

Ю. П. Сумарук, Т. П. Сумарук

Про вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля

(Представлено академіком НАН України В. І. Старостенком)

Досліджено розподіл внеску зовнішніх джерел у вікові варіації геомагнітного поля в 2003 р. за даними світової сітки магнітних обсерваторій. Показано, що джерело внеску – магнітосферний кільцевий струм й іоносферні авроральні та екваторіальний електроджети, величина його в горизонтальну й вертикальну компоненти залежить від географічної широти місця спостереження. Максимальний внесок у горизонтальну компоненту на екваторі та у вертикальну на полюсах приблизно дорівнює 20 нТл. У районах магнітних аномалій та в сейсмоактивних регіонах величина вікових варіацій від зовнішніх джерел значно збільшується.

Вікові варіації (ВВ) геомагнітного поля мають періоди від десятків до сотень років і більше та обчислюються як різниця між середньорічними значеннями елементів геомагнітного поля на даній обсерваторії. Довгий час вважалось, що всі джерела ВВ розміщені всередині Землі. Таке твердження базувалось на припущенні, що середньорічні значення елементів поля, за якими обчислюють ВВ, не містять у собі компонент від зовнішніх джерел, тому що вони іррегулярні і при усередненні за рік повинні зникати. Дослідження останніх років показали, що таке припущення невірне, оскільки ВВ, що обчислені вказаним методом, містять достатньо велику складову від зовнішніх джерел [1–4].

Знання динаміки змін ВВ головного магнітного поля Землі (МПЗ) дуже важливі для побудови механізмів генерації цього поля. Середньорічні значення елементів МПЗ широко використовуються для моделювання поля ядра, створення регіональних моделей ВВ [5, 6], дослідження джерків у ВВ [7, 8], тому виключення компоненти ВВ від зовнішніх джерел має принципове значення як для покращення моделювання, так і вивчення вікових змін головного МПЗ.

Основними зовнішніми джерелами, які дають внесок у ВВ, є кільцевий магнітосферний струм, струми на магнітопаузі та в хвості магнітосфери та іоносферні авроральні електроджети, екваторіальний [9] і полярний електроджети [10].

Величина вищевказаних струмів залежить від інтенсивності корпускулярного й електромагнітного випромінювання Сонця та напряму міжпланетного магнітного поля (ММП) [9–11]. Значний внесок у ВВ дає система іоносферних динамо струмів (S_q), інтенсивність якої в основному залежить від електромагнітного випромінювання Сонця. Частота появи та інтенсивності зовнішніх джерел залежить від сонячної активності.

Просторовий розподіл варіацій від зовнішніх джерел дуже складний. Так, магнітосферні джерела: кільцевий магнітосферний струм та струми на магнітопаузі, які знаходяться далеко від поверхні Землі, генерують майже однорідне магнітне поле, величина якого є найбільшою за абсолютною величиною в горизонтальній (H) компоненті на екваторі (зменшує

поле) та у вертикальній (Z) компоненті на полюсах Землі (збільшує поле). Величина H -компоненти від магнітосферних джерел повинна змінюватись за законом косинуса широти, Z -компоненти — за законом синуса.

Вплив авроральних електроджетів найбільше відображається на авроральних і субавроральних широтах, полярного електроструменя — в полярних шапках Землі, а екваторіального — на широтах геомагнітного екватора. Авроральні електроджети: західний (AL) зменшує H -компоненту на широтах $\sim 60\text{--}70^\circ$, а східний (AU) збільшує її [12]. Під час магнітних бурь вони розвиваються, але оскільки західний електроджет інтенсивніший, ніж східний, то на авроральних широтах сумарна величина збурення буде від'ємною. Величина цієї різниці $AO = |AU| - |AL|$ регулярно публікується [<http://www.isgi.cept.ipsl.fr>]. Отже, знаючи AO , можна обчислити внесок авроральних електроджетів у середньорічні значення H -компоненти поля. Тобто, під час бурь на обсерваторіях, які розміщені під електроджетами, зміни BB будуть негативними. В середніх широтах під час бурь збурення генеруються зворотними струмами від авроральних електроджетів і знак їх повинен бути позитивним [13].

