

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.01.016>

УДК 550.388.2

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Геомагнітний ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р.

Сонячне затемнення (СЗ) належить до рідкісних високоенергетичних явищ природи. Наприклад, зміна внутрішньої (теплової) енергії приземного повітря товщиною всього приблизно в 100 м досягає близько 10^{18} Дж при потужності процесу в одиниці терават. Значна енергетика процесів, викликаних СЗ у верхній атмосфері і геокосмосі. Наприклад, тепла енергія плазми в іоносфері в об'ємі порядку 10^{19} м³ зменшується на 10^{11} Дж. Магнітне поле в об'ємі 10^{21} м³ зменшується на 50 нТл, а його енергія — на 10^{15} Дж. СЗ супроводжуються збуренням параметрів всіх підсистем в системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Збурення параметрів верхньої атмосфери й іоносфери неминуче повинно призвести до варіації геомагнітного поля. В даний час у геофізиків немає єдиної думки про те, як проявляється СЗ в геомагнітному полі. Наявні дані суперечливі. Більшість дослідників вважає, що геомагнітний ефект СЗ реальний. У низці випадків часові варіації геомагнітного поля в цілому повторюють зміни освітленості поверхні Землі, в інших випадках вони можуть випереджати або запізнюватися приблизно на 1 год відносно змін освітленості. Найчастіше вивчався геомагнітний ефект в області повного СЗ, де він повинен бути найбільш вираженим. Що далі розташована обсерваторія від області повної тіні, то важче пов'язати магнітні варіації з СЗ. Пошук реакції геомагнітного поля на СЗ є важкою задачею. Можлива реакція «маскується» варіаціями іншої природи. Більш того, величина та знак збурення геомагнітного поля істотно залежать від стану космічної погоди, сезону, часу доби, розташування магнітної обсерваторії та, звичайно ж, від фази затемнення. Тому дослідження впливу СЗ на геомагнітне поле залишається актуальною задачею. Метою цієї роботи є виклад

результатів аналізу часових варіацій геомагнітного поля, зареєстрованих мережею магнітних станцій INTERMAGNET протягом СЗ 10 червня 2021 р. Особливість цього затемнення полягала в тому, що СЗ було кільцеподібним (максимальна фаза $M_{max} = 0.943$). Кільцеподібне СЗ почалося 10 червня 2021 р. о 08:12:20 UT над територією Канади. Місячна тінь рухалася через Атлантичний океан, Гренландію, Північний Льодовитий океан, Північний полюс, північну частину Європи й Азії. Часткове СЗ спостерігалось в Монголії та Китаї. Закінчилося кільцеподібне затемнення об 11:33:43 UT, а часткове — о 13:11:19 UT. Фаза максимального покриття відзначалася з 10:33:16 UT до 10:36:56 UT над Гренландією. Для аналізу геомагнітного ефекту залучалися результати спостережень світової мережі INTERMAGNET. Розрізнення за часом становило 1 хв, а за рівнем — 0.1 нТл. Вивченню підлягали часові варіації рівнів X-, Y- і Z-складових, зареєстровані у 15 магнітних обсерваторіях. Встановлено, що СЗ супроводжувалося аперіодичним зменшенням рівня X-складової на величину від 31...36 до 2...3 нТл. Зменшення цього рівня було найбільшим поблизу місця кільцеподібного затемнення. У міру віддалення на південь від цього місця величина ефекту швидко зменшувалася. Для найбільш південних станцій зменшення середнього рівня визначити не вдалося. Інші складові геомагнітного поля практично не змінювалися протягом СЗ. СЗ супроводжувалося також квазіперіодичними варіаціями рівня X-складової. Амплітуда цих варіацій зменшувалася у міру віддалення від області кільцевого затемнення від 4.8 до 0.4 нТл. Період квазіперіодичних збурень становив 40 ± 2 хв. Потрібно припускати, що ці збурення були викликані генерацією атмосферних гравітаційних хвиль під дією затемнення. Відносні зміни тиску в хвилі становили 1...2 %. Результати оцінок як аперіодичного, так і квазіперіодичного ефектів близькі до результатів спостережень. Це підтверджує механізм їхньої генерації.

Ключові слова: геомагнітне поле, аперіодичні варіації, квазіперіодичні варіації, іоносферний струм, концентрація електронів, відносна зміна тиску, атмосферна гравітаційна хвиля

ВСТУП

Сонячне затемнення (СЗ) належить до рідкісних високоенергетичних явищ природи. Наприклад, зміна внутрішньої (теплової) енергії приземного повітря товщиною всього приблизно в 100 м досягає 10^{18} Дж при потужності процесу в одиниці терават [1]. Значною є енергетика процесів, викликаних СЗ у верхній атмосфері та геокосмосі. Наприклад, теплова енергія плазми в іоносфері в об'ємі 10^{19} м³ зменшується на 10^{11} Дж. Магнітне поле в об'ємі 10^{21} м³ зменшується на 50 нТл, а його енергія — на 10^{15} Дж.

СЗ супроводжуються збуренням параметрів усіх підсистем у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Збурення па-

раметрів верхньої атмосфери й іоносфери неминуче повинно призвести до варіацій геомагнітного поля.

Вперше геомагнітний ефект для СЗ 18 травня 1901 р. описав Л. Бауер у роботі [2], а пізніше продовжив свої дослідження, використовуючи спостереження ефекту у магнітному полі Землі протягом СЗ 21 серпня 1914 р. та 29 травня 1919 р. [3, 4]. У роботі [9] було описано геомагнітний ефект СЗ 21 серпня 1914 р.

В роботі [7] було запропоновано механізм варіацій геомагнітного поля, викликаних СЗ, в основі якого лежить збурення концентрації електронів, провідності іоносфери на висотах динамо-області (~100 км) та іоносферного струму.

У роботах [17, 18, 24, 25] описано варіації магнітного поля Землі протягом СЗ 20 червня 1955 р. У роботі [34] вперше вивчено можливість генерації геомагнітних пульсацій під дією СЗ. На основі аналізу ефекту геомагнітних пульсацій протягом чотирьох СЗ (20 червня 1955 р., 19 квітня 1958 р., 15 лютого 1961 р. та 5 лютого 1962 р.), які спостерігалися у восьми обсерваторіях світу, було виявлено зменшення амплітуди та частоти пульсацій, а також збільшення їхнього періоду. Подібні дослідження пізніше виконано в роботах [11, 32]. Зокрема, в роботі [32] показано, що X -складова геомагнітного поля (напрямок «північ — південь») при затемненні зменшувалася приблизно на 10 %. Різні складові геомагнітних пульсацій послаблювалися різним чином.

У роботі [31] аналізувались зміни геомагнітного поля у період затемнення 19 квітня 1958 р., а у роботі [5] викладено результати спостережень геомагнітного ефекту після СЗ 12 листопада 1966 р. у Перу. Знайдено, що горизонтальна складова збільшувалася на 30 нТл, що відповідало модельним уявленням [7]. Величина геомагнітних варіацій протягом СЗ 23 жовтня 1976 р. в Австралії не перевищувала 5 нТл [21]. Результати спостережень протягом повного СЗ 11 липня 1991 р. в Коста-Ріці [6, 28] виявили, що амплітуда X -складової зменшилася на 5 нТл, але знак варіацій був протилежним теоретичному [7]. У роботі [35] описано результати спостережень, виконаних для СЗ 24 листопада 1995 р. у В'єтнамі. Горизонтальна складова змінилася на кілька десятків нанотесла.

