

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.01.072>

УДК 550.383:574.2

М.І. Орлюк
А.А. Роменець

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ
E-mail: orlyuk@igph.kiev.ua, orliuk@ukr.net, romenets@ukr.net

Про взаємозв'язок часових змін магнітного поля Землі з сонячною активністю 19–24-го циклів

Представлено академіком НАН України В.І. Старостенком

Досліджено часові зміни головного геомагнітного поля V_{IGRF} на поверхні Землі співвідносно із сонячною активністю для 19–24-го циклів. Встановлено, що зменшення поля V_{IGRF} на поверхні планети на 1800 нТл добре узгоджується зі зменшенням сонячної активності починаючи з 19-го циклу і дотепер. Іншою важливою виявленою закономірністю є певна узгодженість кривих тренду сонячної активності і відповідної кривої часового градієнта геомагнітного поля (вікової зміни). Показано досить чіткий зв'язок часового градієнта геомагнітного поля (вікових варіацій) з 11- та 22-річними (Хейла) циклами сонячної активності. Зміна геомагнітного поля з періодом циклу Хейла (20–22 р.) добре узгоджується з характером великомасштабного поля Сонця. Особливо важливим результатом є встановлений зв'язок із сонячною активністю не тільки варіацій та збурень геомагнітного поля зовнішнього походження, але і змін та варіацій головного магнітного поля Землі V_{IGRF} механізм генерації якого зв'язаний з її ядром.

Ключові слова: сонячна активність, геомагнітне поле V_{IGRF} , варіація, планета Земля.

Згідно з результатами експериментальних досліджень починаючи з другої половини ХХ ст. до теперішнього часу магнітне поле на поверхні Землі характеризується значними змінами [1–3]. Зазвичай ці зміни геомагнітного поля пов'язувалися з процесами в ядрі та мантиї Землі [4]. Останнім часом з'являється все більше даних про те, що ці зміни можуть бути пов'язані насамперед із сонячною активністю [5]. У статті викладено результати аналізу зміни головного геомагнітного поля (V_{IGRF}) на поверхні Землі, а також його часових градієнтів у зв'язку із сонячною активністю в 19–24-му циклах, які припадають на часовий інтервал 1955–2020 рр.

За мету дослідження ставилося проаналізувати часові зміни головного магнітного поля Землі (V_{IGRF}) на її поверхні співвідносно із сонячною активністю в період 1950–2020 рр. для вивчення сонячно-земних зв'язків.

Цитування: Орлюк М.І., Роменець А.А. Про взаємозв'язок часових змін магнітного поля Землі з сонячною активністю 19–24-го циклів. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2022. № 1. С. 72–78.
<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.01.072>

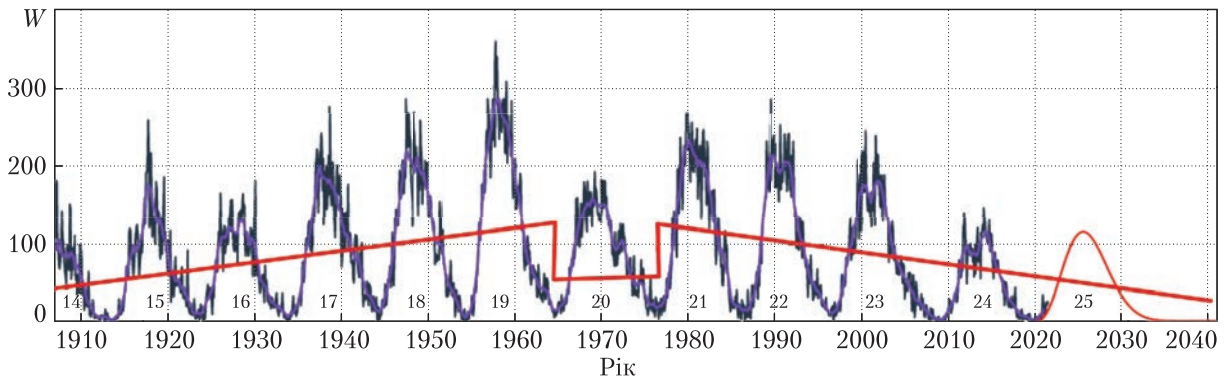


Рис. 1. Сонячна активність (у числах Вольфа) у XX–XXI ст. (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>). Червоною лінією зображено тренд зміни сонячної активності