Екваторіальний іоносферний електроджет спостерігається на широтах $\pm 10^\circ$ переважно в східному напрямі [9], що спричинює додатні варіації в горизонтальній компоненті, тобто частина від'ємних варіацій від кільцевого магнітосферного струму компенсується.

2003 р. був віднесений до фази спаду 23 циклу сонячної активності (максимум циклу спостерігався в липні 2000 р.). До середини жовтня 2003 р. сонячна активність була низькою. В другій половині жовтня ситуація різко змінилася. На Сонці появились три надзвичайно активні групи плям, які викликали 16 великих сонячних спалахів, 11 з яких мали найвищий рентгенівський бал X . Надзвичайно потужні потоки енергійних частинок від спалахів вивели з ладу прилади, що записували параметри міжпланетного середовища на космічних апаратах, тому даних про ММП та параметри плазми міжпланетного середовища 28–30 жовтня та 3 листопада 2003 р. немає. Коли Сонце повернулось знову активною стороною до Землі (2324 оберт за Бартельсом), активні області на ньому генерували збурення ММП. Повна напруженість ММП досягла $B > 50$ нТл, вертикальна компонента $B_Z = -50$ нТл. Потік радіовипромінювання Сонця на хвилі 10,7 см 29 жовтня — $F_{10,7} = 270$ Вт·м $^{-2}$ ·Гц $^{-1}$, а 19 листопада — $F_{10,7} = 178$ Вт·м $^{-2}$ ·Гц $^{-1}$. Такі надзвичайні події на Сонці викликали на Землі екстрабурі 29–31 жовтня та 20–21 листопада 2003 р. Магнітна буря 29–31 жовтня 2003 р. розвивалась у два етапи, максимальні значення індексів $A_p = 189$ нТл, $K_p = 9$ нТл, $D_{st} = -401$ нТл, пікові значення компонент геомагнітного поля в середніх широтах досягли $X > 1200$ нТл, $Y > 700$ нТл, $Z > 250$ нТл. На авроральних широтах індекс $AL \geq 2000$ нТл. Друга буря 20–21 листопада була коротшою. Вона тривала приблизно одну добу. Індеси активності приймали значення: $A_p = 117$ нТл, $K_p = 8\text{--}9$ нТл, $D_{st} = -465$ нТл. Ці бурі неодноразово вивчалися [13, 14], вони значно вплинули на середньорічні значення поля всіх обсерваторій світової сітки. Оскільки вікова варіація геомагнітного поля вираховується як різниця між середньорічними значеннями елементів поля, характерний пік BB у 2003 р. дає змогу визначити розподіл на Землі складової BB від джерела, інтенсивність якого достовірно відома.

Мета даної роботи — оцінити внесок у вікову варіацію геомагнітного поля зовнішніх джерел, величина якого значно зросла під час надзвичайних подій на Сонці у 2003 р. та його розподіл на поверхні Землі.

Нами використано середньорічні значення повної напруженості геомагнітного поля і її горизонтальної та вертикальної компонент на працюючих на сьогодні обсерваторіях світової сітки (127 обсерваторій) за 2002–2004 рр. Дані опубліковано в http://www.geomag.bgc.ac.uk/gifts/annual_means.shtml.