У роботі [36] на основі комплексного аналізу іоносферних і геомагнітних ефектів, які супроводжували СЗ 18 березня 1998 р. у Східній Азії, було встановлено, що схилення магнітного поля зменшується на 1 нТл. В роботі [26] відзначається, що повне СЗ 22 липня 1990 р. у Фінляндії призводило до зменшення X -, Y - і Z -складових відповідно на 2, 3 і 1 нТл. Найбільш повні дані про геомагнітні варіації отримані для СЗ 11 серпня 1999 р. [10, 14, 15, 19, 22, 29, 32]. У роботі [29] на основі моделювання магнітного ефекту показано, що СЗ 11 серпня 1999 р. не змінило амплітуду X -складової, тоді як амплітуда Y -складової (напрямок «схід — захід») дещо зменшилася. Модельні дослідження магнітного ефекту для цього ж СЗ [22] показали, що про-

тягом СЗ 11 серпня 1999 р. амплітуда складової «схід — захід» збільшилася на 8...10 нТл. В роботі [15] встановлено, що повне СЗ 11 серпня 1999 р. призвело до зменшення амплітуди X -складової на 5...8 нТл та до збільшення амплітуди Y -складової на 12...15 нТл. Крім того, в роботі [15] виконано модельні розрахунки очікуваного ефекту. Водночас в роботі [19] стверджується про відсутність геомагнітного ефекту під час СЗ 11 серпня 1999 р. та обговорюються можливі причини цього.

У роботі [27] було виявлено, що в одній з трьох обсерваторій протягом СЗ 29 березня 2006 р. спостерігалось зменшення амплітуди X -складової на 20 нТл та збільшення амплітуди Y -складової на 10 нТл. В роботі [20] встановлено, що СЗ 1 серпня 2008 р. супроводжувалося зменшенням амплітуди X -складової на 8...10 нТл та збільшенням на 0.004...0.009 нахилення, а також амплітуди Y -складової на 0.8...1 нТл.

Таким чином, на даний час у геофізиків немає єдиної думки про те, як проявляється СЗ у геомагнітному полі. Наявні дані суперечливі. Більшість дослідників вважає, що геомагнітний ефект СЗ реальний. У низці випадків часові варіації геомагнітного поля в цілому повторюють зміни освітленості поверхні Землі, в інших випадках вони можуть випереджати або запізнюватися приблизно на 1 годину відносно змін освітленості. Найчастіше вивчався геомагнітний ефект в області повного СЗ, де він повинен бути найбільш вираженим. Що далі розташована обсерваторія від області повної тіні, то важче пов'язати магнітні варіації з СЗ.

Пошук реакції геомагнітного поля на СЗ є важкою задачею. Можлива реакція «маскується» варіаціями іншої природи. Більш того, величина та знак збурення геомагнітного поля істотно залежать від стану космічної погоди, сезону, часу доби, розташування магнітної обсерваторії та, звичайно ж, від фази затемнення. Тому дослідження впливу СЗ на геомагнітне поле залишається актуальною задачею.

Метою цієї роботи є виклад результатів аналізу часових варіацій геомагнітного поля, зареєстрованих мережею магнітних станцій INTERMAGNET протягом СЗ 10 червня 2021 р. Особливість цього затемнення полягала в тому, що воно було кільцеподібним (максимальна фаза M_{\max} 0.943).

ОБСТАВИНИ ЗАТЕМНЕННЯ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Кільцеподібне СЗ почалося 10 червня 2021 р. о 08:12:20 UT (тут і далі — час всесвітній) над територією Канади (табл. 1). Місячна тінь рухалася через Атлантичний океан, Гренландію, Північний Льодовитий океан, Північний полюс, північну частину Європи й Азії. Часткове СЗ спостерігалось в Монголії та Китаї (рис. 1). Закінчилося кільцеподібне затемнення об 11:33:43 UT, а часткове — о 13:11:19 UT. Фаза максимального покриття, що дорівнює 0.943, відзначалася від 10:33:16 UT

Таблиця 1. Загальні відомості про сонячне затемнення за даними сайту <https://www.timeanddate.com/eclipse/solar/2021-june-10>

Момент затемнення	UT
Початок СЗ	08:12:20
Перша поява кільцеподібного СЗ на Земній кулі	09:49:50
Настання максимальної фази СЗ	10:41:54
Крайня поява кільцеподібного СЗ на Земній кулі	11:33:43
Закінчення СЗ	13:11:19

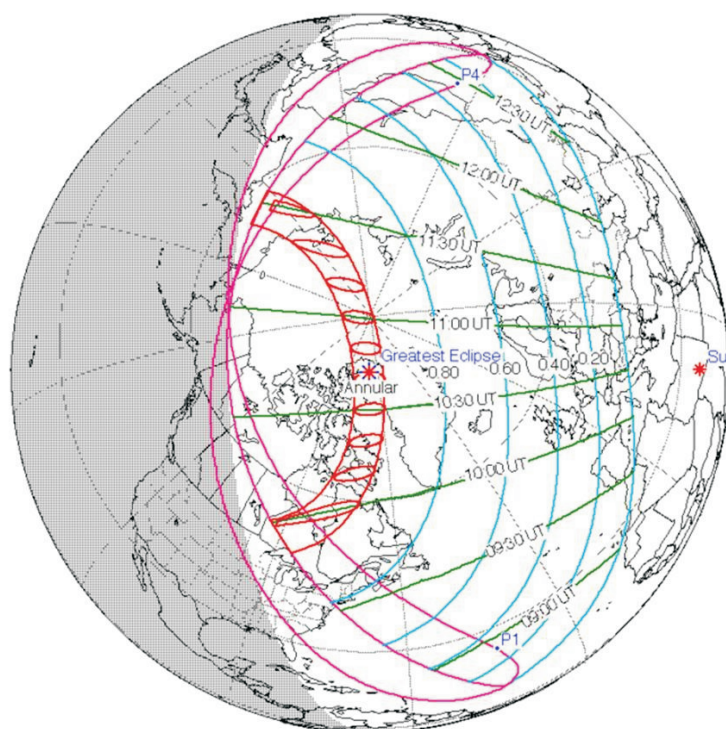


Рис. 1. Зміна фази сонячного затемнення 10 червня 2021 р. за даними <https://eclipse.gsfc.nasa.gov>

до 10:36:56 UT над Гренландією. Тривалість кільцевої фази становила 3 хв 40 с.

Стан космічної погоди. Для аналізу стану космічної погоди скористаємося даними сайтів [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>] та [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>].

Сплески концентрації частинок у сонячному вітрі від $5 \cdot 10^6$ до $(25 \dots 30) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ спостерігались 7 та 12 червня 2021 р. Збільшення швидкості частинок від 350 до 500...550 км/с відмічалось 7 і 8 червня 2021 р. Різкий сплеск температури частинок від $0.2 \cdot 10^5$ до $4.5 \cdot 10^5 \text{ К}$ зареєстровано о другій половині доби 7 червня 2021 р. Сплески тиску

частинок від 1 до 5...6 нПа спостерігались у тих самих інтервалах часу, що й концентрації частинок. Складові B_y і B_z міжпланетного магнітного поля флюктували у межах ± 5 нТл. 7, 11 і 12 червня 2021 р. складова B_z ставала від'ємною. Це призводило до геомагнітних збурень і слабкої бурі. Сплески функції A приблизно від 1 до 8...13 ГДж/с мали місце 7, 11 і 12 червня 2021 р. Водночас із цим індекс K_p збільшувався від 0...1 до 3...4. З 6 на 7 червня та з 10 на 11/12 червня 2021 р. спостерігалось зменшення D_{st} -індексу до $-10...-33$ нТл.