Методика досліджень. У дослідженні використані стандартні методики з проведенням окремих етапів оцінки часових змін геомагнітного поля і сонячної активності. Для вирішення поставленого завдання насамперед були генеровані цифрові масиви і побудовані цифрові карти B_{IGRF} для всієї земної кулі з кроком 1 рік для часового інтервалу 1950–2020 рр. Розрахунок B_{IGRF} був виконаний в режимі on-line за мережею $1^\circ \times 1^\circ$ по довготі і широті з використанням програмного забезпечення агентства NASA (<https://www.swpc.noaa.gov/DGRF/IGRF>; https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/igrf_vitmo.php). За початок розрахунків прийнятий 1950 р., надалі зміна поля за 5 років визначалася як різниця між його значеннями в 1955 і 1950 рр.: $(dB_{IGRF(1955-1950)} / dt = B_{IGRF(1955)} - B_{IGRF(1950)})$, і т. д. до 2020 р. Такий підхід дає змогу аналізувати як градієнт поля за кожні 5 років, так і сумарні його величини для більш тривалих інтервалів. Для аналізу сонячної активності використано цифрові дані та їх графічну візуалізацію з сайту NOAA (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>). Для сумісного аналізу геомагнітного поля і сонячної активності шляхом поліноміальної апроксимації й згладжування було виділено трендові та варіаційні складові довгоперіодних і короткоперіодних їх змін.

Сонячна активність. Для подальшого аналізу важливою є характеристика окремих циклів сонячної активності щодо їх інтенсивності та тривалості. Для початку слід зазначити, що з 16-го по 19-й цикли спостерігалось закономірне зростання сонячної активності (рис. 1). Але надалі замість платоподібного максимуму сонячної активності в 1965–1970 рр. (який був би закономірним максимумом 120-річного циклу сонячної активності) ми маємо в реальності її провал, а саме: 20-й цикл з майже вдвічі меншою інтенсивністю порівняно з 19-м і 21-м циклами (див. рис. 1). Починаючи з 21-го циклу спостерігається закономірне зменшення сонячної активності [6]. На цьому “спадаючому” фоні спостерігаються 11- і 22-річні (Хейла) цикли сонячної активності [5].

Аналіз сонячної активності з 1950 по 2020 рр. свідчить про певну залежність тривалості сонячного циклу від його активності, а саме: більш активні цикли мають період менше 11 років, а слабоактивні – понад 11 років. Аналіз виконано на підставі чисельних величин згладжених середньомісячних значень сонячної активності в їх співвідношенні з величинами їх максимумів і мінімумів. У таблиці наведені характеристики сонячних циклів, ве-

личини числа Вольфа, часу (місяць, рік), мінімумів і максимумів сонячних циклів, а також їх тривалості в місяцях.

Ґрунтуючись на результатах аналізу, відзначимо, що найінтенсивніший 19-й цикл сонячної активності характеризується досить монолітним максимумом, з ледь помітною “двогорбатістю” кривої. Примітним є той факт, що короткі інтенсивні цикли (18, 19, 21, 22-й) з періодами 122–129 місяців характеризуються більш інтенсивним першим максимумом кривої, а довші (135–151 місяць) слабоінтенсивні цикли (20, 23, 24-й) мають або близькі за величиною максимуми, або більш інтенсивним є другий максимум. При цьому найбільша відмінність максимумів характерна для 24-го циклу сонячної активності.

