

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-07>

УДК 550.388

ВАРІАЦІЇ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ 10 ЧЕРВНЯ 2021 Р.

Л. Ф. Черногор, М. Ю. Голуб, Y. Luo, А. М. Цимбал, М. Б. Шевелев

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4,
м. Харків, 61022, Україна

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Надійшла до редакції 22 квітня 2021 р.

Актуальність. У даний час питання про геомагнітний ефект сонячних затемнень (СЗ) залишається відкритим. У літературі наведені суперечливі дані. Одні автори стверджують, що амплітуда компоненти головного магнітного поля "північ – південь" збільшується, інші, що вона зменшується. Треті автори відзначають, що ця амплітуда взагалі не змінюється, а варіює амплітуда компоненти "захід – схід". В одних випадках спостереження підтверджують механізм геомагнітного ефекту, зумовленого збуренням системи іоносферних струмів (Sq), в інших – суперечать йому. Труднощі спостереження геомагнітного ефекту СЗ пов'язані з тим, що на магнітне поле впливає багато високоенергетичних джерел. Величина геомагнітного ефекту залежить не тільки від сили (фази) СЗ, але і від стану космічної погоди, місця спостереження, часу доби, пори року та ін. Тому дослідження геомагнітного ефекту кожного нового СЗ залишається актуальним завданням. Особливістю СЗ 10 червня 2021 р. було те, що воно належало до кільцеподібних. Функція покриття на рівні Землі не перевищувала 89%, а фаза – 0.943.

Мета роботи – виклад результатів аналізу варіацій геомагнітного поля протягом СЗ 10 червня 2021 р., зареєстрованого мережею магнітних станцій INTERMAGNET.

Методи і методологія. Для аналізу ефектів у головному магнітному полі Землі використовувалися дані вимірювань міжнародної мережі INTERMAGNET. Проаналізовано дані 15 магнітних станцій, розташованих на широтах від 77.47° пн. ш. до 48.17° пн. ш. При цьому максимальна фаза СЗ на рівні Землі змінювалася від 0.943 до 0.124. Роздільна здатність за часом – 1 хв, за рівнем геомагнітного поля – близько 0.1 нТл. Для визначення спектрального складу квазіперіодичних варіацій використовувався системний спектральний аналіз, який об'єднує взаємодоповнюючі віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є і вейвлет перетворення на основі материнської функції Морле.

Результати. Виявлено та пояснено аперіодичний геомагнітний ефект сонячного затемнення, що полягає в зменшенні не більше, ніж на ~ 30 нТл рівня компоненти поля в напрямку "північ – південь". Ефект пояснюється зміною величини густини іоносферного струму в напрямку "захід – схід" в результаті зменшення під дією затемнення концентрації електронів. Виявлено та пояснено квазіперіодичний геомагнітний ефект сонячного затемнення, викликаний генерацією затемнення атмосферних гравітаційних хвиль. Хвиля викликає модуляцію іоносферного струму, а також захоплення електронів, що створює додатковий квазіперіодичний іоносферний струм з періодом, рівним періоду хвилі. Амплітуда квазіперіодичних варіацій становила кілька одиниць нанотесла. Системний спектральний аналіз дозволив уточнити періоди квазіперіодичних варіацій геомагнітного поля, що супроводжували затемнення (близько 20 і 35 хв).

Висновки. Аперіодичний і квазіперіодичний геомагнітні ефекти зумовлені збуренням (генерацією) іоносферного струму.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сонячне затемнення, геомагнітне поле, Х-компонента, іоносферний струм, аперіодичний ефект, квазіперіодичний ефект, модуляція іоносферного струму

VARIATIONS IN THE GEOMAGNETIC FIELD THAT ACCOMPANIED THE 10 JUNE 2021 SOLAR ECLIPSE

L. F. Chernogor, M. Yu. Golub, Y. Luo, A. M. Tsybal, M. B. Shevelev

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

Urgency. At present, the existence of the geomagnetic effect of solar eclipses (SEs) is in question. The data presented in the literature are contradictory. Some researchers assert that the amplitude of the north-south component of the main geomagnetic field increases, while others that it decreases. The third group of researchers notes that this amplitude does not change at all, but instead the amplitude of the west-east component shows variations. In some cases, observations confirm the mechanism for the geomagnetic effect caused by disturbances in the Sq current system, while in other cases observations contradict with the mechanism. The difficulties that are encountered in observing the SE geomagnetic effect are caused by the fact that the magnetic field is subjected to the influence of many energy sources. The magnitude of the geomagnetic effect depends not only on the magnitude (phase) of the solar eclipse but also on the state of space weather, geographic coordinates of data acquisition, local time, season, etc.

Therefore, the study of the geomagnetic effect from each new solar eclipse remains an urgent problem. The main feature of the 10 June 2021 Solar eclipse is its annularity. The maximum magnitude did not exceed 0.943, and the eclipse obscuration 89%.

The aim of this work is to present the results of analysis of variations in the geomagnetic field that were recorded by the INTERMAGNET during the 10 June 2021 SE.

Methods and Methodology. To analyze the effects in the main Earth's magnetic field, the INTERMAGNET data have been utilized. The data have been analyzed from 15 magnetic observatories located between 77.47°-N and 48.17°-N latitude where the maximum phase varied from 0.943 to 0.124. The analysis was performed with 1-min temporal resolution providing a 0.1-nT resolution. To determine spectral content of the quasi-periodic variations, the systems spectral analysis has been used, which combines mutually complementary the short-time Fourier transform, the wavelet transform employing the Morlet wavelet as a basis function, and the Fourier transform in a sliding window with a width adjusted to be equal to a fixed number of harmonic periods.

Results. An aperiodic geomagnetic effect of a solar eclipse has been detected and explained; it consists in a decrease by not greater than 30 nT in the level of the north-south component. The effect is explained by a variation in the ionospheric current density in the west-east direction as a result of a decrease in the electron density during the eclipse. A quasi-periodic geomagnetic effect of a solar eclipse has been revealed; it is explained by the generation of atmospheric gravity waves. The wave acts to modulate the ionospheric electric current, as well as to drag the electrons inducing additional quasi-periodic ionospheric current with a period equal to the wave period. The amplitude of the quasi-periodic variations was observed to be a few nanoteslas. The systems spectral analysis provided more precise values of periods of quasi-periodic variations in the geomagnetic field accompanying the solar eclipse, approximately 20 min and 35 min.

Conclusions. The aperiodic and quasi-periodic geomagnetic effects are caused by the disturbance (generation) of the ionospheric current.

KEY WORDS: solar eclipse, geomagnetic field, X component, ionospheric current, aperiodic effect, quasi-periodic effect, ionospheric current modulation

ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОПРОВОЖДАВШИЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 10 ИЮНЯ 2021 г.

Л. Ф. Черногор, М. Ю. Голуб, У. Луо, А. М. Цымбал, Н. Б. Шевелёв

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022,
Украина*

Актуальность. В настоящее время вопрос о геомагнитном эффекте солнечных затмений (СЗ) остается открытым. В литературе приведены противоречивые данные. Одни авторы утверждают, что амплитуда компоненты главного магнитного поля "север – юг" увеличивается, другие, что она уменьшается. Третьи авторы отмечают, что эта амплитуда вообще не изменяется, а варьирует амплитуда компоненты "запад – восток". В одних случаях наблюдения подтверждают механизм геомагнитного эффекта, обусловленного возмущением системы ионосферных токов (Sq), в других – противоречат ему. Трудности наблюдения геомагнитного эффекта СЗ связаны с тем, что на магнитное поле влияет много высокоэнергетических источников. Величина геомагнитного эффекта зависит не только от силы (фазы) СЗ, но и от состояния космической погоды, места наблюдения, времени суток, сезона и т.д. Поэтому исследование геомагнитного эффекта каждого нового СЗ остается актуальной задачей. Особенностью СЗ 10 июня 2021 г. было то, что оно отнеслось к кольцеобразным. Функция покрытия на уровне Земли не превышала 89%, а фаза – 0.943.

Цель работы – изложение результатов анализа вариаций геомагнитного поля в течение СЗ 10 июня 2021 г., зарегистрированного сетью магнитных станций INTERMAGNET.