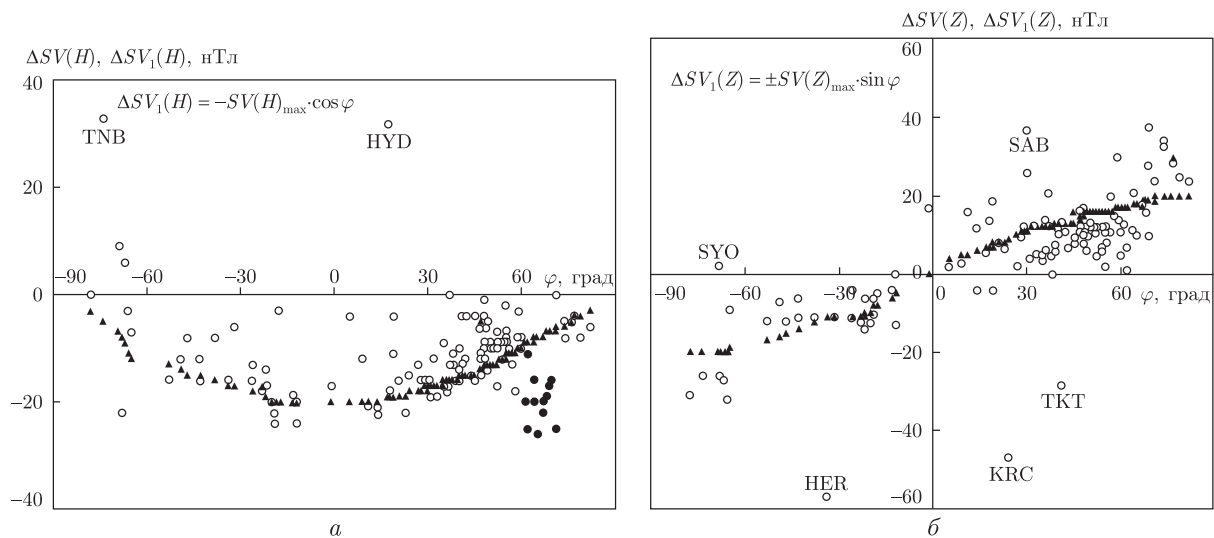


Рис. 1. Залежність вікової варіації від зовнішніх джерел у 2003 р. (кружки) і географічної широти в горизонтальній (H) та вертикальній (Z) компонентах (відповідно a та $б$).

Обсерваторії: TNB — Терра Нова, HYD — Хайдарабад (a); SYO — Сьова, SAB — Сабхавала, HER — Херманус, TKT — Ташкент, KRC — Карачі ($б$).

Трикутниками показано модельні значення, чорними кружками — ВВ на обсерваторіях авроральної зони

Результати досліджень. Величину варіації від зовнішніх джерел обчислювали за формулою:

$$\Delta SV = SV_{2003} - \frac{SV_{2002} + SV_{2004}}{2}, \quad (1)$$

де SV — вікова варіація напруженості геомагнітного поля та її складових за певний рік (вказаний індексом). Ми припускаємо, що зміна ВВ від внутрішніх джерел відбувається повільно і тому, беручи різницю між послідовними роками, вона виключається.

Зміни величини ВВ від зовнішніх джерел у горизонтальній компоненті поля залежно від географічної широти демонструє рис. 1, a .

Оскільки кільцевий магнітосферний струм, який тече на захід, дає зменшення повної напруженості поля, то в горизонтальній складовій зменшення поля на екваторі буде максимальним, а на полюсах — дорівнювати нулю, що ми й спостерігаємо в даному випадку. Величина варіації $\Delta SV(H)$ є від'ємною і зростає за абсолютною величиною від високих широт до екватора. Тобто, їх джерелом є кільцевий магнітосферний струм. Магнітне поле від далеко розташованого кільцевого магнітосферного струму (відстань від центра Землі $\sim 3-4 R_E$, де R_E — радіус Землі) — однорідне, тому широтну залежність $\Delta SV(H)$ можна представити законом косинуса:

$$\Delta SV_1(H) = -\Delta SV(H)_{\max} \cdot \cos \phi, \quad (2)$$

де ϕ — широта обсерваторії; $\Delta SV(H)_{\max}$ — максимальна величина $\Delta SV(H)$ на екваторі, в цьому випадку дорівнює 20 нТл.