Геомагнітне поле і його часова збуреність. Відповідно до розрахунків, на поверхні планети максимальні значення B_{IGRF} для 1950 і 2020 рр. характерні для від’ємного магнітного полюса ($B_{IGRF(1950)} = 69000$ нТл, $B_{IGRF(2020)} = 66900$ нТл) (розташованого поблизу Північного географічного полюса Землі) і додатного (розташованого поблизу Антарктичного узбережжя навпроти Австралії), а мінімальні – для приекваторіальних областей Південної Атлантики (так звана Південно-Атлантична аномалія) ($B_{IGRF(1950)} = 24500$ нТл, $B_{IGRF(2020)} = 22300$ нТл) [3, 5, 8]. За період з 1950 по 2020 рр. середнє значення B_{IGRF} на поверхні планети зменшилося на 1 797 нТл (з 47603 до 45806 нТл) (рис. 2, а). Для більш наочного уявлення про масштаб вікового ходу геомагнітного поля побудовано графіки його зміни (див. рис. 2, б) і швидкості його зміни (часового градієнта) для планети в цілому (див. рис. 2, в). Як видно з рис. 2, б, для планети в цілому спостерігається, як було зазначено раніше, зменшення поля майже на 1800 нТл.

Цікавим є хід цих часових змін, а саме: на фоні загального зменшення поля (зі швидкістю близько -25 нТл/рік) спостерігаються його різкі стрибки (до -45 нТл/рік у 1960–1965 рр.; -58 нТл/рік у 1980–1985 рр.; -32 нТл/рік у 2000–2005 рр.), надалі протягом 15 років відбувалося менш інтенсивне спадання його змін (до -18 нТл/рік у 1975 р.; -12 нТл/рік у 1995 р.; -2 нТл/рік у 2015 р.). З усього цього можна зробити висновок, що починаючи з 1980 р. і дотепер відбувається уповільнення швидкості зменшення геомагнітного поля. Це добре видно з поведінки трендової складової часового градієнта поля $dB_{IGRF \text{ тренд}}/dt$, інтенсивність якої зменшується від $-(31 \div 33)$ нТл/рік в 1970–1980 рр. до -12 нТл/рік у 2020 р.

Обговорення результатів і висновки. Аналізуючи графіки зміни сонячної активності, геомагнітного поля на поверхні Землі та швидкість його зміни, насамперед відзначимо

Характеристика 18–24-го циклів сонячної активності

Цикл	W_{\min}	t_{\min}	$W_{\max1}$	$t_{\max1}$	$W_{\max2}$	$t_{\max2}$	$W_{\min2}$	$t_{\min2}$	P , міс
18	12,9	2,1944	218,7	5,1947	199,8	8,1948	5,1	5,1954	126
19	5,1	5,1954	283,3	12,1957	250,4	2,1959	14,3	10,1964	125
20	14,3	10,196	152,4	5,1968	150,3	4,197	17,09	6,1976	140
21	17,09	6,1976	212,4	8,1989	205,3	5,1991	14,4	8,1986	122
22	14,4	8,1986	232,9	12,1979	201,4	10,1981	11,2	5,1996	129
23	11,2	5,1996	175,2	11,2	179,1	12,2001	2,2	12,2008	151
24	2,2	12,2008	98,1	2,2012	114,1	6,2014	1,5	3, 2020	135