Методы и методология. Для анализа эффектов в главном магнитном поле Земли использовались данные измерений международной сети INTERMAGNET. Проанализированы данные 15 магнитных станций, расположенных на широтах от 77.47° с. ш. до 48.17° с. ш. При этом максимальная фаза СЗ на уровне Земли изменялась от 0.943 до 0.124. Разрешение по времени – 1 мин, по уровню геомагнитного поля – около 0.1 нТл. Для определения спектрального состава квазипериодических вариаций использовался системный спектральный анализ, объединяющий взаимодополняющие оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет преобразование на основе материнской функции Морле.

Результаты. Обнаружен и объяснен аperiodический геомагнитный эффект солнечного затмения, заключающийся в уменьшении не более, чем на ~ 30 нТл уровня компоненты поля в направлении "север – юг". Эффект объясняется изменением величины плотности ионосферного тока в направлении "запад – восток" в результате уменьшения под действием затмения концентрации электронов. Обнаружен и объяснен квазипериодический геомагнитный эффект солнечного затмения, вызванный генерацией затмением атмосферных гравитационных волн. Волна вызывает модуляцию ионосферного тока, а также увлечение электронов, создающее дополнительный квазипериодический ионосферный ток с периодом, равным периоду волны. Амплитуда квазипериодических вариаций составляла несколько единиц нанотесла. Системный спектральный анализ позволил уточнить периоды квазипериодических вариаций геомагнитного поля, сопровождавших затмение (около 20 и 35 мин).

Выводы. Аperiodический и квазипериодический геомагнитные эффекты обусловлены возмущением (генерацией) ионосферного тока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: солнечное затмение, геомагнитное поле, X-компонента, ионосферный ток, аперриодический эффект, квазипериодический эффект, модуляция ионосферного тока

ВСТУП

Історія вивчення варіацій магнітного поля Землі, що супроводжували сонячні затемнення (СЗ), нараховує близько 120 років [1–4]. Теоретичні основи магнітного ефекту СЗ заклав автор [5]. Він припустив, що варіації геомагнітного поля протягом СЗ пов'язані зі зміною густини іоносферних струмів на висоті Е-області іоносфери (~ 90–120 км). Результати [5] розвивали в теоретичних роботах [6, 7], де моделювалися варіації геомагнітного поля протягом СЗ.

Зміни в головному магнітному полі Землі, що супроводжували СЗ в 1958–2008 рр., описані в ряді робіт [8–32].

Можливість генерації СЗ геомагнітних пульсацій вивчалася в роботах [21, 28].

В даний час питання про геомагнітний ефект СЗ залишається відкритим. У літературі наведені суперечливі дані. Одні автори стверджують, що амплітуда компоненти головного магнітного поля "північ – південь" збільшується [17], інші, що вона зменшується [25, 32, 33]. Треті автори відзначають, що ця амплітуда взагалі не змінюється, а варіює амплітуда компоненти "захід – схід" [29]. В одних випадках спостереження підтверджують механізм, описаний у роботі [5], в інших – суперечать йому.

Труднощі спостереження геомагнітного ефекту СЗ пов'язані з тим, що на магнітне поле впливає багато високоенергетичних джерел [34]. Величина геомагнітного ефекту залежить не тільки від сили (фази М) СЗ, але і від стану космічної погоди, місця спостереження, часу доби, пори року та ін. Тому дослідження геомагнітного ефекту кожного нового СЗ залишається актуальним завданням.

Мета даної роботи – виклад результатів аналізу варіацій геомагнітного поля протягом СЗ 10 червня 2021 р., зареєстрованого мережею магнітних станцій INTERMAGNET.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ

Особливістю СЗ 10 червня 2021 р. було те, що воно належало до кільцеподібних. Функція покриття на рівні Землі не перевищувала 89%, а фаза – 0.943. Це мало місце над островом Гренландія з 10:33:16 UT до 10:36:56 UT (UT тут і далі всесвітній час).

Почалося затемнення над територією Канади о 08:12:20, а закінчилося о 13:11:19 (Табл. 1). Кільцеподібне СЗ спостерігалось з 9:49:50 до 11:33:43. Місячна тінь поступово переміщувалася від Канади в Атлантичний океан, Північний Льодовитий океан, Північний полюс, північну частину Європи й Азії. Тінь простягалася до нижньої частини Італії, Греції, України, захопила більшу частину Росії, а також Монголію і Китай (Рис. 1).

Таблиця 1. Загальні відомості про сонячне затемнення

[за даними сайту <https://www.timeanddate.com/eclipse/solar/2021-june-10>]

Table 1. General data about solar eclipse

[URL-source: <https://www.timeanddate.com/eclipse/solar/2021-june-10>]

Момент початку СЗ	08:12:20 UT
Момент першої появи кільцевого СЗ на Земній кулі	09:49:50 UT
Момент настання максимальної фази СЗ	10:41:54 UT
Момент крайньої появи кільцевого СЗ на Земній кулі	11:33:43 UT
Момент закінчення СЗ	13:11:19 UT

ЗАСОБИ І МЕТОДИ

Для аналізу ефектів у головному магнітному полі Землі використовувалися дані вимірювань міжнародної мережі INTERMAGNET. Проаналізовано дані 15 магнітних станцій, розташованих на широтах від 77.47° пн. ш. до 48.17° пн. ш. (Табл. 2). При цьому максимальна фаза СЗ на рівні Землі змінювалася від 0.943 до 0.124. Роздільна здатність за часом – 1 хв, за рівнем геомагнітного поля – близько 0.1 нТл.

Аналізу підлягали дві горизонтальні (X – «північ – південь» і Y – «захід – схід») і вертикальна (Z) компоненти головного магнітного поля Землі. Помітні варіації вдалося виявити тільки в рівні X-компоненти. Мали місце як аперриодичні, так і квазіперіодичні варіації рівня X-компоненти.

Для визначення спектрального складу квазіперіодичних варіацій використовувався системний спектральний аналіз (ССА), який об'єднує взаємодоповнюючі віконне перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивне перетворення Фур'є (АПФ) і вейвлет перетворення (ВП) на основі материнської функції Морле [35]. Спектральному аналізу передувало видалення тренду на інтервалі 120 хв з інтервалом ковзання 1 хв.

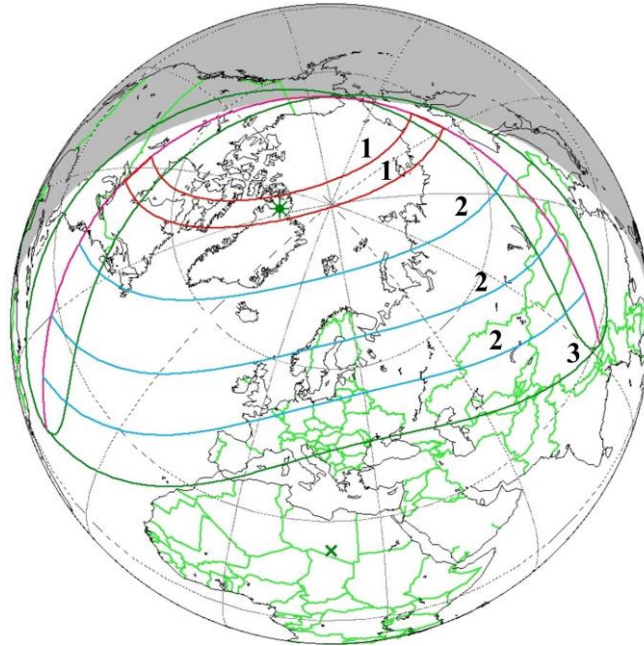


Рис. 1. Карта сонячного затемнення. Червоні лінії показують на територію кільцеподібного затемнення, сині – часткового затемнення, зелена – межа затемнення.

Fig. 1. Solar eclipse map. Red lines indicate the territory of the annular eclipse, blue is the partial eclipse, green is the boundary of the eclipse.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Оскільки варіації геомагнітного поля можуть бути викликані цілою низкою космічних і земних джерел, потрібен ретельний аналіз стану космічної погоди.

Проаналізовано стан космічної погоди для 6–12 червня 2021 р. Виявилось, що 7, 8, 11 і 12 червня 2021 р. іоносфера була магнітозбуреною (за даними сайтів [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>] та [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]). У ці доби індекс $K_p \approx 3-4$, а індекс D_{st} досягав $-(13-30)$ нТл.