Поблизу моменту СЗ та у відповідні моменти часу 6 та 9 червня 2021 р. стан космічної погоди був спокійним ($K_p = 0.3$).

Засоби та методи. Для аналізу геомагнітного ефекту залучалися результати спостережень світової мережі INTERMAGNET [<https://www.intermagnet.org/>]. Розрізнення за часом становило 1 хв, а за амплітудою — 0.1 нТл. Вивченню підлягали часові варіації рівнів X -, Y - та Z -складових, зареєстрованих у 15 магнітних обсерваторіях (табл. 2). Фаза затемнення M в цих обсерваторіях змінювалася від 0.943 до 0.124, а функція покриття A — від 89 % до 5.1 %. Крім доби з СЗ 10 червня 2021 р., аналізувалися дані за 6, 7, 8, 9 і 11 червня 2021 р. 7, 8 і 11 червня 2021 р. магнітне поле було збуреним, тому за контрольні обрано доби 6 і 9 червня 2021 р. Аналіз показав, що помітні або істотні варіації спостерігалися переважно в X -складовій. Саме вони описані далі.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Станція THL ($M = 0.943$). Часові варіації X -складової на станції THL у день СЗ були наступними (рис. 2). Приблизно з 07:30 та до початку СЗ о 09:30:20 рівень складової флюктував у межах 30...50 нТл. З 09:30 та до 10:34 відзначалося збільшення рівня приблизно на 20 нТл, за яким слідувало його зменшення на 20...50 нТл. Це тривало близько 70...90 хв. З 11:20 до 12:15 мало місце перше збільшення рівня до 40 нТл. Приблизно після 12:20 спостерігалось зменшення рівня, викликане добовими варіаціями.

Станція GDH ($M = 0.909$). Приблизно за 1 годину до початку СЗ рівень X -складової зменшився на 40...45 нТл, що спостерігалось в інтервалі часу 08:10...09:15 (рис. 2). Після початку затемнення та до 10:50 спостерігалось повторне зменшення на 31...33 нТл, мінімум припадав на момент часу 09:50. Далі мали місце відносно невеликі флюктуації рівня.

Станція HRN ($M = 0.761$). До початку СЗ відзначалися порівняно незначні коливання рівня X -складової (рис. 2). Протягом затемнення рівень зменшувався на 17...20 нТл, причому мінімум спостерігався поблизу фази максимального покриття диска Сонця, точніше — в інтервалі часу 10:40...11:10. Після закінчення СЗ зареєстровано флюктуації, які досягають 30...40 нТл.

Таблиця 2. Параметри сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в різних обсерваторіях Земної кулі [https://eclipse.gsfc.nasa.gov/JSEX/JSEX-AS.html]

Назва станції	Координати		Країна	Тип СЗ	t_0	t_{es}	t_{max}	t_{ee}	t_1	M^*	$A, \%^*$
	Широта	Довгота									
Qaanaaq (Thule) (THL)	77.47	-69.227°	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)
Hornsund (HRN)	77	15.547°	Норвегія	P	09:32:33	-	10:43:29	-	11:56:08	0.761 (0.785)	68.5 (71.3)
Qeqertarsuaq (Godhavn) (GDH)	69.252	-53.533°	Королівство Данія	P	09:12:24	-	10:18:12	-	11:27:28	0.909 (0.935)	85.9 (88.6)
Abisko (ABK)	68.358°	18.823°	Швеція	P	09:15:28	-	10:27:10	-	11:42:27	0.588 (0.609)	48.2 (50.6)
Sodankylä (SOD)	67.37°	26.63°	Фінляндія	P	09:10:43	-	10:21:08	-	11:35:35	0.554 (0.574)	44.4 (46.6)
Nurmijärvi (NUR)	60.51°	24.66°	Фінляндія	P	08:58:14	-	10:07:53	-	11:22:57	0.396 (0.414)	27.7 (29.4)
Uppsala (UPS)	59.903°	17.353°	Швеція	P	09:00:53	-	10:11:27	-	11:27:23	0.402 (0.419)	28.2 (30.0)
Borok (BOX)	58.07°	38.23°	Росія	P	08:50:27	-	09:56:57	-	11:09:02	0.327 (0.343)	21.0 (22.5)
Hel (HLP)	54.603°	18.811°	Польща	P	08:51:00	-	09:59:03	-	11:13:20	0.266 (0.281)	15.6 (16.9)
Wingst (WNG)	53.74°	9.07°	Німеччина	P	08:58:23	-	10:06:13	-	11:19:50	0.296 (0.312)	18.2 (19.7)
Niemegk (NGK)	52.07°	12.68°	Німеччина	P	08:52:19	-	09:58:51	-	11:11:36	0.234 (0.248)	12.9 (14.1)
Belsk (BEL)	51.836°	20.789°	Польща	P	08:45:17	-	09:51:31	-	11:04:17	0.187 (0.200)	9.3 (10.3)
Budkov (BDV)	49.08°	14.02°	Чехія	P	08:47:02	-	09:50:56	-	11:01:14	0.151 (0.164)	6.8 (7.7)
Lviv (LVV)	49.9°	23.75°	Україна	P	08:40:31	-	09:45:19	-	10:56:47	0.124 (0.137)	5.1 (5.9)
Furstenfeldbruck (FUR)	48.17°	11.28°	Німеччина	P	08:49:06	-	09:51:39	-	11:00:20	0.147 (0.16)	6.5 (7.4)

Примітка: — широта (північна), — східна довгота (знак «мінус») — західна довгота), тип СЗ «А» — кільцеподібне затемнення, «Р» — часткове затемнення, t_0 — момент початку затемнення, t_{es} — момент початку кільцеподібного або повного затемнення, t_{max} — момент часу максимальної фази затемнення, t_{ee} — момент закінчення кільцеподібного або повного затемнення, t_1 — момент часу закінчення затемнення, M — магнітуда сонячного затемнення, A — доля видимої площі Сонця, покрита місячним диском
* — параметри розраховано для висоти 0 км (у дужках — для 110 км).

Станція ABK ($M = 0.588$). До початку СЗ рівень X -складової був близьким до $-10...-15$ нТл (рис. 2). Приблизно з 08:35 і до 11:30 він зменшився на $9...11$ нТл. Після закінчення затемнення рівень флюктуював з амплітудою $10...15$ нТл.

Станція SOD ($M = 0.554$). До настання СЗ рівень X -складової був близьким до $-20...-30$ нТл (рис. 2). Приблизно з 08:35 та до 11:30 рівень зменшився на $7.6...9$ нТл. В цілому часові залежності $X(t)$ на станціях ABK та SOD були схожими.

Станція UPS ($M = 0.402$). Як видно з рис. 3, рівень X -складової 10 червня 2021 р. до початку СЗ поступово зменшувався від -12 до -25 нТл в інтервалі часу 07:30...08:25. Після 08:25 та до закінчення затемнення об 11:27 тенденція до зменшення тривала. Крім того, на повільні зменшення рівня приблизно на 5 нТл наклалися коливання, розмах яких досягав $3...4$ нТл. Після закінчення СЗ рівень, флюктууючи, поступово збільшувався від -25 до $-3...-4$ нТл.