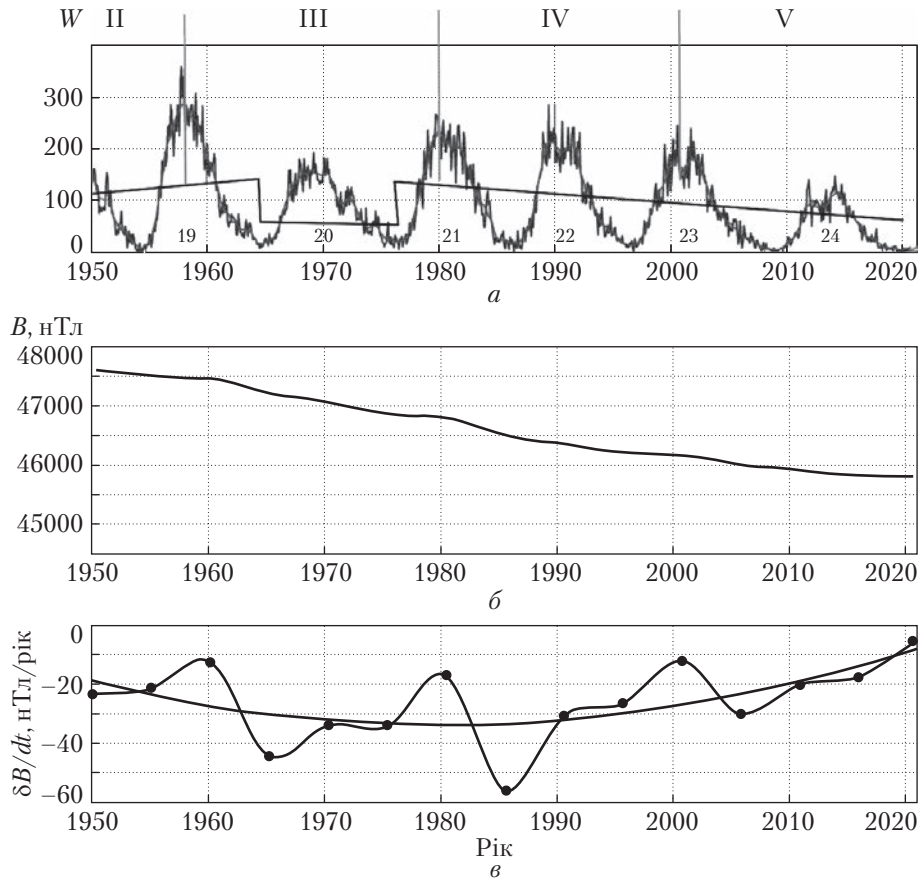


Рис. 2. Зіставлення 19–24-го циклів сонячної активності та її тренду (а) зі зміною середніх значень геомагнітного поля (б) на поверхні Землі і його часового градієнта та його тренду (в) для часового інтервалу 1950–2020 рр. Римськими цифрами пронумеровано цикли Хейла

зменшення геомагнітного поля, яке добре узгоджується з кривою тренду зменшення сонячної активності (див. рис. 2, а, б), тобто в першому наближенні спостерігається пряма кореляція між зміною сонячної активності і магнітного поля Землі. Другою важливою закономірністю є деяка узгодженість кривих тренду сонячної активності і відповідного тренду градієнта геомагнітного поля (див. рис. 2 а, в). При цьому зміна в лініях тренду припадає на 1970–1980 рр., з цього часу починається зменшення сонячної активності та істотне уповільнення вікового ходу геомагнітного поля. На підставі наведеного зв'язку можна прогнозувати зміну сонячної і магнітної активності у 25-му циклі. Як впливає з аналізу рис. 1, 20-й цикл є вісью своєрідної симетрії щодо змін сонячної та геомагнітної активності, а саме 21, 22, 23 та 24-й цикли є майже дзеркальним відображенням 19, 18, 17 та 16-го циклів сонячної і геомагнітної активності.

Отже, 25-й цикл повинен бути подібним 15-му циклу. Згідно з результатами досліджень, спостерігається зв'язок між часовим градієнтом геомагнітного поля dB_{IGRF}/dt (або, інакше кажучи, його віковими варіаціями) і 11- та 22-річними циклами сонячної активності. На рис. 3 сонячну активність та сумарну кількість магнітних бур за рік (<https://geomag.bgs.>

