

<https://doi.org/10.15407/knit2021.01.078>
УДК 550.38

Д. І. ВЛАСОВ¹, пров. інж.

E-mail: dima.i.vlasov@gmail.com

О. С. ПАРНОВСЬКИЙ^{1,2}, старш. наук. співроб., пров. інж., канд. фіз.-мат. наук

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
Проспект Академіка Глушкова 40, корп. 4/1, Київ, Україна, 03187

² Головний центр спеціального контролю

вул. Космічна 1, смт. Городок, Радомишльський район, Житомирська область, Україна, 12265

ПРОГНОЗУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ГЕОМАГНІТНИХ ЗБУРЕНЬ НА ПРИКЛАДІ ДАНИХ МАГНІТНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ «ЛЬВІВ»

Вперше в світовій практиці отримано моделі для прогнозування геомагнітних елементів X , Y , Z . В даній роботі наводяться результати такого прогнозування для магнітної обсерваторії «Львів» з глибиною прогнозу 3 години. Розроблені моделі мають такі властивості: обсерваторія — LVV ; прогнозовані величини — XYZ ; глибина прогнозу — 3 год; коефіцієнти кореляції з усередненими даними вимірювань — $0.824(X)$, $0.811(Y)$, $0.804(Z)$; ефективність прогнозування — $0.816(X)$, $0.803(Y)$, $0.801(Z)$; skill score — $0.115(X)$, $0.095(Y)$, $0.099(Z)$. Розроблені моделі пройшли апробацію у Головному центрі спеціального контролю і були визнані такими, що задовольняють основні вимоги до оперативних прогнозних моделей.

Ключові слова: космічна погода, локальна геомагнітна активність, регресійне моделювання.

Вступ. Починаючи з другої половини 2000-х років, діяльність в галузі космічної погоди почала орієнтуватися на потреби конкретних груп кінцевих споживачів. В ході цього процесу з'ясувалося, що планетарні геомагнітні індекси, які десятиліттями використовувалися професійною спільнотою, не задовольняють цих потреб. Запит на просторово розподілену інформацію про рівень геомагнітної активності задовольнявся двома основними шляхами: побудовою регіональних індексів, які переносили методики розрахунку планетарних індексів на географічно обмежені регіони, а також шляхом фізичного моделювання на суперкомп'ютерах процесів у ближньому космосі.

Ми пропонуємо якісно інший підхід до розв'язання зазначеної задачі. Він полягає у безпосередньому прогнозуванні майбутніх значень компонентів вектора напруженості геомагнітного поля на магнітних обсерваторіях та рядових магнітних спостережних пунктах. За необхідності розрахунку прогнозних значень у інших точках таку інформацію можна отримати шляхом інтерполяції прогнозних значень з найближчих спостережних пунктів з використанням, наприклад, методу комірок Вороного або схожого за змістом. Також можливо прогнозувати не компоненти вектора напруженості, а локальні геомагнітні індекси [16], які є більш простими для безпосереднього аналізу людиною, проте їх складніше

Цитування: Власов Д. І., Парновський О. С. Прогнозування локальних геомагнітних збурень на прикладі даних магнітної обсерваторії «Львів». *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 1 (128). С. 78–84. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.078>

використовувати як вхідні дані для подальших розрахунків. Крім того, такий підхід буде важче застосувати до інших магнітних обсерваторій, для яких подібні індекси не розроблено. Додаткова перевага прогнозування саме компонентів вектору напруженості полягає в тому, що вони дають змогу оцінювати швидкість зміни магнітного поля в районі розташування магнітної обсерваторії або магнітного спостережного пункту.

Метою даної роботи є побудова прогнозних моделей всіх трьох декартових компонентів вектора напруженості геомагнітного поля на одній магнітній обсерваторії. Проведений пошук не виявив робіт, в яких би описувалось рішення поставленої задачі. Це дає підстави вважати, що така задача ставиться та розв'язується вперше у світовій практиці.