На рис. 1, a трикутниками показано величину ВВ від зовнішніх джерел, обчислених за формулою (2). На авроральних обсерваторіях, розташованих на широтах $60-70^\circ$, спостерігається значне відхилення $\Delta SV(H)$ від модельної кривої (позначеної чорними кружками),

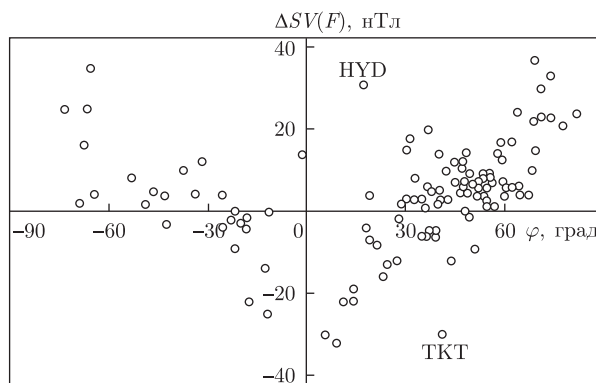


Рис. 2. Залежність вікової варіації напруженості геомагнітного поля від зовнішніх джерел у 2003 р. (кружки) і географічної широти за даними світової сітки магнітних обсерваторій (експериментальні значення). Обсерваторії: HYD — Хайдарабад, ТКТ — Ташкент

що свідчить про вплив іоносферних авроральних електроджетів. Середнє відхилення від модельної кривої в авроральній зоні дорівнює ~ 10 нТл.

В авроральній зоні південної півкулі магнітних обсерваторій мало, тому зробити таке узагальнення є неможливим. На австралійській обсерваторії Маусон, що розташована в південних авроральних широтах, відзначено вплив іоносферних авроральних електроджетів аналогічно до впливу північної авроральної зони.

У районі екватора спостерігаються також значні відхилення $\Delta SV(H)$ від модельної кривої на обсерваторіях о-ва Паматай (PPT); Фукуєня (FUQ), Алібаг (ABG). Оскільки $\Delta SV(H)$ тут зменшується за абсолютною величиною, це свідчить про вплив на ВВ іоносферного екваторіального електроджету, величина варіації від якого додатна. Великі відхилення $\Delta SV(H)$ від модельної кривої на обсерваторіях — індійській Хайдарабад (HYD), пакистанській Квета (QUE) і туркменській Ашхабад (ASH) — найімовірніше відображають вплив підстилаючих поверхонь. Відхилення на антарктичній обсерваторії Терра Нова (TNB), найімовірніше, пов'язані з експериментальними помилками.

Графік зміни величини ВВ від зовнішніх джерел у вертикальній компоненті поля залежно від географічної широти демонструє рис. 1, б. Величина варіації $\Delta SV(Z)$ зростає від екватора до високих широт. Знаки $\Delta SV(Z)$ протилежні в північній і південній півкулях, що є ще одним доказом впливу кільцевого магнітосферного струму. Затемнені трикутники показують величину варіації, розрахованої за моделлю синуса $\Delta SV_1(Z) = \Delta SV(Z)_{\max} \cdot \sin \varphi$. $\Delta SV(Z)_{\max} = 20$ отримано за наведеними на рисунку експериментальними даними, очевидно, його величина не може бути більшою за коефіцієнт у формулі (2). Надзвичайно великі відхилення $\Delta SV(Z)$ від модельної кривої спостерігаються на обсерваторіях Карачі (KRC) і Ташкент (TKT), що свідчить про неоднорідності у підстилаючих поверхнях на цих обсерваторіях.

У південній півкулі більшість обсерваторій (як приклад, дивись обсерваторію Татока (TTB)) розташована на берегах океанів або на островах, тому їх дані спотворені береговим ефектом або океанськими течіями [15].