Станція NUR ($M = 0.396$). Приблизно за 30 хв до початку СЗ рівень X -складової зменшувався від -16 до -22 нТл (рис. 3). Це тривало близько 45 хв. Протягом затемнення рівень коливався з розмахом близько 8 нТл. Мали місце квазіперіодичні варіації з періодом T

40 хв і амплітудою близько 4 нТл. Після закінчення СЗ рівень, флюктууючи, збільшився від -20 до 5 нТл. Під дією затемнення рівень в середньому зменшувався на $-4.8...-5$ нТл.

Станція VOX ($M = 0.327$). З рис. 3 випливає, що протягом СЗ варіації рівня X -складової носили квазіперіодичний характер з періодом близьким до 40 хв і амплітудою близько 4 нТл. Середній рівень змінювався незначно (на $3.3...3.7$ нТл). Після затемнення він, флюктууючи, збільшувався від -15 до 10 нТл.

Станція WNG ($M = 0.296$). Як видно з рис. 3, з 07:30 до початку СЗ (близько 09:00) спостерігалось стрімке зменшення рівня X -складової від -4 до -25 нТл. З 09:00 до 10:00 рівень в середньому становив $-22...-24$ нТл. Після 10:00 спостерігалась тенденція до поступового збільшення рівня від -23 до -5 нТл. Протягом СЗ спостерігалися слабкі квазіперіодичні варіації з $T = 40$ хв і амплітудою приблизно 1 нТл.

Станція HLP ($M = 0.266$). Приблизно за 20 хв до початку СЗ зазначалося зменшення на 5 нТл рівня X -складової (рис. 3). Далі спостерігалися його квазіперіодичні варіації з періодом близько 40 хв та амплітудою $1...2$ нТл. Зменшення середнього рівня на $2.4...2.6$ нТл тривало до кінця затемнення. Після 11:20 реєструвалися флюктуації рівня та збільшення його середнього значення від -15 до 0 нТл.

Станція NGK ($M = 0.234$). Стрімке зменшення рівня X -складової від -5 до -20 нТл почалося до СЗ (рис. 4). Після початку затемнення та до 10:00 рівень складової флюктуував біля -20 нТл, після чого спостерігалось його збільшення від -20 до -5 нТл. Це збільшення супроводжувалося флюктуаціями рівня.

Станція BEL ($M = 0.187$). З 07:30 та до початку СЗ рівень X -складової зменшувався від -10 до -23 нТл (рис. 4). Зменшення

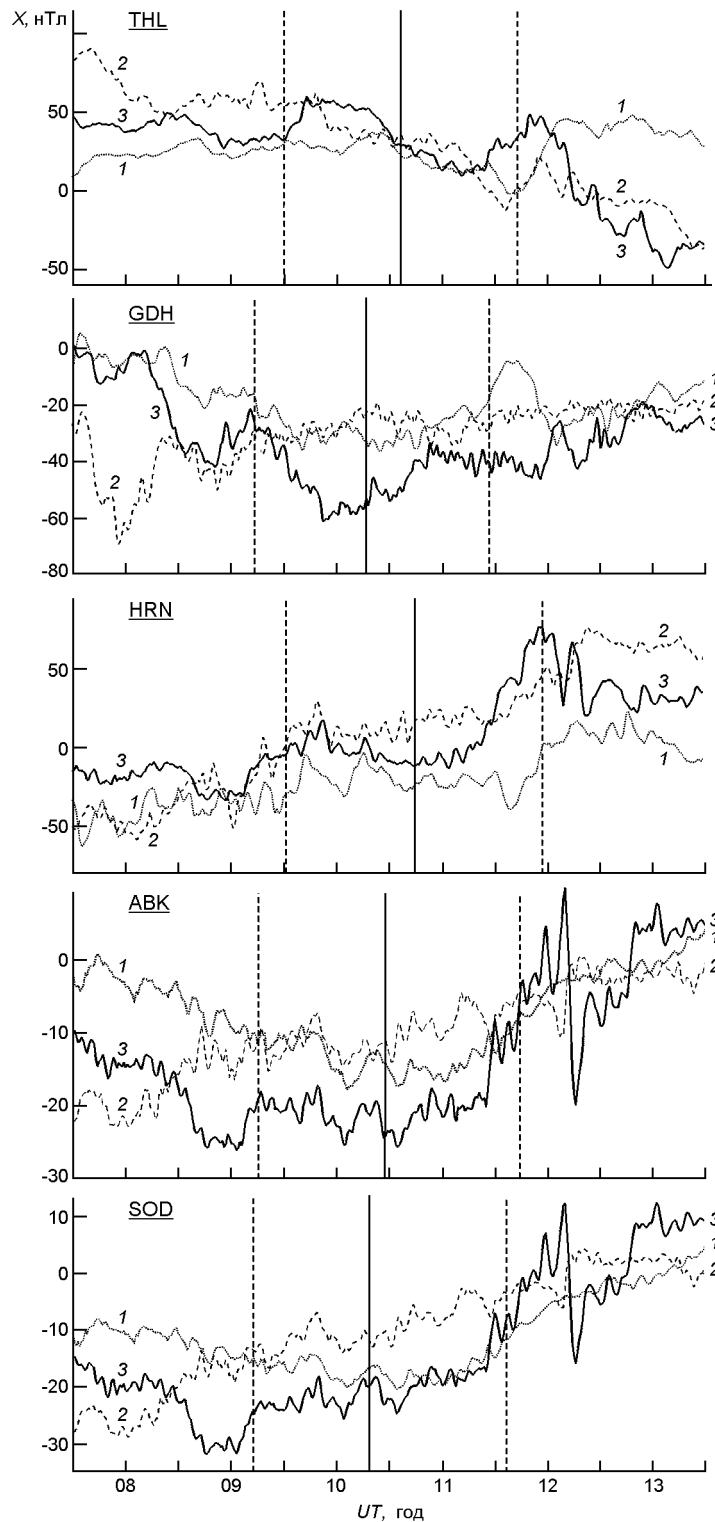


Рис. 2. Часові варіації рівня X -складової над станціями Qaanaaq (THL), Qeqertarsuaq (GDH), Hornsund (HRN), Abisko (ABK), Sodankyla (SOD): крива 1 — 6 червня; 2 — 9 червня; 3 — у день СЗ 10 червня 2021 р. Штрихові вертикальні лінії — моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія — максимальна фаза СЗ