З цієї причини в якості контрольних обрано доби 6 і 9 червня 2021 р. (Табл. 3). З цієї таблиці видно, що 6, 9 та 10 червня 2021 р. в інтервалі часу 09:00–12:00 значення $K_p = 0.3$.

Індекс F10.7 сонячної активності 6, 9 та 10 червня 2021 р. відповідно складав 79.7, 81.0 і 75.6, тобто Сонце залишалося спокійним.

Таким чином, протягом СЗ магнітна й іоносферна обстановки були сприятливими для спостереження магнітного ефекту затемнення.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Розглянемо окремо аперіодичні і квазіперіодичні варіації геомагнітного поля в день СЗ 10 червня 2021 р. і в контрольні дні 6 і 9 червня 2021 р.

АПЕРІОДИЧНІ ВАРІАЦІЇ РІВНЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Для прикладу опишемо характерні варіації рівня геомагнітного поля для чотирьох станцій, для яких максимальна фаза затемнення була досить великою (від 0.909 до 0.402).

Станція *GDH* (максимальна фаза $M = 0.909$). До 08:10 рівень X -компоненти флюктував від 0 до -10 нТл (Рис. 2). З 08:10 до 08:50 спостерігалось його зменшення до -45 нТл. Перед початком СЗ рівень, флюктуюючи, збільшився до -30 нТл. Після початку СЗ о 09:12 і до 10:50 в рівні X -компоненти спостерігався провал, мінімальне значення становило $-(50-55)$ нТл. З 10:50 і до 11:55 рівень залишався практично незмінним і становив близько $-(40-45)$ нТл.

Таблиця 2. Параметри сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в різних обсерваторіях Земної кулі [<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/ISEX/ISEX-AS.html>]Table 2. June 10, 2021 solar eclipse parameters at different observatories Earth's globe (URL-source: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/ISEX/ISEX-AS.html>)

Назва станції	Координати		Країна	Тип СЗ	t_0	t_{es}	t_{max}	t_{ee}	t_1	M^*	$A, \%$
	ϕ	λ									
Qaanaaq (THLE) (ТНЛ)	77.47° пн.ш.	69.227° з.д.	Королівство Данія	A	09:30:20	10:33:16	10:35:06	10:36:56	11:41:50	0.943 (0.936)	89 (88.6)
Hopsvund (NRN)	77 пн.ш.	15.547° сх.д.	Норвегія	P	09:32:33	–	10:43:29	–	11:56:08	0.761 (0.785)	68.5 (71.3)
Qeqertarsuaq (Godhavn) (GDH)	69.252° пн.ш.	53.533° з.д.	Королівство Данія	P	09:12:24	–	10:18:12	–	11:27:28	0.909 (0.935)	85.9 (88.6)
Abisko (ABK)	68.358° пн.ш.	18.823° сх.д.	Швеція	P	09:15:28	–	10:27:10	–	11:42:27	0.588 (0.609)	48.2 (50.6)
Sodankylä (SOD)	67.37° пн.ш.	26.63° сх.д.	Фінляндія	P	09:10:43	–	10:21:08	–	11:35:35	0.554 (0.574)	44.4 (46.6)
Nurmijärvi (NUR)	60.51° пн.ш.	24.66° сх.д.	Фінляндія	P	08:58:14	–	10:07:53	–	11:22:57	0.396 (0.414)	27.7 (29.4)
Uppsala (UPS)	59.903° пн.ш.	17.353° сх.д.	Швеція	P	09:00:53	–	10:11:27	–	11:27:23	0.402 (0.419)	28.2 (30.0)
Vorok (VOX)	58.07° пн.ш.	38.23° сх.д.	Росія	P	08:50:27	–	09:56:57	–	11:09:02	0.327 (0.343)	21.0 (22.5)
Hel (HLR)	54.603° пн.ш.	18.811° сх.д.	Польща	P	08:51:00	–	09:59:03	–	11:13:20	0.266 (0.281)	15.6 (16.9)

Таблиця 2. Параметри сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в різних обсерваторіях Земної кулі [<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/JSEX/JSEX-AS.html>] (продовження)Table 2. June 10, 2021 solar eclipse parameters at different observatories Earth's globe (URL-source: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/JSEX/JSEX-AS.html>) (Continue)

Назва станції	Координати		Країна	Тип СЗ	t_0	t_{es}	t_{max}	t_{ee}	t_1	M*	A, %*
	φ	λ									
Wingst (WNG)	53.74° пн.ш.	9.07° сх.д.	Німеччина	P	08:58:23	–	10:06:13	–	11:19:50	0.296 (0.312)	18.2 (19.7)
Niemegk (NGK)	52.07° пн.ш.	12.68° сх.д.	Німеччина	P	08:52:19	–	09:58:51	–	11:11:36	0.234 (0.248)	12.9 (14.1)
Belsk (BEL)	51.836° пн.ш.	20.789° сх.д.	Польща	P	08:45:17	–	09:51:31	–	11:04:17	0.187 (0.200)	9.3 (10.3)
Budkov (BDV)	49.08° пн.ш.	14.02° сх.д.	Чехія	P	08:47:02	–	09:50:56	–	11:01:14	0.151 (0.164)	6.8 (7.7)
Lviv (LVV)	49.9° пн.ш.	23.75° сх.д.	Україна	P	08:40:31	–	09:45:19	–	10:56:47	0.124 (0.137)	5.1 (5.9)
Furstenfeldbruck (FUR)	48.17° пн.ш.	11.28° сх.д.	Німеччина	P	08:49:06	–	09:51:39	–	11:00:20	0.147 (0.16)	6.5 (7.4)

Примітка: φ – широта, λ – довгота, СЗ – сонячне затемнення, A – кільцеве затемнення, P – часткове затемнення, t_0 – момент часу початку затемнення, t_{es} – момент часу початку кільцевого або повного затемнення, t_{max} – момент часу максимальної фази затемнення, t_{ee} – момент часу закінчення кільцевого або повного затемнення, t_1 – момент часу закінчення затемнення, M – магнітуда сонячного затемнення, A – частка видимої площі Сонця, яка покрита місячним диском, $\Delta T = t_{ee} - t_{es}$ – тривалість повної або кільцевої фази затемнення (в хвиликах і секундах), * – параметри обчислені для 0 км (110 км).

Таблиця 3. Загальні відомості про індекс геомагнітної активності K_p у період сонячного затемнення 10 червня 2021 р. та в контрольні дніTable 3. General data about K_p geomagnetic activity index at the solar eclipse period and reference days

Дата/Час, UT	00–03	03–06	06–09	09–12	12–15	15–18	18–21	21–00
06 червня 2021 р.	2	1	0.7	0.3	0	0.3	1	1.3
09 червня 2021 р.	1.3	1.3	1	0.3	0.3	0.3	0.7	0
10 червня 2021 р.	1	0.3	0.3	0.3	1	2	1.3	1.7

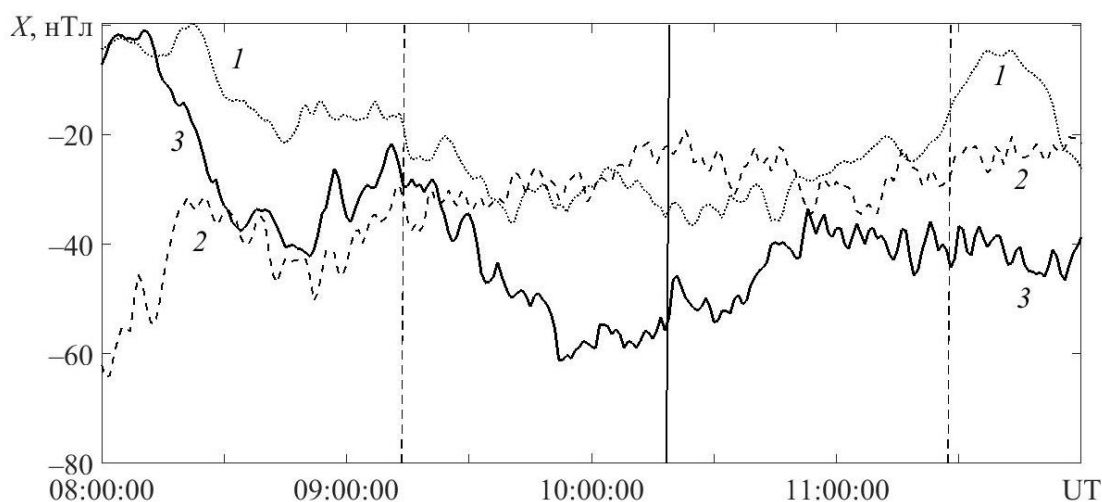


Рис. 2. Часові варіації рівня X-компоненти на станції Qeqertarsuaq (GDH): 1 – 6 червня 2021 р.; 2 – 9 червня 2021 р.; 3 – 10 червня 2021 р. Пунктирними вертикальними лініями показані моменти початку і закінчення СЗ, суцільною вертикальною лінією – момент максимальної фази СЗ.