Метод регресійного моделювання. Для отримання прогнозних моделей локальних геомагнітних збурень ми застосували метод регресійного аналізу [11], що базується на регресійному та дисперсійному аналізі [6], з деякими модифікаціями, описаними нижче. Раніше цей метод був застосований для прогнозування планетарних геомагнітних індексів [10, 11], зокрема на його основі було розроблено оперативний сервіс прогнозування геомагнітних індексів D_{st} і K_p [4]. Повний опис методу наведено у роботі [11]; тут ми наводимо лише основні його риси.

В рамках цього методу прогнозні значення y^* вихідної величини у шукаються у вигляді часткової множинної регресії [11]:

$$y^*(T + \theta) = \sum_i C_i x_i(T), \quad (1)$$

де T — поточний момент часу, θ — глибина прогнозу, C_i — коефіцієнти регресії, x_i — регресори, які є деякими комбінаціями вхідних величин u . В даній роботі регресори були членами поліному Колмогорова — Габора від вхідних величин з затримками l :

$$x_i(t) = \prod_{k=1}^K u_k^{p_k}(t-l), \quad l = \overline{0, L}. \quad (2)$$

де K — кількість вхідних величин, p_k — показники ступеня з обмеженою сумою, L — глибина пам'яті моделі (максимальний лаг).

Вибір саме такої форми регресорів обумовлений такими міркуваннями. Геомагнітні бурі є наслідком нелінійних фізичних процесів у геокосмосі з дуже різними часовими масштабами — від десятків хвилин до декількох діб. Тому для коректного описання цих процесів у моделі має бути, з одного боку, часове розділення, що відповідає найменшим часовим масштабам чи принаймні часовим масштабам найсильніших за проявами процесів, а з іншого — враховувати фазу процесів з більшими часовими масштабами. Це досягається використанням затримок вхідних величин.

Структурна ідентифікація моделей провадиться методом дисперсійного аналізу з використанням критерію Фішера (F -тест) [6, 5]. Для підвищення стійкості моделей та запобігання проблеми оверфітінгу сформований вхідний масив даних розділяється на навчальну, тестову та екзаменаційну вибірки. На навчальній вибірці регресори як додаються, так і відкидаються, а на тестовій — лише відкидаються.

Параметрична ідентифікація моделей провадиться узагальненим методом найменших квадратів на екзаменаційній вибірці з однаковими статистичними вагами всіх точок. У роботі [11] для отримання параметричної ідентифікації використовувався метод нормованих рівнянь з використанням алгоритму Гаусса — Жордана. В цій роботі ми використовуємо варіант алгоритму параметричної ідентифікації, заснований на методі розкладу за сингулярними значеннями (SVD), див. [13]. Це дозволяє уникнути помилкового відкидання значущих регресорів в ситуації, коли інформаційна матриця системи близька до виродженої. Відкидання суттєвих регресорів при використанні алгоритму Гаусса — Жордана було обумовлене тим, що при параметричній ідентифікації виникають пари регресорів, кожний з яких несуттєвий, та відкидання одного з них не впливало на точність побудованої моделі. Відкидання ж обох регресорів мало значний вплив на точність прогнозу, отриманого за допомогою моделі. Крім того, процедура є значно швидшою за використання методу нормалізованих рівнянь з перевіркою значимості груп регресорів і дозволяє скоротити час побудови моделі з декіль-

кох діб до декількох годин. Точність отриманих моделей при цьому залишалась на тому ж або вищому рівні. При цьому метод SVD застосовувався до матриці Фішера, а не до інформаційної матриці.

Результатом застосування цього методу є прогностичні моделі для вихідної величини. З точки зору теорії керування, ці моделі належать до класу чорної скриньки з багатьма входами, одним виходом та зворотним зв'язком. З точки зору теорії систем ці моделі належать до класу NARX, тобто містять авторегресійну частину, зовнішні входи та їхні нелінійні комбінації [7]. З точки зору математичної статистики ці моделі належать до лінійних часткових множинних немарківських регресійних моделей.

Окрім очевидного застосування для прогнозування вихідної величини, структура та параметри таких моделей можуть дати корисну інформацію про фізичні процеси у досліджуваній системі [10, 12].