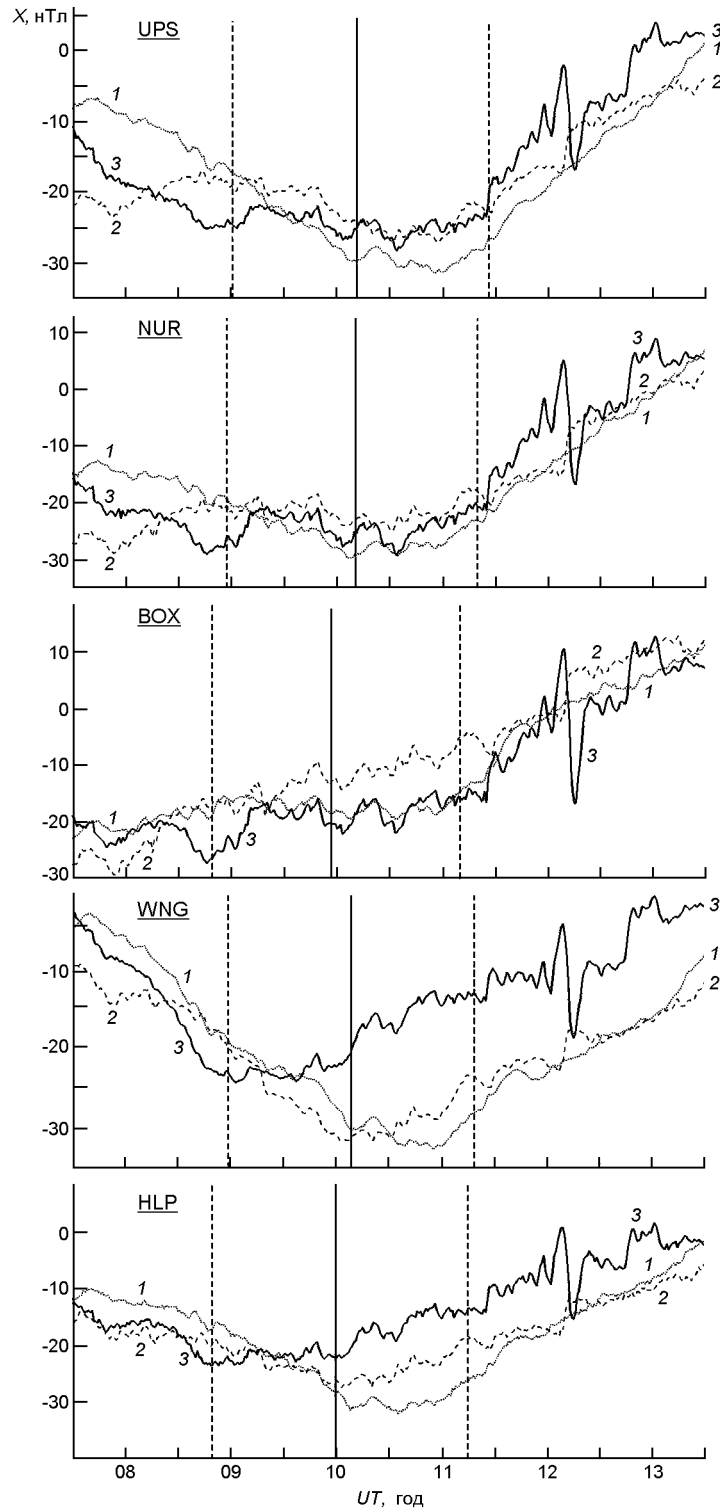


Рис. 3. Те ж саме, що й на рис. 2, для станцій Uppsala (UPS), Nurmijarvi (NUR), Borok (BOX), Wingst (WNG), Hel (HLP)

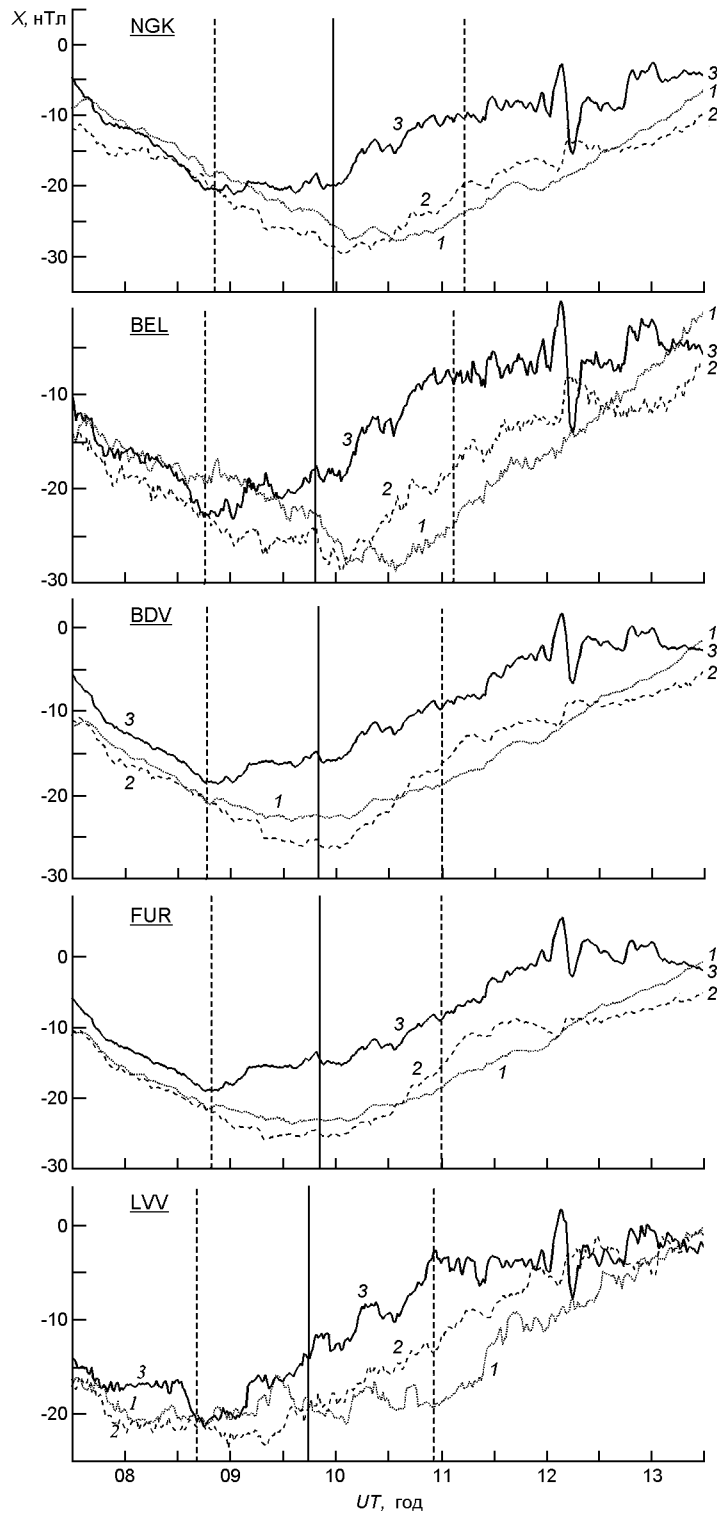


Рис. 4. Те ж саме, що й на рис. 2, для станцій Niemegek (NGK), Belsk (BEL), Budkov (BDV), Furstenfeldbruck (FUR), Lviv (LVV)

середнього рівня становило приблизно 1 нТл. Після 09:00 відзначалося поступове збільшення рівня від -22 до -5 нТл.

Станція BDV ($M = 0.151$). Зменшення рівня X -складової спостерігалось з 07:30 практично до початку СЗ. Зменшення середнього рівня було меншим за 1 нТл (рис. 4). Протягом затемнення та після нього середній рівень поступово збільшувався від -17 до -2...-3 нТл. На повільні зміни накладалися більш високочастотні флуктуації.

Станція FUR ($M = 0.147$). З рис. 4 видно, що зменшення рівня X -складової спостерігалось від 07:30 до 08:45. Далі відзначалося його зростання від -18 до 0 нТл. Варіації середнього рівня та розмах флуктуацій протягом затемнення не перевищували 1 нТл.

Станція LVV ($M = 0.124$). Перед початком СЗ рівень X -складової був близьким до -17 нТл (рис. 4). За 10 хв до початку затемнення рівень зменшився на 4...6 нТл. Це тривало не більше 40 хв. Далі рівень, флуктуюючи, поступово збільшувався від -16 до -5 нТл. Протягом СЗ відзначалися коливання з $T = 40$ хв і амплітудою близькою до 1 нТл. Зміни середнього рівня були дуже незначні (менші за 1 нТл).