Fig. 2. Temporal variations of X-component level at Qeqertarsuaq (GDH) station: 1 – June 6, 2021; 2 – June 9, 2021; 3 – June 10, 2021. A solar eclipse beginning and ending are marked of dotted vertical lines, the time moment of maximum magnitude of solar eclipse are marked solid vertical line.

Станція HRN ($M \approx 0.761$). З 08:20 і до 09:20 спостерігався провал в рівні X-компоненти (від -10 до -30 нТл) (Рис. 3). З 09:20 і до 09:50 відзначалося його зростання до 10 нТл, яке потім змінилося після 09:50 зменшенням від 10 до -10 нТл. Мінімальне значення близько -10 нТл мало місце приблизно поблизу моменту закінчення СЗ. Далі відзначалося зростання рівня X-компоненти. На повільні варіації рівня протягом СЗ накладалися квазіперіодичні варіації з періодом $T \approx 9$ хв і амплітудою близько $2.4\text{--}3.7$ нТл.

Станція АВК ($M \approx 0.588$). З 08:25 і до 09:00 спостерігалось зменшення рівня X-компоненти від -17 до -26 нТл (Рис. 4). Протягом СЗ рівень сильно флюктував із квазіперіодом T близько 9 хв і амплітудою $1\text{--}1.5$ нТл. Крім того, мало місце зменшення середнього значення рівня на $9\text{--}10$ нТл.

Станція UPS ($M \approx 0.402$). Рівень X-компоненти з 08:00 до 08:40 зменшувався від -18 до -26 нТл (Рис. 5). В інтервалі часу 08:40–09:05 він залишався майже незмінним на рівні близько -26 нТл. Далі спостерігалось його збільшення на 3 нТл, тобто до -23 нТл. Після 09:15 рівень спочатку зменшувався до -28 нТл, а потім збільшувався до -20 нТл, що мало місце приблизно в момент закінчення СЗ. Зменшення середнього значення рівня протягом СЗ не перевищувало 5 нТл.

КВАЗІПЕРІОДИЧНІ ВАРІАЦІЇ РІВНЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Крім вже згаданих квазіперіодичних варіацій рівня X-компоненти з періодом 9 хв і амплітудою ΔX_a від $1\text{--}1.5$ до $2.4\text{--}3.7$ нТл, протягом СЗ спостерігалися й інші періоди. Наведемо такі приклади.

Станція HLP ($M \approx 0.266$). Як видно з Рис. 6, протягом СЗ спостерігалися два процеси з періодами 6–7 і 35 хв з амплітудами 0.5–0.8 і 1.6–2.2 нТл відповідно.

Станція LVV ($M = 0.124$). Протягом СЗ мали місце квазіперіодичні варіації рівня Х-компоненти з періодами близько 20 і 35 хв і амплітудою ~ 1.3 –1.7 нТл (Рис. 7). Крім цього періоду, спостерігався період 6–7 хв зі значно меншою амплітудою.

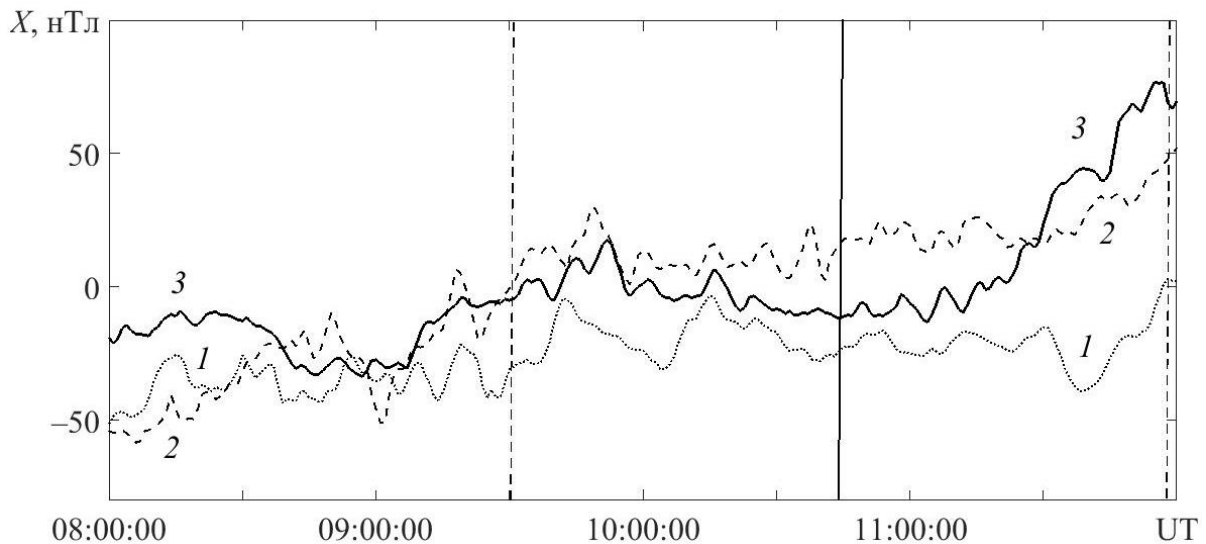


Рис. 3. Те ж саме, що на Рис. 2, для станції Hornsund (HRN).
Fig. 3. Same as Figure 2, but for the Hornsund (HRN) station.

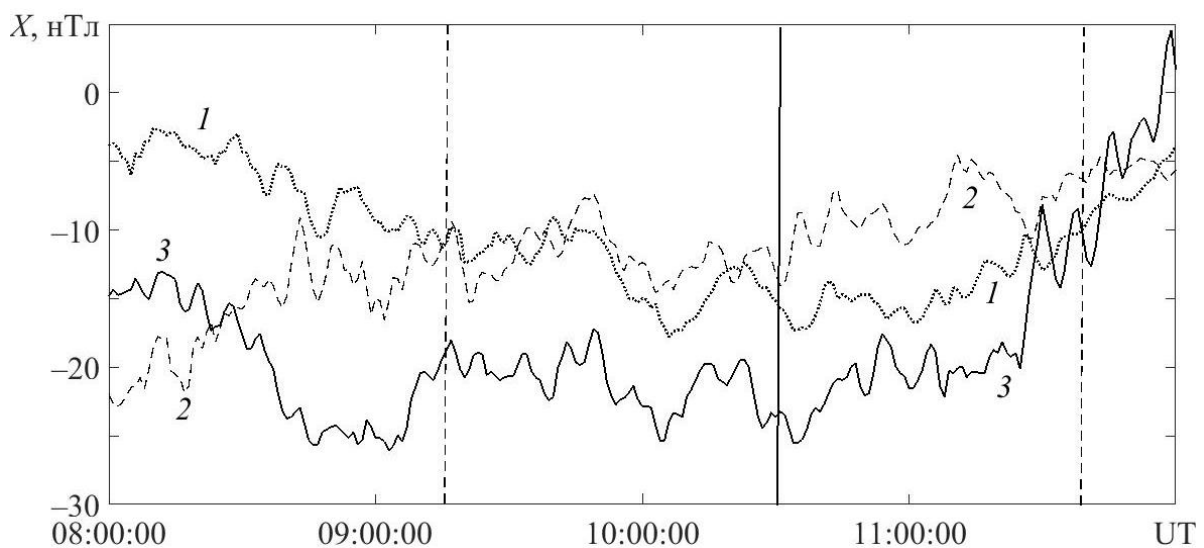


Рис. 4. Те ж саме, що на Рис. 2, для станції Abisko (ABK).
Fig. 4. Same as Figure 2, but for the Abisko (ABK) station.

РЕЗУЛЬТАТИ СИСТЕМОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Як приклад наведемо результати ССА варіацій рівня Х-компоненти для станцій HRN (Рис. 8) і LVV (Рис. 9). З рисунків видно, що протягом СЗ суттєво змінювався спектральний склад. При цьому придушувалися коливання з $T \approx 60$ –100 хв, а виникали осциляції з періодами близько 20 і 35 хв (див. Рис. 8, 9).

ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз рівня Х-компоненти геомагнітного поля показав, що при досить великому значенні фази СЗ ($M_{\max} \geq 0.248$) спостерігалося зменшення ΔX рівня на одиниці – десятки нанотесла. Чим більше M_{\max} і

більше широта станції, тим більше ефект. Для станцій THL і GDH $\Delta X \approx -30$ нТл. У той же час для станції HLP $\Delta X \approx -(2.4-2.6)$ нТл.

Зменшення рівня X-компоненти (напрямок "північ – південь") зумовлено зменшенням густини іоносферного струму в напрямку "захід – схід" j_y . Згідно [6, 36]

$$\Delta X \approx -\frac{1}{2} \mu_0 \Delta j_y \Delta z,$$

де μ_0 – магнітна стала, Δj_y – збурення густини струму в шарі товщиною Δz . Оскільки [6, 36]

$$\Delta j_y \approx -\frac{1}{2} e \Delta N v,$$

то

$$\Delta X \approx \frac{1}{4} \mu_0 e \Delta N v \Delta z,$$

де e – заряд електрона, ΔN – зменшення концентрації електронів N під дією СЗ, v – швидкість електронів відносно іонів. Очевидно, що при $\Delta N < 0$ маємо $\Delta X < 0$.

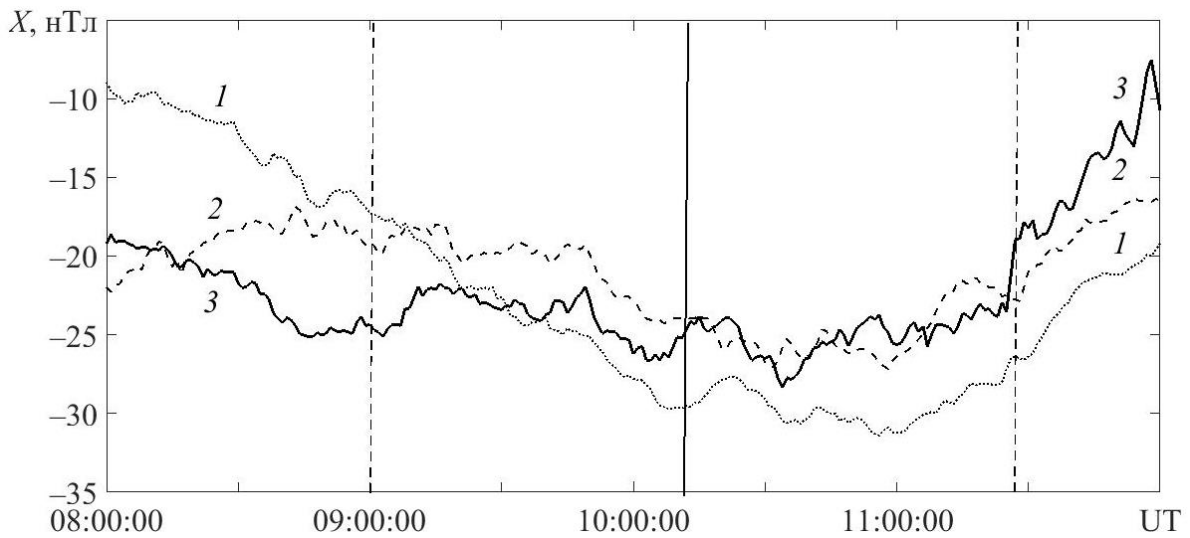


Fig. 5. Same as Figure 2, but for the Uppsala (UPS) station.

Рис. 5. Те ж саме, що на Рис. 2, для станції Uppsala (UPS).

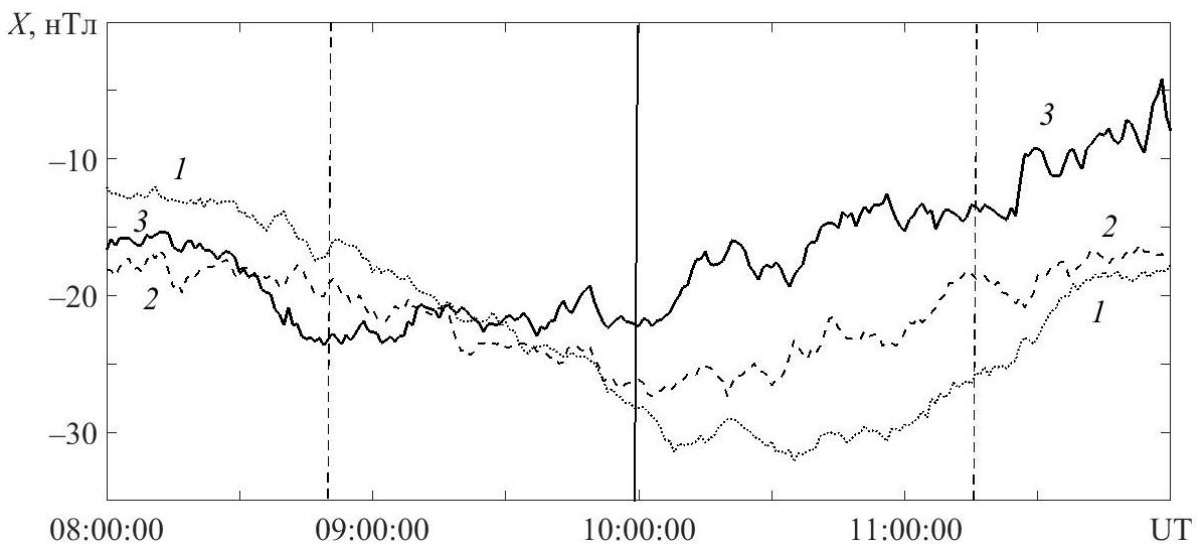


Рис. 6. Те ж саме, що на Рис. 2, для станції Hel (HLP).

Fig. 6. Same as Figure 2, but for the Hel (HLP) station.

Отже, спостережуваний аперіодичний ефект зменшення рівня Х-компоненти пояснюється механізмом, описаним в роботі [5] і розвиненому авторами [6, 7].

Квазіперіодичний ефект пов'язаний з генерацією атмосферних гравітаційних хвиль, які модулюють тиск атмосферного газу, а разом з ним і концентрацію електронів. При цьому виникає електричний струм з густиною

$$j_y \approx -\frac{1}{2}eNw,$$

де w – швидкість частинок у хвилі.

При досить великих j_y в незбурених умовах і збуреннях N у хвилі може бути ефективним механізм модуляції іоносферного струму.

Таким чином, обидва механізми пояснюють квазіперіодичний геомагнітний ефект СЗ.

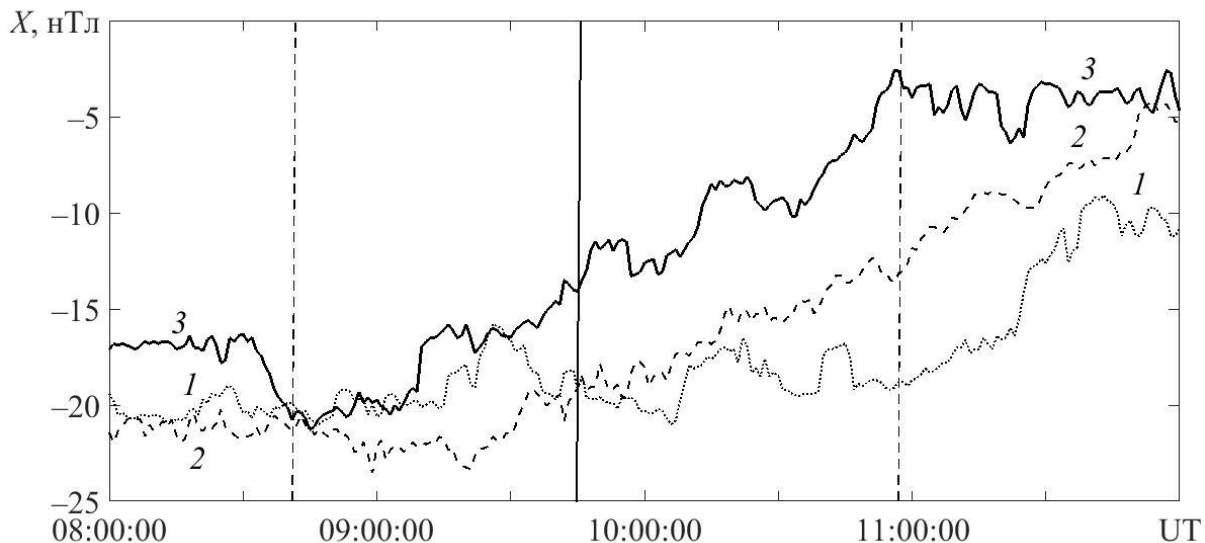


Fig. 7. Same as Figure 2, but for the Lviv (LVV) station.
Рис. 7. Те ж саме, що на Рис. 2, для станції Lviv (LVV).