Використані дані. Для створення вхідного масиву даних було використано базу даних OMNI 2 [8, 3], яка містить дані значень міжпланетного магнітного поля, сонячного вітру та геомагнітних індексів, усереднені за одногодинними інтервалами, починаючи з 1 січня 1963 р. Дані до 1976 р. були відкинуті через несистематичний характер вимірювань. З усього масиву даних були використані тільки ті параметри, значення яких доступні в реальному часі.

Як вихідні дані використано значення геомагнітних елементів X , Y та Z для магнітної обсерваторії «Львів» Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України (код IAGA: LVV) за той самий період часу з однохвилинним та одногодинним часовим розділенням. Дані були отримані з міжнародної мережі INTERMAGNET, а також з всесвітнього центру даних з геомагнетизму в Кіото. Дані з однохвилинним часовим розділенням також були приведені до одногодинного часового розділення шляхом усереднення [14] для подальшого опрацювання та формування відповідних вибірок.

Також використовувались синтетичні вхідні величини, що дорівнювали синусам та косинусам з періодами у 1 добу та 1 рік. Таким чином,

загальна кількість вхідних величин для кожної моделі становила 12.

Сформований масив даних був розділений на три вибірки: навчальну (1976—2000 рр.), тестову (2001—2009 рр.) та екзаменаційну (2009—2018 рр.) з приблизно рівною кількістю точок.

Опис методики. Описаний вище метод був реалізований у вигляді двох програмних модулів, один з яких здійснює автоматичне налаштування моделей на навчальній та тестовій вибірках, а другий — валідацію отриманих моделей на екзаменаційній вибірці.

При налаштуванні моделей були обрані такі граничні рівні статистичної значимості регресорів: 0.1 для навчальної вибірки та 0.05 для тестової вибірки. Моделі будувалися для кожного з геомагнітних елементів незалежно. Глибина пам'яті складала 24 години для параметрів сонячного вітру та 27 діб для геомагнітних даних.

При валідації моделей використовувались такі характеристики:

— ефективність прогнозування PE :

$$PE = \frac{1 - RMS^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

(RMS — середнє квадратичне відхилення прогнозу, σ — стандартне відхилення вибірки);

— коефіцієнт r лінійної кореляції Пірсона між вимірним і прогнозним значенням (LC);

— параметр «skill score»:

$$SS = \frac{S_{for} - S_{ref}}{S_{perfor} - S_{ref}}, \quad (4)$$

де S — певна характеристика (в нашому випадку — СКВ) для різних моделей, індекси for, ref, perfor (forecast, reference, perfect forecast) вказують відповідно на прогнозну, референтну та ідеальну моделі; за ідеальний прогноз використовувалися істинні значення вихідної величини, а за референтний — ті ж значення, зсунуті назад у часі на глибину прогнозу (т. зв. *persistence model*).

Для референтної моделі також розраховувалися характеристики PE та LC . Більш детальний опис цих та інших характеристик прогнозу див. веб-сторінку [1].

Крім того, для найсильніших геомагнітних бур, що потрапляли у екзаменаційну вибірку,

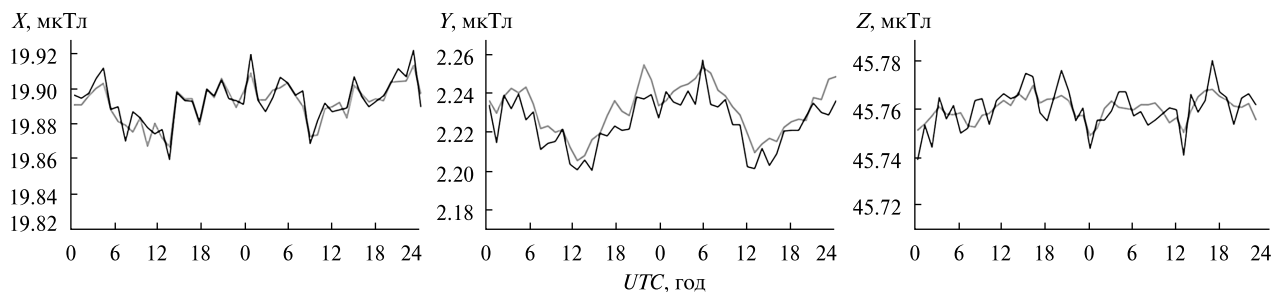


Рис. 1. Приклад прогнозів геомагнітних елементів X , Y , Z на магнітній обсерваторії «Львів» з глибиною прогнозування 3 години в спокійних умовах 23—24.07.2017 р. Чорна лінія — прогноз, сіра лінія — вимірювання