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Спочатку обчислимо зменшення концентрації електронів N протягом СЗ. До затемнення у квазістаціонарних умовах для E -шару іоносфери, де має місце струмова система Sq , рівняння балансу для N набуває вигляду

$$q_0 = q_{01} + q_{02} - \alpha_0 N_0^2, \quad (1)$$

де q_0 — сумарна швидкість іонізації, q_{01} та q_{02} — швидкості іонізації за рахунок диска та корони Сонця, α_0 — коефіцієнт рекомбінації в незбурених умовах, N_0 — концентрація електронів за відсутності СЗ. Після початку затемнення

$$q = q_{01}B(t) + q_{02} - q_{01}(1 - A(t)) - \alpha_0 N^2, \quad (2)$$

де $A(t)$ та $B(t)$ — доля затіненої та незатіненої частини площі диска Сонця відповідно, $B(t) = 1 - A(t)$. Функцію $A(t)$ також часто називають функцією покриття. Вводячи величину $\beta = q_{02} / q_{01}$ та припускаючи, що α_0 отримаємо

$$\frac{N}{N_0} = \frac{B}{1 - \beta}. \quad (3)$$

Оцінки для β виконано в роботі [1]. Припустимо далі, що $\beta = 0.25$. Результати розрахунку $(N / N_0)_{\min}$ і $(N / N_0)_{\min} - 1$ для різних магнітних станцій наведено в табл. 3. Видно, що в залежності від B_{\min} відношення $(N / N_0)_{\min}$ змінювалося від 0.56 до 0.98. Значення B_{\min} наведено для висоти 110 км.

Вважаємо, що геомагнітний ефект викликається варіаціями щільності струму j на висотах динамо-області атмосфери (90...150 км). У

роботах [8, 29] показано, що X -складова «північ — південь» змінюється за рахунок збурення щільності струму j в напрямку «схід — захід». При цьому обчислено значення варіацій X -складової

$$X_c = \frac{1}{2} \mu_0 J_y, \quad (4)$$

де μ_0 — магнітна стала, J_y — збурення інтегральної щільності струму. Незбурена щільність струму дорівнює [8, 29]:

$$j_{0y} = \frac{1}{2} e N_0 v_i. \quad (5)$$

Тут e — заряд електрона, v_i — швидкість руху електронів, $v_i = v_{Bi} / \omega_i$, $v_{Bi} = 180 \text{ с}^{-1}$ — гірочастота іонів у E -шарі іоносфери, $\omega_i = 10^4 \dots 10^2 \text{ с}^{-1}$ — частота зіткнень іонів на висотах 90...150 км відповідно. Основний вклад до інтегральної щільності струму дають висоти поблизу 150 км, де $\omega_i \approx 1$:

$$J_{y0} = \int j_{0y} dz = j_{0y} H, \quad (6)$$

де H — масштаб висот. Оскільки

$$j_{0y} = j_{0y} N, \quad (7)$$

з (4), (6) і (7) маємо

$$X_A = \frac{1}{2} \mu_0 j_{0y} N H. \quad (8)$$

На висотах динамо-області масштаб висот становить 10...30 км. З урахуванням (5) із (8) отримаємо

$$X_A = \frac{1}{4} \mu_0 e N_0 v_i N H. \quad (9)$$

Таблиця 3. Результати оцінок іоносферного та геомагнітного ефектів, викликаних затемненням

Станція	B_{\min}	$(N/N_0)_{\min}$	N	j_{0y} , мкА/м ²	N_0 , 10 ¹¹ м ⁻³	X_c , нТл	X_s , нТл
THL	0.114	0.56	-0.44	6.2	1.3	-34	-32...-36
GDH	0.114	0.56	-0.44	5.8	1.3	-32	-31...-33
HRN	0.287	0.66	-0.34	4.4	1.3	-19	-17...-20
ABK	0.494	0.77	-0.23	3.5	1.3	-10	-9...-11
SOD	0.534	0.79	-0.21	3.1	1.3	-8.3	-7.6...-9.0
UPS	0.700	0.87	-0.13	3.0	1.3	-5	-4.9...-5.1
NUR	0.706	0.87	-0.13	3.0	1.3	-4.9	-4.8...-5.0
BOX	0.775	0.91	-0.09	3.0	1.3	-3.5	-3.3...-3.7
WNG	0.803	0.92	-0.08	3.0	1.3	-3	-2.9...-3.1
HLP	0.831	0.93	-0.07	2.8	1.3	-2.5	-2.4...-2.6
NGK	0.859	0.94	-0.06	2.0	1.3	-1.5	~ -1
BEL	0.897	0.96	-0.04	1.0	1.3	-0.5	-
BDV	0.923	0.97	-0.03	1.0	1.3	-0.4	-
FUR	0.926	0.97	-0.03	1.0	1.3	-0.4	-
LVV	0.941	0.98	-0.02	1.0	1.3	-0.25	-

Результати оцінок X_c за співвідношенням (9) також наведено в табл. 3. Для порівняння там же вказано значення X , отримані зі спостережень.

На високих широтах (≈ 60 пн. ш.) для швидкості дрейфу електронів маємо співвідношення

$$[E \ \mathbf{V}] / B^2,$$

де \mathbf{E} — вектор напруженості іоносферного електричного поля, \mathbf{V} — вектор індукції геомагнітного поля. Оскільки \mathbf{E} та \mathbf{V} — практично перпендикулярні, для модуля швидкості маємо оцінку

$$\frac{E}{B}.$$

При $E = 30$ мВ/м, $B = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл отримаємо ≈ 600 м/с. У середніх широтах збігається зі швидкістю атмосферного вітру. На висотах динамо-області маємо $100 \dots 150$ м/с.

З табл. 3 видно, що при зменшенні широти значення $|X|$ зменшуються. Для цього є дві причини. З одного боку, при цьому зменшувалась фаза M_{\max} , а отже — й $|N|$. З іншого боку, зменшувалась щільність струму. Обидва ефекти призводили до зменшення значень $|X|$. Водночас при відносно малих $|X|$ чіткіше спостерігались квазіперіодичні варіації X . Найімовірніше, вони викликані поширенням на висотах динамо-області атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) з періодами $T = 10 \dots 60$ хв. У цьому випадку v — швидкість частинок у хвилі. При $v = 1$

$$j_{0y} = \frac{1}{2} e N_0 v.$$

Для $N_0 = 1.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ і $v = 6$ м/с маємо значення $j_{0y} = -6.2 \cdot 10^{-8} \text{ А/м}^2$, при $H = 30$ км $J_{0y} = -1.8 \text{ мА/м}$. Тоді амплітуда квазіперіодичного збурення

$$X_a = \frac{1}{4} e N_0 H = \frac{1}{2} J_{0y} H = 1 \text{ нТл}. \quad (10)$$

При $v = 60$ м/с всі перераховані параметри, як це впливає зі співвідношення (10), збільшуються у 10 разів. Приблизно такі ж ($\sim 1 \dots 10$ нТл) амплітуди зареєстровано протягом СЗ.