ВИСНОВКИ

1. Виявлено та пояснено аперіодичний геомагнітний ефект сонячного затемнення, що полягає в зменшенні не більше, ніж на ~ 30 нТл рівня компоненти поля в напрямку "північ – південь". Ефект пояснюється зміною величини густини іоносферного струму в напрямку "захід – схід" в результаті зменшення під дією затемнення концентрації електронів.

2. Виявлено та пояснено квазіперіодичний геомагнітний ефект сонячного затемнення, викликаний генерацією затемненням атмосферних гравітаційних хвиль. Хвиля викликає модуляцію іоносферного струму, а також захоплення електронів, що створює додатковий квазіперіодичний іоносферний струм з періодом, рівним періоду хвилі. Амплітуда квазіперіодичних варіацій становила кілька одиниць нанотесла.

3. Системний спектральний аналіз дозволив уточнити періоди квазіперіодичних варіацій геомагнітного поля, що супроводжували затемнення (близько 20 і 35 хв).

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ


Дослідження Черногора Л. Ф. виконано в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля–атмосфера–іоносфера»). Також робота Черногора Л. Ф. і Цимбала А. М. частково підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882).


КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ


Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

L. F. Chernogor  <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

M. Yu. Holub  <https://orcid.org/0000-0001-7900-1484>

Y. Luo  <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

A. M. Tsybal  <https://orcid.org/0000-0002-5274-8876>

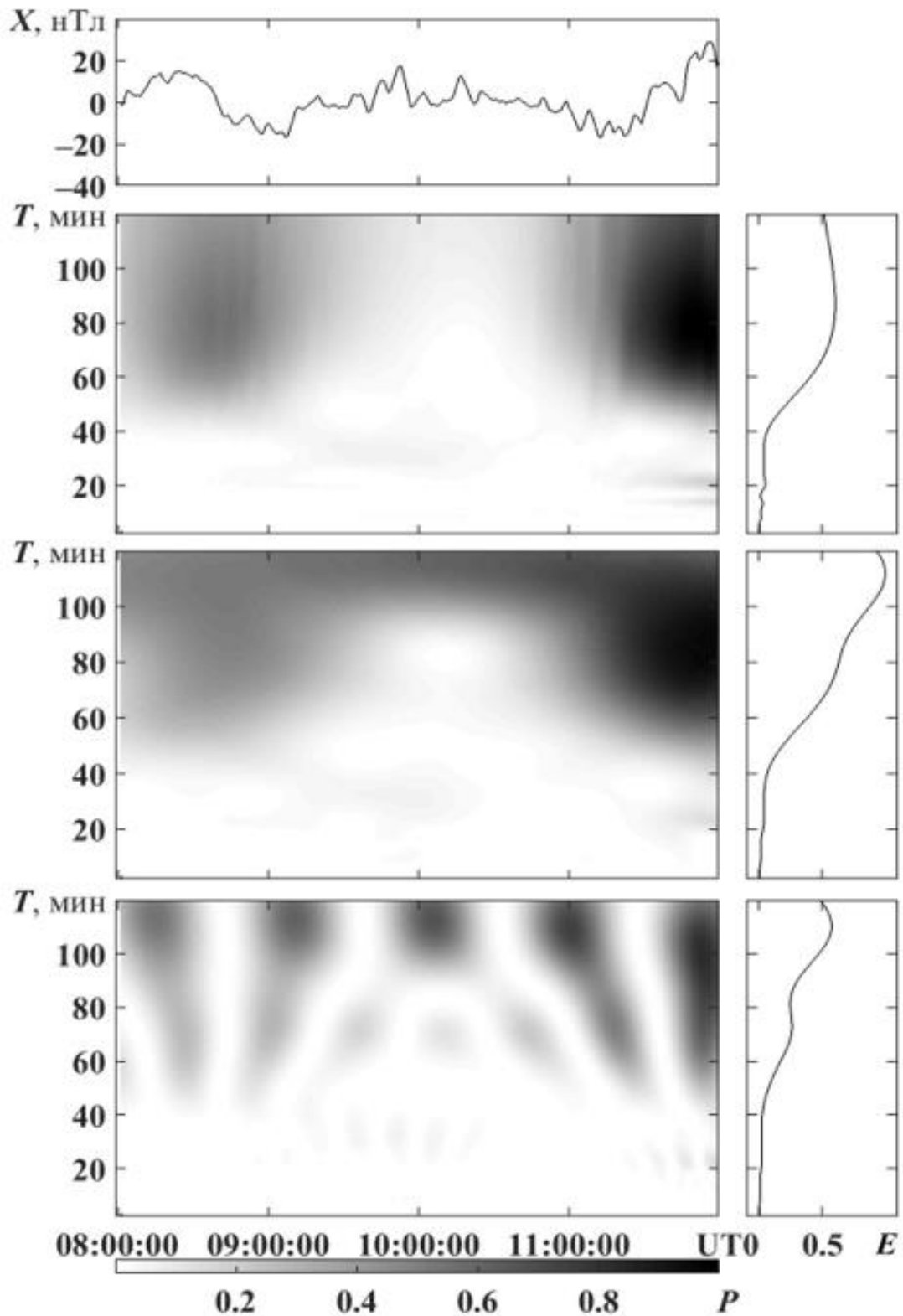


Рис. 8. Результати смугової фільтрації та ССА в діапазоні періодів 2–120 хв для станції HRN в інтервалі часу 08:00:00–12:00:00 UT.

Fig. 8. The band-pass filtering and system spectral analysis in the 2–120 min period range for HRN station at 08:00:00–12:00:00 UT time interval.

