted values of the A_p index is greater than 0,9.

Key words: geomagnetic perturbations, solar activity, prediction.

**ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
КРАТКОСРОЧНОГО УСТОЙЧИВОГО ПРОГНОЗА
ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

**М. Стодилка¹, И. Лаушник²,
М. Ковальчук¹, М. Гирняк¹**

¹ *Астрономическая обсерватория ЛНУ имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия, 8, 79005 Львов, Украина*

² *Львовский филиал ДНУЗТ
ул. Блажкевич, 12а, 79052 Львов, Украина*

Получена эмпирическая модель устойчивого прогноза геомагнитных возмущений планетарного индекса A_p как отклика на проявления активности Солнца. Разработанный прогноз дает хорошие результаты на разных фазах солнечной активности. Коэффициент корреляции между наблюдаемыми и спрогнозированными индексами A_p больше 0,9.

Ключевые слова: геомагнитные возмущения, солнечная активность, прогноз.

Статтю отримано: 27.10.2010
Прийнято до друку: 14.07.2011