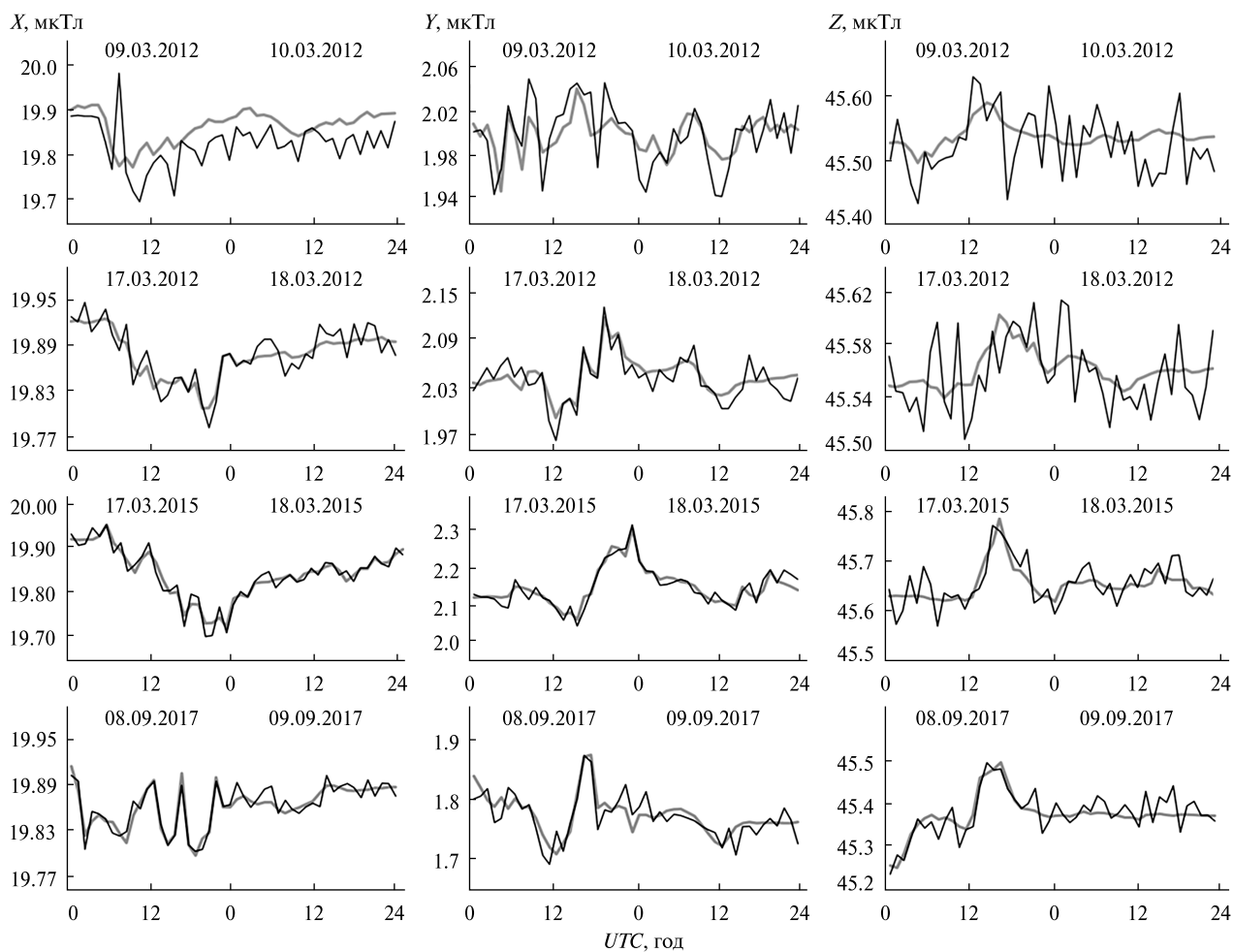


Рис. 2. Результати прогнозування геомагнітних елементів X , Y , Z на магнітній обсерваторії «Львів» з глибиною прогнозування 3 год під час чотирьох геомагнітних бур (09—10.03.2012 р., 17—18.03.2013 р., 17—18.03.2015 р., 08—09.09.2017 р.). Чорна лінія — прогноз, сіра лінія — вимірювання

здійснювалось візуальне порівняння прогнозованих значень з виміряними.