ОБГОВОРЕННЯ

Аперіодичний ефект. На всіх високоширотних станціях мало місце зменшення рівня X -складової від $-31 \dots -36$ нТл для станцій THL і GDH до $-4 \dots -5$ нТл для станцій UPS і NUR. На більш низькоширотних станціях (BOX, WNG і HLP) це зменшення не перевищувало одиниць

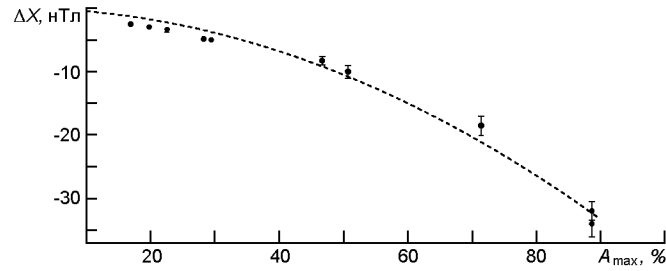


Рис. 5. Залежність максимального рівня зменшення X -складової X від максимального значення функції покриття диска Сонця A_{\max} . Штрихова лінія — апроксимація (11)

нанотесла. Для станцій NGK, BEL, BDV, FUR і LVV зміна середнього рівня була на рівні похибки (менша за 1 нТл). Підкреслимо, що зменшення рівня X -складової визначалося відносно рівня, який передував СЗ. Якщо не порівнювати з контрольними днями, то на станціях WNG, NGK, BEL, BDV, FUR і LVV рівень X -складової збільшився на 10...15 нТл. Цей ефект, мабуть, не пов'язаний із СЗ.

Результати оцінок X_c узгоджуються з результатами спостережень. За залежністю $X(A_{\max})$ побудовано регресію (рис. 5). Вона має вигляд

$$X = -0.004A_{\max}^2 - 0.0106A_{\max}, \quad (11)$$

коефіцієнт достовірності апроксимації $R^2 = 0.9853$, середнє квадратичне відхилення $\sigma = 1.45$ нТл.

Квазіперіодичні збурення. Збурення цього типу, найімовірніше, відбувалися й до СЗ. Протягом затемнення, однак, змінювався їхній період T і дещо збільшувалась амплітуда X_a (див. табл. 3). Середнє значення періоду $\bar{T} = 40 \pm 2$ хв. Такий період мають АГХ на висотах 150...250 км, де зазвичай амплітуда АГХ є максимальною.

Значення X_a змінювались приблизно від 1 до 2 нТл. Можна припустити, що квазіперіодичні збурення складової геомагнітного поля викликані АГХ, згенерованою затемненням. При $X_a = 1...2$ нТл, $H = 25$ км і $j_{0y} = 1.6$ мкА/м² маємо $v = 5...10$ м/с. При цьому $v < v_s$

($1.25...2.5$) 10^{-2} , де $v_s = 400$ м/с — швидкість звуку. Такого ж порядку відносні збурення тиску та концентрації електронів у хвилі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Встановлено, що СЗ супроводжувалося аперіодичним зменшенням рівня X -складової від 31...36 до 2...3 нТл. Зменшення рівня було найбільшим поблизу місця кільцеподібного затемнення. У міру віддалення на південь від цього місця величина ефекту швидко зменшувалась. Для найпівденніших станцій зменшення середнього рівня

визначити не вдалося. Інші складові геомагнітного поля практично не змінювалися протягом СЗ.

2. СЗ супроводжувалося також квазіперіодичними варіаціями рівня X -складової. Амплітуда цих варіацій зменшувалася у міру віддалення від області кільцеподібного затемнення від 4.8 до 0.4 нТл. Період квазіперіодичних збурень становив 40 ± 2 хв. Потрібно припускати, що ці збурення були викликані генерацією атмосферної гравітаційної хвилі під дією затемнення. Відносні зміни тиску в хвилі становили 1...2 %.

3. Результати оцінок як аперіодичного, так і квазіперіодичного ефектів є близькими до результатів спостережень. Це підтверджує описаний механізм їхньої генерації.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера». Робота також частково підтримувалась у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882).

REFERENCES

1. Chernogor L. F. (2013). *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace*. (Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University) [in Russian].
2. Bauer L. A. (1902). Results of international magnetic observations made during the total solar eclipse of May 18, 1901, including results obtained during previous solar eclipses. *Terr. Magn. and Atmos. Elec.* 7(4), 155—192.
<https://doi.org/10.1029/TE007i004p00155>
3. Bauer L. A. (1920). Results and analysis of magnetic observations during the solar eclipse of May 29, 1919.—Summary I. *Terr. Magn. and Atmos. Elec.* 25(3), 81—98.
<https://doi.org/10.1029/TE025i003p00081>
4. Bauer L. A., Fisk H. W. (1916). On the results of some magnetic observations during the solar eclipse of August 21, 1914. *Terr. Magn. and Atmos. Elec.* 21(2), 57—86.
<https://doi.org/10.1029/TE021i002p00057>
5. Bomke H. A., Blake H. A., Harris A. K., Hulse W. H., Sheppard D. J., Giesecke A. A., Pantoja A. (1967). Recombination coefficient and coronal contribution to E-layer ionization from magnetic observations of a solar eclipse. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 72(23), 5913—5918. <https://doi.org/10.1029/JZ072i023p05913>
6. Brenes J., Leandro G., Fernández W. (1993). Variation of the geomagnetic field in Costa Rica during the total solar eclipse of July 11, 1991. *Earth, Moon, and Planets.* 63, 105—117. <https://doi.org/10.1007/BF00575100>
7. Chapman S. (1933). The effect of a solar eclipse on the Earth's magnetic field. *Terr. Magn. and Atmos. Elec.* 38(3), 175—183.
<https://doi.org/10.1029/TE038i003p00175>
8. Chernogor L. F., Blaunstein N. (2018). *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. (Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group).

9. Chree C. (1915). Magnetic and electric observations at Kew Observatory relating to the solar eclipse of August 21, 1914. *Terr. Magn. and Atmos. Elec.* 20(2), 71—74.
<https://doi.org/10.1029/TE020i002p00071>
10. Curto J. J., Heilig B., Pinol M. (2006). Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 111(A7), A07312.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011499>
11. D'Costa A., Perez G. (1984). Change of the geomagnetic pulsation regime in the period of the solar eclipse on October 12, 1977. *Geomagn. and Aeronomy.* 24(4), 658—661.
12. Egedal J., Ambolt N. (1955). The effect on geomagnetism of the solar eclipse of 30 June 1954. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 7, 40—48.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(55\)90105-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(55)90105-7)
13. Giesecke A. A., Casaverde M., Kato Y., Aoyama I., Takei S. (1968). The effect on the geomagnetic field of the solar eclipse of Nov. 12, 1966 at and near the dip equator. *Rep. Ionosph. Space Res. Jap.* 22, 61—69.
14. Heilig B., Csontos A., Kovacs P. (2001). The geomagnetic effect of the solar eclipse of 11 August, 1999. *Contrib. Geophys. Geod.* 31, 323—330.
15. Hvoždara M., Prigancová A. (2002). Geomagnetic effects due to an eclipse-induced low-conductivity ionospheric spot. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 107(A12), SIA 14-1—SIA 14-13. <https://doi.org/10.1029/2002JA009260>
16. Kato Y. (1960). The effect on geomagnetic field of the solar eclipse of October 12, 1958. *Sci. Repts. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys.* 12(1).
17. Kato Y. (1964). The effect on the geomagnetic micropulsation of the solar eclipse of 20 July 1963. *Sci. Repts. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys.* 16(2), 49—62.
18. Kato Y., Osaka J. (1956). The effect of the solar eclipse on the Sq current of the diurnal variation. *Sci. Repts. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys.* 7. (SUPPLEMENT), 21—29.
19. Korte M., Lühr H., Förster M., Haak V., Bencze P. (2001). Did the solar eclipse of August 11, 1999, show a geomagnetic effect? *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 106(A9), 18563—18575. <https://doi.org/10.1029/2001JA900006>
20. Ladynin A. V., Semakov N. N., Khomutov S. Yu. (2011). Changes in the daily geomagnetic variation during the total solar eclipse of the 1 August 2008. *Russian Geol. and Geophys.* 52(3), 343—352. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.02.007>
21. Lilley F. E. M., Woods D. V. (1977). Magnetic observations of the solar eclipse of 23 October 1976 in Australia. *Nature.* 266(5605), 823—824.
<https://doi.org/10.1038/266823a0>
22. Malin S. R. C., Özcan O., Tank S. B., Tunçer M. K., Yazıcı-Çakin O. (2000). Geomagnetic signature of the 1999 August 11 total eclipse. *Geophys. J. Int.* 140(3), F13—F16. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2000.00061.x>
23. Matsushita S. (1966). Effects of a solar eclipse on the equatorial geomagnetic field. *Ann. geophys.* 22, 471—477.
24. Nagata T., Nakata Y., Rikitake T., Yokoyama I. (1955). Effect of the solar eclipse on the lower parts of the ionosphere and the geomagnetic field. *Rep. Ionosph. Res. Jap.* 9, 121—135.
25. Nagata T., Rikitake T., Nakata Y. (1956). The effect of a solar eclipse on the lower part of the ionosphere and on the geomagnetic field. *J. Atmos. Terr. Phys.* 6, 236—242.
26. Nevanlinna H., Häkkinen L. (1991). Geomagnetic effect of the total solar eclipse on July 22, 1990. *J. Geomagn. and geoelec.* 43(4), 319—321.
<https://doi.org/10.5636/jgg.43.319>
27. Onovughe E. V. (2013). Geomagnetic diurnal variation during the total solar eclipse of 29 March 2006. *Inter. J. Astron.* 2(4), 51—55.
<https://doi.org/10.5923/j.astronomy.20130204.01>