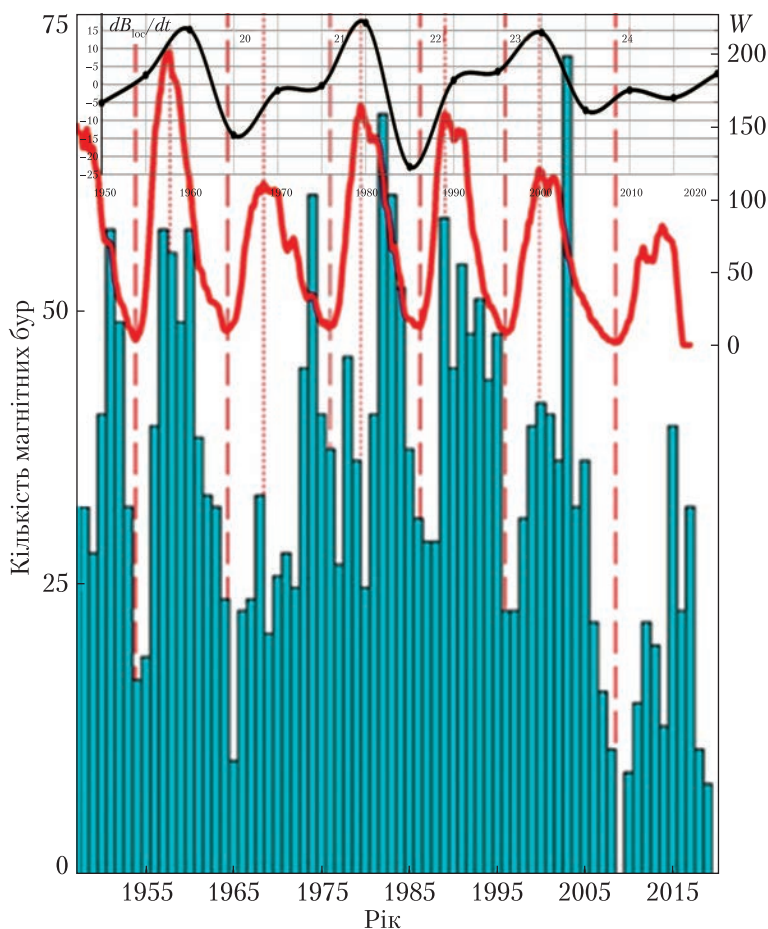


Рис. 3. Зіставлення сонячної активності W (червона лінія, шкала справа) і магнітної активності (кількість магнітних бур за рік, залито синім кольором, шкала зліва) за даними https://geomag.bgs.ac.uk/research/space_weather/sci_intro.html з часовим градієнтом поля $dB_{IGRF\text{ лок}}/dt$ (чорна лінія, шкала зліва)

[as.uk/research/space_weather/sci_intro.html](https://geomag.bgs.ac.uk/research/space_weather/sci_intro.html)) зіставлено з локальною складовою часового градієнта геомагнітного поля $dB_{IGRF\text{ лок}}/dt$, отриманою як різниця між часовим градієнтом dB_{IGRF}/dt та його трендовою складовою.

Спостерігається майже повна відповідність максимумів і мінімумів сонячної активності і вікових варіацій геомагнітного поля інтенсивністю $\pm(15 \div 25)$ нТл/рік для 19, 21 і 23-го циклів. Певна невідповідність встановленої закономірності спостерігається тільки для 24-го циклу сонячної активності. Для парних циклів сонячної активності (20, 22, 24-й) вікові варіації геомагнітного поля проявляються слабо, хоча теж є. У зв'язку з цим можна говорити про наявність 22-річної варіації геомагнітного поля і сонячної активності. За цього зауважимо, що на початку циклу Хейла у максимумі активності непарного 11-річного циклу великомасштабне магнітне поле Сонця (ВМПС) на північному полюсі направлено від Сонця (додатне на фазі спаду непарного циклу і на фазі росту активності парного 11-річного циклу). За даними експериментальних досліджень, це супроводжується зростанням геомагнітної активності і збільшенням абсолютної величини вікової варіації індукції магнітного поля B [7]. З іншого боку, для фази спаду парного циклу і фази росту непарного циклу ВМПС направлено на північному полюсі до Сонця (від'ємне), характерним є зменшення геомагнітної активності та абсолютної величини вікової варіації B . Цикли

Хейла характеризуються такою закономірністю: негативні III (1957–1979) і V (2000–2021 (?)) мають один слабоінтенсивний цикл у його середині (20 і 24-й), а позитивний цикл IV характеризується інтенсивним 11-річним циклом (22-й). Відповідно до цього непарні цикли Хейла характеризуються мінімальними величинами часового градієнта поля B_{IGRF} (див. рис. 3).