Результати прогнозування. В результаті отримано моделі для прогнозування значень компонентів локального магнітного поля з глибиною прогнозу 3 год. Через велику розмірність та немарківську динаміку системи кількість регресорів в цих моделях є достатньо великою: 387 для X , 368 для Y та 326 для Z . Тому ми не наводимо повний перелік регресорів через недоцільність. Статистичні характеристики отриманих моделей наведено у таблиці.

Приклад прогнозів отриманих моделей та їхнє порівняння з реально виміряними значеннями у спокійних умовах та під час геомагнітних бур наведено на рис. 1 та 2 відповідно.

Обговорення отриманих результатів. Отримані позитивні значення *skill score* дозволяють казати про те, що поставленої мети в цілому досягнуто. Натомість аналогічні моделі для прогнозування геомагнітного індексу D_{st} з такою ж глибиною [10, 7] демонструють суттєво більші значення цієї характеристики. Аналогічна картина спостерігається також з ефективністю прогнозування та коефіцієнтом кореляції: для магнітної обсерваторії «Львів» вони становлять близько 80 %, а для індексу D_{st} — близько 90 %. На нашу думку, це може пояснюватися або значним неврахованим внеском локальних джерел магнітного поля, насамперед техногенного характеру, або тим, що дані в навчальній та екзаменаційній вибірці були отримані на різному обладнанні (з 1970 до 2002 року використовувався аналоговий магнітометр Боброва з системою координат HDZF, з 2002 — цифрові варіометри PSM-8911 та LEMI-025 з системою координат XYZF). Для прояснення даного питання ми продовжимо дослідження для більшої кількості магнітних обсерваторій.

В ході попередніх досліджень було встановлено, що використання масиву даних, який покриває лише один цикл сонячної активності за плямами (11 років), не дозволяє отримати прогнози з додатним значенням *skill score*. Логічно допустити, що мінімальний обсяг масиву даних має становити 22 роки (один цикл сонячної активності за магнітним полем), але в даному дослідженні це прямо не перевірялося.

Візуальний аналіз прогнозів під час найсильніших геомагнітних бур (див. рис. 2) показує, що отримані прогнозні моделі видають правильні оцінки трьох найважливіших характеристик бур: часу початку та амплітуди головної фази та тривалості фази відновлення у компонентах X та Y .

Дещо більші похибки у визначенні компонента Z потребують додаткових досліджень.

Єдиною подією, для якої отримано прогноз належної якості, була буря 09-10.03.2012. Причиною цього були некоректні значення швидкості сонячного вітру за даними приладу SWEPAM на борту КА ACE, які становили менше 300 км/с, тоді як за даними протонного монітору у складі приладу CELIAS на борту КА SOHO та приладу MTOF на борту КА WIND вона перевищувала 800 км/с. Причини некоректної роботи приладу SWEPAM під час даної події обговорюються в роботі [9].

Висновки. В результаті проведеної роботи вперше у світовій практиці вдалося отримати прогнозні моделі локальних геомагнітних збурень. Розроблені моделі мають такі властивості:

- обсерваторія: LVV;
- прогнозовані величини: XYZ;
- глибина прогнозу: 3 год;
- ефективність прогнозування: 0.816 (X), 0.803(Y), 0.801 (Z);
- коефіцієнти кореляції з усередненими даними вимірювань: 0.824 (X), 0.811(Y), 0.804 (Z);

Статистичні характеристики (ефективність прогнозування PE , коефіцієнт лінійної кореляції r та *skill score*) отриманих прогнозних моделей на екзаменаційній вибірці