28. Orozco A. L., Barreto L. M. (1993). Magnetic effects during the solar eclipse of July 11, 1991. *Geofis. Inter.* 32(1), 3—13.
<https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1993.32.1.1147>
29. Özcan O., Aydoğdu M. (2004). Possible effects of the total solar eclipse of August 11, 1999 on the geomagnetic field variations over Elazi - Turkey. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 66(11), 997—1000. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.03.009>
30. Rastogi R. G. (1982). Solar eclipse effects on geomagnetism. *Proc. Indian Nat. Sci. Acad.* 48(A, Supplement 3), 464—472.
31. Rikitake T., Uyeda T., Tanaoka I., Nakagawa E. (1958). Preliminary report on the effect of the solar eclipse on April, 19, 1958 on the geomagnetic field. *Rept Ionosph. Res. Jap.* 12, 174—181.
32. Štréšník, J. (1999). The response of the 11 August 1999 total solar eclipse in the geomagnetic field. *Earth, Moon, and Planets.* 85(0), 561—566.
<https://doi.org/10.1023/A:1017047627850>
33. Takeda M., Araki T. (1984). Ionospheric currents and fields during the solar eclipse. *Planet. and Space Sci.* 32(8), 1013—1019.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(84\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(84)90057-6)
34. Tauer J. (1964). On methods used for determining the effect of a solar eclipse on the geomagnetic field. *Stud. geophys. et geod.* 8(1), 72—81.
<https://doi.org/10.1007/BF02607050>
35. Thoa N. T. K., Chau H. D., Hao T. Q., Tri P. V., Son V. T., Truong L. V., Nam V. H. (1997). Magnetic and ionospheric observations during the October 24, 1995 total solar eclipse in Vietnam. *Terr., Atmos., and Oceanic Sci.* 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))
36. Walker G. O., Li T. Y. Y., Wong Y. W., Kikuchi T., Huang Y. N. (1991). Ionospheric and geomagnetic effects of the solar eclipse of 18 March 1988 in East Asia. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 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)

L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine

GEOMAGNETIC EFFECT OF THE SOLAR ECLIPSE ON JUNE 10, 2021

A solar eclipse (SE) pertains to rare high-energy natural phenomena. For instance, a change in the internal (thermal) energy of the air in a layer of only a 100-m height attains 10^{18} J while the power of the process is of order of TW. The energetics of the processes produced by the SE in the upper atmosphere and geospace is significant. For instance, the thermal energy of the ionospheric plasma in a volume of $\sim 10^{19}$ m³ decreases by 10^{11} J, the magnetic field in a volume of $\sim 10^{21}$ m³ decreases by 50 nT, and its energy by 10^{15} J. SEs are accompanied by disturbances in all subsystems of the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. Disturbances in the upper atmospheric and ionospheric parameters act to inevitably produce geomagnetic field variations. At present, geophysicists have no consensus on how SE manifests itself in the geomagnetic field. The available data are inconsistent. Most of the researchers believe that the geomagnetic effect of SE exists. In some cases, the temporal variations in the geomagnetic field, as a whole, repeat the changes in the illumination of the Earth's surface, in other cases they occur ~ 1 hour in advance or with time delays of ~ 1 hour relative to the changes in illumination. Most often, the geomagnetic effect is studied in the region of the total SE where it should be the most pronounced. The further the observatory is located from the umbra, the more difficult the magnetic variations are to be relate to the SE. Finding the response of the geomagnetic field to the SE is a

formidable task. A possible response is masked by variations of another nature. Moreover, the magnitude and sign of the geomagnetic field disturbance significantly depend on the state of space weather, season, local time, location of the magnetic observatory, and, of course, on the magnitude of the eclipse. Therefore, the study of the effect of SEs on the geomagnetic field remains an urgent task. The purpose of this work is to present the results of analysis of temporal variations in the geomagnetic field observed by the International Real-Time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET) during the SE of 10 July 2021. The main feature of this eclipse was that the SE was annular (maximum magnitude $M_{\max} = 0.943$). The annular SE occurred on June 10, 2021 with a commencement time 08:12:20 UT over Canada. The Moon's shadow moved across the Atlantic Ocean, the Greenland, the Arctic Ocean, the North Pole, the Northern Parts of Europe and Asia. The partial SE occurred in Mongolia and the People's Republic of China, and it ceased at 11:33:43 UT. The annularity was observed to occur from 10:33:16 to 10:36:56 UT over the Greenland. The analysis of the geomagnetic effect was based on the INTERMAGNET database. Data were processed with 1-min temporal resolution, and with 0.1-nT level resolution, and temporal variations in the X -, Y -, and Z -components recorded at 15 magnetic observatories have been studied. The SE was determined to be associated with an aperiodic decrease in the X component by 31...36 to 2...3 nT. A decrease in the effect attained a maximum value during the maximum magnitude of the annular eclipse, and the magnitude of the effect rapidly decreased with distance southward. For the most southern observatories, we have not managed to determine a decrease in the mean value. Other geomagnetic field components virtually did not change in the course of the SE. The SE was also accompanied by quasi-periodic variations in the level of the X component. The amplitude of these variations decreased from 4.8 to 0.4 nT with distance away from the maximum magnitude area of the annular eclipse. The period of the quasi-periodic disturbances was observed to be 40 ± 2 min. These disturbances are suggested to be produced by acoustic and atmospheric gravity waves under the action of the solar eclipse. Changes in atmospheric wave pressure were estimated to be $\sim 1-2\%$. The estimates of both aperiodic and quasi-periodic effects are substantially in agreement with the observations, which confirms the mechanism for their generation.

Keywords: geomagnetic field, aperiodic variations, quasi-periodic variations, ionospheric current, electron density, pressure change on a relative scale, acoustic and atmospheric gravity wave

Стаття надійшла до редакції 22.07.2021

Після доопрацювання: 22.07.2021

Прийнята до друку: 13.10.2021