Внесок у ВВ від зовнішніх джерел у повну напруженість поля $\Delta SV(F)$, що обчислені за експериментальними даними, демонструє рис. 2. У приекваторіальних широтах зовнішні джерела спричиняють зменшення ВВ напруженості геомагнітного поля. Очевидно, тут відображається вплив магнітосферних джерел: кільцевого магнітосферного струму та

Таблиця 1

Обсерваторія	Геомагнітна широта, град	$\Delta SV(H)$, нТл	$\Delta SV(Z)$, нТл	$\Delta SV(F)$, нТл
Херманус	-34	-16(-17)	-57(-11)	4
Ташкент	32	-4(-15)	-29(13)	-30
Ашхабад	31	—	21(13)	20
Квета	22	116(-17)	164(12)	217
Сабхавала	21	-17(-17)	37(11)	15
Карачі	17	-15(-18)	-47(9)	-13
Алїбаг	10	-4(-19)	-4(7)	-7
Хайдарабад	08	32(-19)	6(7)	31
Татока	08	-17(-20)	17(0)	14
Адїс-Абеба	05	-12(-20)	3(5)	-32
Таманрассет	05	-22(-29)	7(8)	-16
Гуам	05	-22(-20)	-4(6)	-23
Пондїчерї	03	-21(-20)	16(5)	-22
Кодайканал	01	-44(-20)	—	—

струмів на денній поверхні магнітосфери, який фіксується магнітографами горизонтальної складової поля. В середніх широтах внесок у повну напруженість поля на обсерваторіях неоднаковий, що свідчить як про вплив зовнішніх джерел, так і про вплив індукованих струмів у підстилаючих поверхнях обсерваторій. У високих широтах зовнішні джерела односторонньо збільшують ВВ напруженості геомагнітного поля, які на окремих обсерваторіях у 2003 р. досягли ~ 40 нТл.

На графіках залежності величини внеску зовнішніх джерел у ВВ у горизонтальну, вертикальну та повну напруженість поля на окремих обсерваторіях спостерігаються значні відхилення від модельних кривих. ВВ від зовнішніх джерел на деяких обсерваторіях світової сітки в 2003 р. та величини варіацій демонструє табл. 1. У другому стовпці таблиці наведено геомагнітну широту обсерваторій, по якій визначено положення екваторіального електроджету. Цифри в дужках показують розраховані за відповідними моделями величини ВВ. Як можна бачити, відхилення від модельних величин у горизонтальній компоненті спостерігаються на обсерваторіях, розміщених під екваторіальним електроджетом ($\varphi = 10-01^\circ$), а у вертикальній компоненті — в сейсмоактивних регіонах — на границях літосферних плит (обсерваторії Квета (QEU), Сабхавала (SAB), Карачі (KRC)) або близько до них (Ташкент (TKT), Ашхабад (ASH)) та в регіонах глобальних магнітних аномалій Херманус (HER).

Таким чином, надпотужні магнітні бурі 2003 р. дали значний внесок у ВВ геомагнітного поля. У низьких широтах і на екваторі внесок у горизонтальну компоненту ВВ дорівнює приблизно 20 нТл. На полюсах внесок у вертикальну складову приблизно дорівнює ± 20 нТл. Особливо чітко спостерігається вплив на ВВ іоносферних авроральних електроджетах. У середніх широтах вплив магнітної активності на ВВ відображається як в горизонтальній, так і в вертикальній компонентах поля, і величина його змінюється залежно від характеру змін індукційних струмів у підстилаючих поверхнях. У районах магнітних аномалій, в сейсмоактивних регіонах, на границі літосферних плит величини вікової варіації від зовнішніх джерел значно збільшуються.

1. Verbanac G., Lühr H., Rother M. Evidence of the ring current effect in geomagnetic observatories annual means // Geofizika. – 2006. – **23**. – P. 13-20.