Елемент	$PE, \%$		$r, \%$		$SS, \%$
	прогнозна модель	референтна модель	прогнозна модель	референтна модель	
$LVVX$	81.6	68.6	82.4	70.1	11.5
$LVVY$	80.3	63.4	81.1	70.7	9.5
$LVVZ$	80.1	60.2	80.4	68.9	9.9

- skill score: 0.115 (X), 0.095 (Y), 0.099 (Z);
- середня ефективність прогнозування: 0.8;
- середній коефіцієнт кореляції: 0.8;
- середнє значення *skill score*: 0.1;

Розроблені моделі пройшли апробацію у Головному центрі спеціального контролю і були визнані такими, що задовольняють основним вимогам до оперативних прогнозних моделей:

- використовують лише дані, які доступні, або реалістично можуть бути отримані у масштабі часу, наближеному до реального;
- забезпечують підвищення точності прогнозування (зменшення СКВ) порівняно з референтною моделлю типу persistence;
- можуть застосовуватися у повністю автоматичному режимі;
- можуть переноситися на інші магнітні пункти спостереження без зміни методики.

Крім того, структура та параметри отриманих моделей можуть дати нову інформацію про локальну динаміку геомагнітних збурень.

Автори вдячні *Space Physics Data Facility (SPDF)* та *National Space Science Data Center (NSSDC)* за безкоштовний онлайн-каталог *OMNI2*. Дані *OMNI* були отримані з інтерфейсу *GSFC / SPDF OMNIWeb* [3, 8].

Результати, представлені в даній роботі, спираються на дані, зібрані на магнітних обсерваторіях. Автори висловлюють подяку Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, персоналу геомагнітної обсерваторії «Львів», *INTERMAGNET* за просування високих стандартів магнітної обсерваторії [2] та всесвітньому центру даних з геомагнетизму, Кіото [4].

Автори висловлюють окрему подяку директору магнітної обсерваторії «Львів» Юрію Петровичу Сумаруку за надані дані та цінне обговорення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сайт Forecast verification methods URL: <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> (дата звернення 09.09.2019).
2. Сайт International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET) URL: <http://www.intermagnet.org> (дата звернення 09.09.2019).
3. Сайт OMNIWeb. URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html (дата звернення 09.09.2019).
4. Сайт всесвітнього центру даних з геомагнетизму Кіото. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (дата звернення 09.09.2019).
5. Фишер Р. А. *Статистические методы для исследователей*. Москва: Госстатиздат, 1958. 133 с.
6. Худсон Д. *Статистика для физиков. Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике*. Москва: Мир, 1970. 297 с.
7. Billings S. A. *Nonlinear system identification*. Wiley, 2013. 597 p.
8. King J. H., Papitashvili N. E. Solar Wind Spatial Scales in Comparisons of Hourly Wind and ACE Plasma and Magnetic Field Data. *J. Geophys. Res.* 2004. **110**. A02209. DOI:10.1029/2004JA010804.
9. Machol J. L., Reinard A. A., Viereck R. A., Biesecker D. A. Identification and replacement of proton-contaminated real-time ACE solar wind measurements. *Space Weather*. 2013. **11**, № 7. P. 434–440. DOI:10.1002/swe.20070.
10. Parnowski A. S. Regression modeling method of space weather prediction. *Astrophys. and Space Sci.* 2009. **323**, № 2. P. 169–180. DOI:10.1007/s10509-009-0060-4 [arXiv:0906.3271].
11. Parnowski A. S. Regression modelling of geomagnetic activity. *J. Phys. Studies*. 2011. **15**, № 2. 2002.
12. Parnowski A. S., Polonska A. Yu Regression modelling of the interaction between the solar wind and the terrestrial magnetosphere. *J. Phys. Studies*. 2012. **16**, № 1/2. 1002.
13. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. *Numerical Recipes in FORTRAN. The Art of Scientific Computing [Text]* 2nd Ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992.
14. Reay S., Herzog D., Alex S., Kharin E., McLean S., Nosé M., et al. Magnetic Observatory Data and Metadata: Types and Availability. *Geomagnetic Observations and Models*. 2011. P. 149–181.
15. Semeniv O., Polonska A., Parnowski A. Operational geomagnetic forecast service. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка*. Сер. Астрономія. 2014. № 51. С. 23–24.
16. Sumaruk T., Sumaruk Yu. The New Index of Geomagnetic Activity. *Publ. Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences*. Monographic volume C-99(398). 2007. P. 374–382.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2019; після доопрацювання 15.11.2020