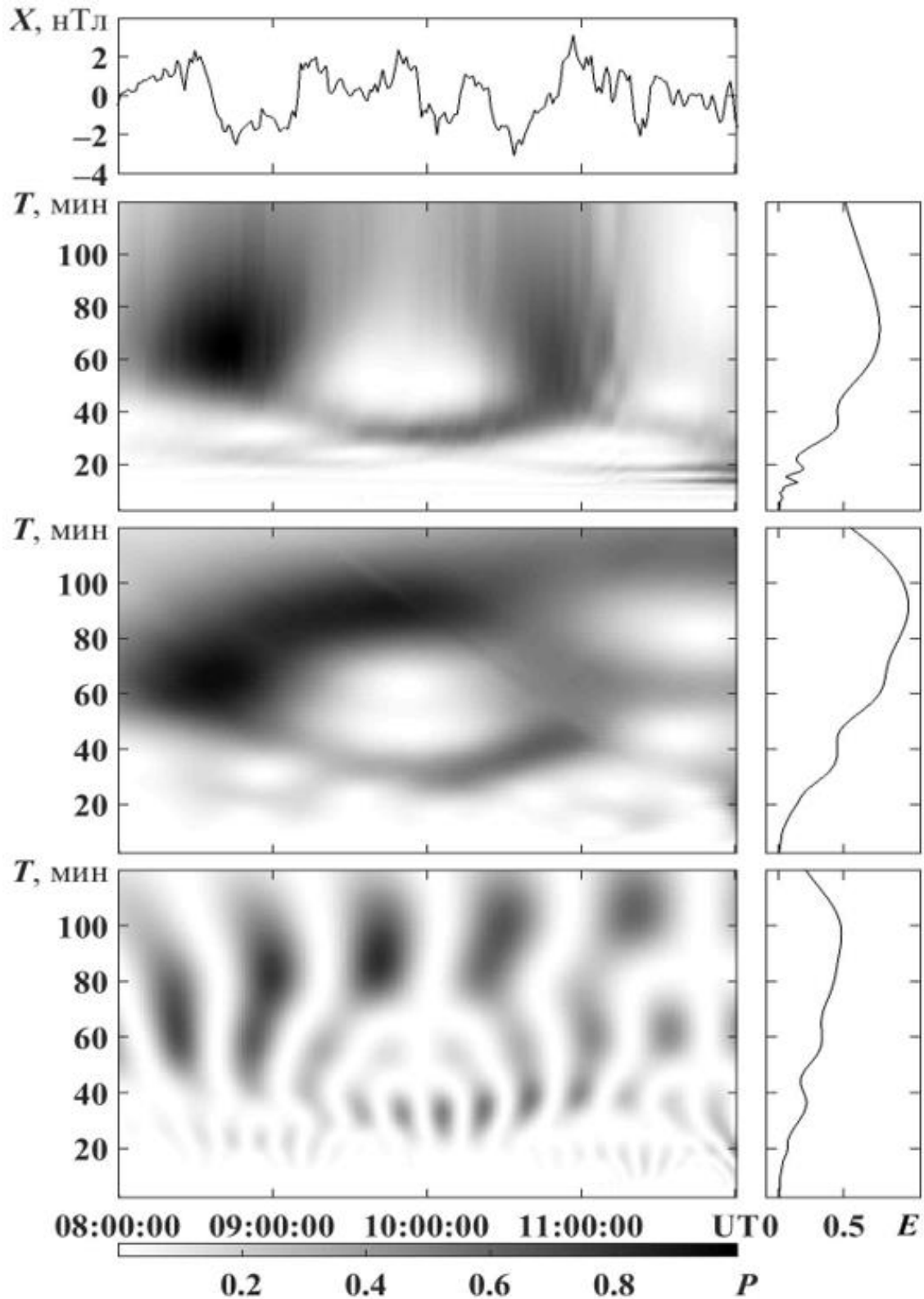


Рис. 9. Результати смугової фільтрації та ССА в діапазоні періодів 2–120 хв для станції LVV в інтервалі часу 08:00:00–12:00:00 UT.

Fig. 9. The band-pass filtering and system spectral analysis in the 2–120 min period range for LVV station at 08:00:00–12:00:00 UT time interval.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bauer LA. Results of international magnetic observations made during the total solar eclipse of May 18, 1901, including results obtained during previous solar eclipses. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1902;7(4):155-192. <https://doi.org/10.1029/TE007i004p00155>
2. Chree C. Magnetic and electric observations at Kew Observatory relating to the solar eclipse of August 21, 1914. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1915;20(2):71-74. <https://doi.org/10.1029/TE020i002p00071>
3. Bauer LA, Fisk HW. On the results of some magnetic observations during the solar eclipse of August 21, 1914. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1916;21(2):57-86. <https://doi.org/10.1029/TE021i002p00057>
4. Bauer LA. Results and analysis of magnetic observations during the solar eclipse of May 29, 1919.— Summary I. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1920;25(3):81-98. <https://doi.org/10.1029/TE025i003p00081>
5. Chapman S. The Effect of a Solar Eclipse on the Earth's Magnetic Field. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1933;38(3):175-183. <https://doi.org/10.1029/TE038i003p00175>
6. Özcan O, Aydoğdu M. Possible effects of the total solar eclipse of August 11, 1999 on the geomagnetic field variations over Elazığ-Turkey. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2004;66(11):997-1000. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.03.009>
7. Curto JJ, Heilig B, Pinol M. Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2006;111(A7):A07312. <https://doi.org/10.1029/2005JA011499>
8. Egbdal J, Ambolt N. The effect on geomagnetism of the solar eclipse of 30 June 1954. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1955;7:40-48. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(55\)90105-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(55)90105-7)
9. Nagata T, Nakata Y, Rikitake T, Yokoyama I. Effect of the Solar Eclipse on the Lower Parts of the Ionosphere and the Geomagnetic Field. *Rep. Ionosph. Res. Japan*. 1955;9:121-135.
10. Nagata T, Rikitake T, Nakata Y. The effect of a solar eclipse on the lower part of the ionosphere and on the geomagnetic field. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1956;6:236-242.
11. Kato Y, Osaka J. The effect of the Solar Eclipse on the Sq current of the diurnal variation. *Science reports of the Tohoku University. Ser. 5, Geophysics*. 1956;7(SUPPLEMENT):21-29.
12. Rikitake T, Uyeda T, Tanaoka I, Nakagawa E. Preliminary report on the effect of the solar eclipse on April, 19, 1958 on the geomagnetic field. *Rept Ionospheric Res. Japan*. 1958;12:174-181.
13. Kato Y. The effect on geomagnetic field of the solar eclipse of October 12, 1958. *Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophysics*. 1960;12(1).
14. Tauer J. On Methods Used for Determining the Effect of a Solar Eclipse on the Geomagnetic Field. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 1964;8(1):72-81. <https://doi.org/10.1007/BF02607050>
15. Kato Y. The Effect on the Geomagnetic Micropulsation of the Solar Eclipse of 20 July 1963. *Science reports of the Tohoku University. Ser. 5, Geophysics*. 1964;16(2):49-62.
16. Matsushita S. Effects of a solar eclipse on the equatorial geomagnetic field. *Annales De Géophysique*. 1966;22:471-477.
17. Bomke HA, Blake HA, Harris AK, Hulse WH, Sheppard DJ, Giesecke AA, Pantoja A. Recombination coefficient and coronal contribution to E-layer ionization from magnetic observations of a solar eclipse. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1967;72(23):5913-5918. <https://doi.org/10.1029/JZ072i023p05913>
18. Giesecke AA, Casaverde M, Kato Y, Aoyama I, Takei S. The effect on the geomagnetic field of the solar eclipse of Nov. 12, 1966 at and near the dip equator. *Rep. Ionosph. Space Res. Japan*. 1968;22:61-69.
19. Lilley FEM, Woods DV. Magnetic observations of the solar eclipse of 23 October 1976 in Australia. *Nature*. 1977;266(5605):823-824. <https://doi.org/10.1038/266823a0>
20. Rastogi RG. Solar eclipse effects on geomagnetism. *Proc. Indian Nat. Sci. Acad.* 1982;48(A, Supplement No. 3):464-472.
21. D'Costa A, Perez G. Change of the geomagnetic pulsation regime in the period of the solar eclipse on October 12, 1977. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1984;24(4):658-661.
22. Takeda M, Araki T. Ionospheric currents and fields during the solar eclipse. *Planetary and Space Science*. 1984;32(8):1013-1019. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(84\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(84)90057-6)
23. Nevanlinna H, Häkkinen L. Geomagnetic Effect of the Total Solar Eclipse on July 22, 1990. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*. 1991;43(4):319-321. <https://doi.org/10.5636/jgg.43.319>
24. Walker GO, Li TYY, Wong YW, Kikuchi T, Huang YN. Ionospheric and geomagnetic effects of the solar eclipse of 18 March 1988 in East Asia. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1991;53(1-2):25-37. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90017-2)

25. Brenes J, Leandro G, Fernández W. Variation of the geomagnetic field in Costa Rica during the total solar eclipse of July 11, 1991. *Earth, Moon, and Planets*. 1993;63:105-117. <https://doi.org/10.1007/BF00575100>
26. Orozco AL, Barreto LM. Magnetic Effects during the Solar Eclipse of July 11, 1991. *Geofísica Internacional*. 1993;32(1):3-13. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1993.32.1.1147>
27. Thoa NTK, Chau HD, Hao TQ, Tri PV, Son VT, Truong LV, Nam VH. Magnetic and ionospheric observations during the October 24, 1995 total solar eclipse in Vietnam. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 1997;8(2):155-164. [https://doi.org/10.3319/TAO.1997.8.2.155\(ASEE\)](https://doi.org/10.3319/TAO.1997.8.2.155(ASEE))
28. Střeščík J. The response of the 11 August 1999 total solar eclipse in the geomagnetic field. *Earth, Moon, and Planets*. 1999;85(0):561-566. <https://doi.org/10.1023/A:1017047627850>
29. Malin SRC, Özcan O, Tank SB, Tunçer MK, Yazıcı-Çakin O. Geomagnetic signature of the 1999 August 11 total eclipse. *Geophys. J. Int.* 2000;140(3):F13-F16. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2000.00061.x>
30. Korte M, Lühr H, Förster M, Haak V, Bencze P. Did the solar eclipse of August 11, 1999, show a geomagnetic effect? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2001;106(A9):18563-18575. <https://doi.org/10.1029/2001JA900006>
31. Hvoždara M, Prigancová A. Geomagnetic effects due to an eclipse-induced low-conductivity ionospheric spot. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2002;107(A12):SIA 14-1-SIA 14-13. <https://doi.org/10.1029/2002JA009260>
32. Ladynin AV, Semakov NN, Khomutov SYu. Changes in the daily geomagnetic variation during the total solar eclipse of the 1 August 2008. *Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(3):343-352. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.02.007>
33. Onovughe EV. Geomagnetic Diurnal Variation during the Total Solar Eclipse of 29 March 2006. *International Journal of Astronomy*. 2013;2(4):51-55. <https://doi.org/10.5923/j.astronomy.20130204.01>
34. Черногор ЛФ. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. 480 с.
35. Черногор ЛФ. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008;48(5):681-702.
36. Chernogor LF, Blaunstein N. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-Earth Environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2018. 542 p.