Насамкінець варто відзначити, що виявлені закономірності зв'язку головного магнітного поля Землі із сонячною активністю добре узгоджуються із сумарною кількістю магнітних бур (https://geomag.bgs.ac.uk/research/space_weather/sci_intro.html).

Наведені в статті результати аналізу зміни геомагнітного поля B_{IGRF} , а також його часового градієнта для 19–24-го циклів сонячної активності свідчать про їх істотний взаємозв'язок як для довгоперіодних (“трендових”, або вікових) змін, так і для короткоперіодних 11- і 22-річних (варіаційних) циклів. Особливої уваги в подальших дослідженнях потребує достовірно встановлений зв'язок із сонячною активністю не тільки варіацій та збурень геомагнітного поля зовнішнього походження, що було виявлено численними дослідженнями [9, 10], але і змін та варіацій головного магнітного поля Землі (B_{IGRF}). Це, у свою чергу, вимагає поглибленого вивчення можливих механізмів впливу процесів на Сонці на процес формування і функціонування магнітного поля Землі або пошуку спільної причини їх змін у межах Сонячної системи.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Olsen N., Stolle C. Magnetic signatures of ionospheric and magnetospheric current Systems during geomagnetic quiet conditions — an overview. *Space Sci. Rev.* 2017. **206**. P. 5–25. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0279-7>
2. Macmillan S. Geomagnetic field, global pattern. *Encyclopedia of solid earth geophysics*: Gupta H. (ed.). Cham: Springer, 2020 (Encyclopedia of Earth sciences series). https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_115-1
3. Orlyuk M.I., Romanets A.A. Spatial-temporal change of the geomagnetic field: environmental aspect. *Геофиз. журн.* 2020. **42**, № 4. С. 18–38. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i4.2020.210670>
4. Finlay C.C., Olsen N., Kotsiaros S., Gillet N., Toffner-Clausen L. Recent geomagnetic secular variation from *Swarm* and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth, Planets and Space*. 2016. **68**. 112. 18 pp. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0486-1>
5. Сумарук Ю.П. Просторово-часовий розподіл вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх та внутрішніх джерел: Автореф. дис... д-ра фіз.-мат. наук / Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Київ, 2021. 48 с.
6. Гвишиани А.Д., Старостенко В.И., Сумарук Ю.П., Соловьев А.А., Легостаева О.В. Уменьшение солнечной и геомагнитной активности с 19-го по 24-й цикл. *Геомагнетизм и астрономия*. 2015. **55**, № 3. С. 314–322.
7. Сумарук Т.П., Сумарук П.В. Відображення хейлівських циклів сонячної активності у вікових варіаціях геомагнітного поля. *Геофиз. журн.* 2020. **42**, № 5. С. 183–192. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215081>
8. Орлюк М.И., Марченко А.В., Роменец А.А. Пространственно-временные изменения геомагнитного поля и сейсмичность. *Геофиз. журн.* 2017. **39**, № 6. С. 84–105. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i6.2017.116371>
9. Du Z.L. The correlation between solar and geomagnetic activity — Part 2: Long-term trends. *Ann. Geophys.* 2011. **29**. P. 1341–1348. <https://doi.org/10.5194/angeo-29-1341-2011>
10. Mursula K., Manoharan P., Nandy D., Tanskanen E., Verronen P. Long-term solar activity and its implications to the heliosphere, geomagnetic activity, and the Earth's climate. Preface to the Special Issue on Space Climate. *J. Space Weather Space Clim.* 2013. **3**. A21. 6 pp. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013043>