REFERENCES

1. Forecast verification methods. URL: <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> (Last accessed: 09.09.2019).
2. International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET). URL <http://www.intermagnet.org> (Last accessed: 09.09.2019).
3. OMNIWeb online database. URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html (Last accessed: 09.09.2019).
4. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (Last accessed: 09.09.2019).
5. Fisher R. A. (1954). *Statistical methods for research workers*. London: Oliver and Boyd.
6. Hudson D. (1964). *Statistics lectures on elementary statistics and probability*. Geneva.
7. Billings S. A. (2013). *Nonlinear system identification*. Wiley.
8. King J. H., Papitashvili N. E. (2004). Solar Wind Spatial Scales in Comparisons of Hourly Wind and ACE Plasma and Magnetic Field Data. *J. Geophys. Res.*, **110**, A02209. DOI:10.1029/2004JA010804.
9. Machol J. L., Reinard A. A., Viereck R. A., Biesecker D. A. (2013). Identification and replacement of proton-contaminated real-time ACE solar wind measurements. *Space Weather*, **11**, № 7, 434—440. DOI:10.1002/swe.20070.
10. Parnowski A. S. (2009). Regression modeling method of space weather prediction. *Astrophys. and Space Sci.*, **323**, № 2, 169—180. DOI:10.1007/s10509-009-0060-4 [arXiv:0906.3271].
11. Parnowski A. S. (2011). Regression modelling of geomagnetic activity. *J. Phys. Studies*, **15**, № 2, 2002.
12. Parnowski A. S., Polonska A. Yu. (2012). Regression modelling of the interaction between the solar wind and the terrestrial magnetosphere. *J. Phys. Studies*, **16**, № 1/2, 1002.
13. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. (1992). *Numerical Recipes in FORTRAN. The Art of Scientific Computing*. 2nd Ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
14. Reay S., Herzog D., Alex S., Kharin E., McLean S., Nosé M., et al. (2011). Magnetic Observatory Data and Metadata: Types and Availability. *Geomagnetic Observations and Model*, 149—181.
15. Semenov O., Polonska A., Parnowski A. (2014). Operational geomagnetic forecast service. *Bull. Taras Shevchenko Nat. Univ. Kyiv. Ser. Astronomy*, № 51, 23—24.
16. Sumaruk T, Sumaruk Yu. (2007). The New Index of Geomagnetic Activity. *Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences*. Monographic volume C-99(398), 374—382.

Received 09.09.2019

Revised 15.11.2020

D. Vlasov¹, Leading Engineer

E-mail: dima.i.vlasov@gmail.com

A. Parnowski^{1,2}, Senior Researcher, Cand. Sci. in Phys. & Math.

¹ Space Research Institute National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine

40 Glushkova Ave., build. 4/1, Kyiv, 03187 Ukraine

² Main Center of Special Monitoring

1 Kosmichna Str., Gorodok, Radomyshl District, Zhytomyr Region, 12265 Ukraine

PREDICTION OF LOCAL GEOMAGNETIC ACTIVITY FROM DATA OF “LVIV” MAGNETIC OBSERVATORY

For the first time in world practice, the predictive models were constructed for X , Y , Z geomagnetic elements. Based on these models, the prediction was made with 3 hours lead time using data of the “Lviv” magnetic observatory. The properties of models are as follows: observatory — LVV, predicted values — XYZ ; lead time — 3 hours; correlation coefficients’ averaged measurement data — 0.824 (X), 0.811 (Y), 0.804 (Z); prediction efficiency — 0.816 (X), 0.803 (Y), 0.801 (Z); skill score — 0.115 (X), 0.095 (Y), 0.099 (Z). The developed models were tested at the Main Center of Special Monitoring, and they were found to meet the Basic Requirements for operational predictive models.

Keywords: space weather, local geomagnetic activity, regression modeling.