REFERENCES

1. Bauer LA. Results of international magnetic observations made during the total solar eclipse of May 18, 1901, including results obtained during previous solar eclipses. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1902;7(4):155-192. <https://doi.org/10.1029/TE007i004p00155>
2. Chree C. Magnetic and electric observations at Kew Observatory relating to the solar eclipse of August 21, 1914. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1915;20(2):71-74. <https://doi.org/10.1029/TE020i002p00071>
3. Bauer LA, Fisk HW. On the results of some magnetic observations during the solar eclipse of August 21, 1914. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1916;21(2):57-86. <https://doi.org/10.1029/TE021i002p00057>
4. Bauer LA. Results and analysis of magnetic observations during the solar eclipse of May 29, 1919.— Summary I. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1920;25(3):81-98. <https://doi.org/10.1029/TE025i003p00081>
5. Chapman S. The Effect of a Solar Eclipse on the Earth's Magnetic Field. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1933;38(3):175-183. <https://doi.org/10.1029/TE038i003p00175>
6. Özcan O, Aydoğdu M. Possible effects of the total solar eclipse of August 11, 1999 on the geomagnetic field variations over Elazığ-Turkey. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2004;66(11):997-1000. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.03.009>
7. Curto JJ, Heilig B, Pinol M. Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2006;111(A7):A07312. <https://doi.org/10.1029/2005JA011499>
8. Egedal J, Ambolt N. The effect on geomagnetism of the solar eclipse of 30 June 1954. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1955;7:40-48. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(55\)90105-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(55)90105-7)
9. Nagata T, Nakata Y, Rikitake T, Yokoyama I. Effect of the Solar Eclipse on the Lower Parts of the Ionosphere and the Geomagnetic Field. *Rep. Ionosph. Res. Japan*. 1955;9:121-135.
10. Nagata T, Rikitake T, Nakata Y. The effect of a solar eclipse on the lower part of the ionosphere and on the geomagnetic field. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1956;6:236-242.
11. Kato Y, Osaka J. The effect of the Solar Eclipse on the Sq current of the diurnal variation. Science reports of the Tohoku University. Ser. 5, *Geophysics*. 1956;7(SUPPLEMENT):21-29.

12. Rikitake T, Uyeda T, Tanaoka I, Nakagawa E. Preliminary report on the effect of the solar eclipse on April, 19, 1958 on the geomagnetic field. Rept Ionospheric Res. Japan. 1958;12:174-181.
13. Kato Y. The effect on geomagnetic field of the solar eclipse of October 12, 1958. Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophysics. 1960;12(1):.
14. Tauer J. On Methods Used for Determining the Effect of a Solar Eclipse on the Geomagnetic Field. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 1964;8(1):72-81. <https://doi.org/10.1007/BF02607050>
15. Kato Y. The Effect on the Geomagnetic Micropulsation of the Solar Eclipse of 20 July 1963. Science reports of the Tohoku University. Ser. 5, Geophysics. 1964;16(2):49-62.
16. Matsushita S. Effects of a solar eclipse on the equatorial geomagnetic field. *Annales De Géophysique*. 1966;22:471-477.
17. Bomke HA, Blake HA, Harris AK, Hulse WH, Sheppard DJ, Giesecke AA, Pantoja A. Recombination coefficient and coronal contribution to *E*-layer ionization from magnetic observations of a solar eclipse. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1967;72(23):5913-5918. <https://doi.org/10.1029/JZ072i023p05913>
18. Giesecke AA, Casaverde M, Kato Y, Aoyama I, Takei S. The effect on the geomagnetic field of the solar eclipse of Nov. 12, 1966 at and near the dip equator. *Rep. Ionosph. Space Res. Japan*. 1968;22:61-69.
19. Lilley FEM, Woods DV. Magnetic observations of the solar eclipse of 23 October 1976 in Australia. *Nature*. 1977;266(5605):823-824. <https://doi.org/10.1038/266823a0>
20. Rastogi RG. Solar eclipse effects on geomagnetism. *Proc. Indian Nat. Sci. Acad.* 1982;48(A, Supplement 3):464-472.
21. D'Costa A, Perez G. Change of the geomagnetic pulsation regime in the period of the solar eclipse on October 12, 1977. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1984;24(4):658-661.
22. Takeda M, Araki T. Ionospheric currents and fields during the solar eclipse. *Planetary and Space Science*. 1984;32(8):1013-1019. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(84\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(84)90057-6)
23. Nevanlinna H, Häkkinen L. Geomagnetic Effect of the Total Solar Eclipse on July 22, 1990. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*. 1991;43(4):319-321. <https://doi.org/10.5636/jgg.43.319>
24. Walker GO, Li TYY, Wong YW, Kikuchi T, Huang YN. Ionospheric and geomagnetic effects of the solar eclipse of 18 March 1988 in East Asia. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1991;53(1-2):25-37. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90017-2)
25. Brenes J, Leandro G, Fernández W. Variation of the geomagnetic field in Costa Rica during the total solar eclipse of July 11, 1991. *Earth, Moon, and Planets*. 1993;63:105-117. <https://doi.org/10.1007/BF00575100>
26. Orozco AL, Barreto LM. Magnetic Effects during the Solar Eclipse of July 11, 1991. *Geofísica Internacional*. 1993;32(1):3-13. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1993.32.1.1147>
27. Thoa NTK, Chau HD, Hao TQ, Tri PV, Son VT, Truong LV, Nam VH. Magnetic and ionospheric observations during the October 24, 1995 total solar eclipse in Vietnam. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 1997;8(2):155-164. [https://doi.org/10.3319/TAO.1997.8.2.155\(ASEE\)](https://doi.org/10.3319/TAO.1997.8.2.155(ASEE))
28. Střeščík J. The response of the 11 August 1999 total solar eclipse in the geomagnetic field. *Earth, Moon, and Planets*. 1999;85(0):561-566. <https://doi.org/10.1023/A:1017047627850>
29. Malin SRC, Özcan O, Tank SB, Tunçer MK, Yazıcı-Çakin O. Geomagnetic signature of the 1999 August 11 total eclipse. *Geophys. J. Int.* 2000;140(3):F13-F16. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2000.00061.x>
30. Korte M, Lühr H, Förster M, Haak V, Bencze P. Did the solar eclipse of August 11, 1999, show a geomagnetic effect? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2001;106(A9):18563-18575. <https://doi.org/10.1029/2001JA900006>
31. Hvoždara M, Prigancová A. Geomagnetic effects due to an eclipse-induced low-conductivity ionospheric spot. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2002;107(A12):SIA 14-1-SIA 14-13. <https://doi.org/10.1029/2002JA009260>
32. Ladynin AV, Semakov NN, Khomutov SYu. Changes in the daily geomagnetic variation during the total solar eclipse of the 1 August 2008. *Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(3):343-352. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.02.007>
33. Onovughe EV. Geomagnetic Diurnal Variation during the Total Solar Eclipse of 29 March 2006. *International Journal of Astronomy*. 2013;2(4):51-55. <https://doi.org/10.5923/j.astronomy.20130204.01>
34. Chernogor LF. Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2013. 480 p. [in Russian].
35. Chernogor LF. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008;48(5):652-673. <https://doi.org/10.1134/S0016793208050101>
36. Chernogor LF, Blaunstein N. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-Earth Environment. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2018. 542 p.