Надійшло до редакції 29.07.2021

REFERENCES

1. Olsen, N. & Stolle, C. (2016). Magnetic signatures of ionospheric and magnetospheric current systems during geomagnetic quiet conditions – an overview. *Space Sci. Rev.*, 206, pp. 5-25. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0279-7>
2. Macmillan, S. (2020). Geomagnetic field, global pattern. In Gupta, H. (Ed.). *Encyclopedia of solid earth geophysics*, Encyclopedia of Earth sciences series. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_115-1
3. Orlyuk, M. I. & Romenets, A. A. (2020). Spatial-temporal change of the geomagnetic field: environmental aspect. *Geofizicheskii Zhurnal*, 42, No. 4, pp. 18-38. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i4.2020.210670>
4. Finlay, C. C., Olsen, N., Kotsiaros, S., Gillet, N. & Toffner-Clausen, L. (2016). Recent geomagnetic secular variation from *Swarm* and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth, Planets and Space*, 68, 112. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0486-1>
5. Sumaruk, Yu. P. (2021). Spatio-temporal distribution of age variations of the geomagnetic field from external and internal sources. (Extended abstract of Doctor thesis). S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv (in Ukrainian).
6. Gvishiani, A. D., Starostenko, V. I., Sumaruk, Yu. P., Soloviev, A. A. & Legostaeva, O. V. (2015). Decrease in solar and geomagnetic activity from the 19th to the 24th solar cycle. *Geomagnetism and Aeronomy*, 55, No. 3, pp. 314-322 (in Russian).
7. Sumaruk, T. P. & Sumaruk, P. V. (2020). Reflection of the solar activity Hale cycles on the geomagnetic field secular variations. *Geofizicheskii Zhurnal*, 42, No 5, pp. 183-192 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215081>
8. Orlyuk, M. I., Marchenko, A. V. & Romenets, A. A. (2017). Spatial-temporal changes in the geomagnetic field and seismicity. *Geofizicheskii Zhurnal*, 39, No. 6, pp. 84-105 (in Russian). <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i6.2017.116371>
9. Du, Z. L. (2011). The correlation between solar and geomagnetic activity – Part 2: Long-term trends. *Ann. Geophys.*, 29, pp. 1341-1348. <https://doi.org/10.5194/angeo-29-1341-2011>
10. Mursula, K., Manoharan, P., Nandy, D., Tanskanen, E. & Verronen, P. (2013). Long-term solar activity and its implications to the heliosphere, geomagnetic activity, and the Earth's climate. Preface to the Special Issue on Space Climate. *J. Space Weather Space Clim.*, 3, A21. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013043>

Received 29.07.2021

M.I. Orlyuk

A.O. Romenets

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv

E-mail: orlyuk@igph.kiev.ua, orlyuk@ukr.net, romenets@ukr.net

ON THE RELATIONSHIP OF TEMPORARY CHANGES

IN THE EARTH'S MAGNETIC FIELD WITH SOLAR ACTIVITY 19-24 CYCLES

The article presents the results of studies concerning the temporal changes of the main geomagnetic field B_{IGRF} on the Earth's surface with solar activity for 19-24 cycles. According to the results of the study, it was found that a decrease in the B_{IGRF} field on the planet's surface by 1800 nT corresponds to a decrease in solar activity, starting from cycle 19 to the present. Another important revealed regularity is a certain interdependence of the solar activity trend curves and the corresponding curve of the temporal gradient of the geomagnetic field (secular variation). A fairly clear connection between the temporal gradient of the geomagnetic field (secular variations) and 11-year and 22-year (Hale) cycles of solar activity is shown. Therefore, the change in the geomagnetic field with the period of the Hale cycle (20-22 years) is in good agreement with the nature of the large-scale field of the Sun. A particularly important result is the established connection with solar activity not only of variations and disturbances of the geomagnetic field of external nature, but also of changes and variations of the main magnetic field of the Earth B_{IGRF} the generation mechanism of which is associated with its core.

Keywords: solar activity, geomagnetic field B_{IGRF} planet Earth.