2. Verbanac G., Lühr H., Rother M. et al. Contributions of the external field to the observatory annual means and the proposal for their corrections // Earth Planets Space. – 2007. – **59**. – P. 251–257.
3. Ладынин А. В., Попова А. А. Квазипериодические флуктуации скорости векового хода геомагнитного поля по данным мировой сети обсерваторий за 1985–2005 гг. // Геология и геофизика. – 2008. – **49**, № 12. – С. 1262–1273.
4. Шевнин А. Д., Левитин А. Е., Громова Л. И. и др. Солнечная циклическая вариация в магнитных элементах обсерватории “Москва” // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – **49**, № 3. – С. 315–320.
5. Korte M., Holme R. Regularization of spherical cap harmonics // Geophys. J. Int. – 2003. – **153**. – P. 253–262.
6. Максимчук В. Ю., Городиський Ю. М., Кузнецова В. Г. Динаміка аномального магнітного поля Землі. – Львів: Євровіт, 2001. – 306 с.
7. Головкин В. П., Симонян А. О. Джерки в вековых геомагнитных вариациях на интервале 1930–1980 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1989. – **29**, № 1. – С. 164–167.
8. Mc. Lead M. Signal and noise in magnetic observatory annual means: mantle conductivity and jerks // J. Geophys. Res. – 1992. – **97**. – P. 17261–17290.
9. Яременко Л. Н. Экваториальный струйный ток. – Киев: Наук. думка, 1970. – 115 с.
10. Сумарук П. В., Фельдштейн Я. И., Белов Б. А. Полярная электроструя в период магнитной бури 23–24 марта 1969 г. // Геофиз. журн. – 1992. – **14**, № 3. – С. 79–81.
11. Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 2. – Москва: Мир, 1975. – 509 с.
12. Davis T. N., Sugiura M. Auroral electrojet activity Index AE and its universal time variations // J. Geophys. Res. – 1966. – **71**. – P. 785–801.
13. Сумарук Ю. П. Варіації геомагнітного поля від магнітосферних та іоносферних джерел під час дуже великої магнітної бури 20–21 листопада 2003 р. // Геофиз. журн. – 2008. – **30**, № 6. – С. 127–130.
14. Лаба І. С., Підстригач І. Я., Сумарук Ю. П. та ін. Надзвичайна сонячна і геомагнітна активність в жовтні-листопаді 2003 р. // Журн. фіз. досліджень. – 2010. – **14**, № 3. – С. 3902–3915.
15. Ryskin G. Secular variation of the Earth's magnetic field: induced by the ocean flow? // New J. Physics. – 2009. – **11**. – 063015, 23 pp.

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна
НАН України, Київ

Надійшло до редакції 12.06.2013

Ю. П. Сумарук, Т. П. Сумарук

О вкладе внешних источников в вековую вариацию геомагнитного поля

Исследовано распределение вклада внешних источников в вековую вариацию геомагнитного поля в 2003 г. по данным мировой сети магнитных обсерваторий. Показано, что источник вклада — магнитосферный кольцевой ток и ионосферные авроральные и экваториальный электроджеты, величина его в горизонтальную и вертикальную компоненты зависит от географической широты места наблюдения. Максимальный вклад в горизонтальную компоненту на экваторе и вертикальную компоненту на полюсах приблизительно равен 20 нТл. В районах магнитных аномалий и в сейсмоактивных регионах величина вековых вариаций от внешних источников значительно увеличивается.

Yu. P. Sumaruk, T. P. Sumaruk

On the contribution of external sources into secular variations of the geomagnetic field

The contribution of external sources into secular variations of the geomagnetic field by the data of the world net of magnetic observatories in 2003 is studied. It is shown that the magnetospheric ring current and the ionospheric auroral and equatorial electrojets are sources of the contribution. The contribution to the horizontal and vertical components depends on the observational place latitude. The maximum contributions to the horizontal component at the equator and into the vertical component at the poles are equal about 20 nT. The secular variation values increase to a great extent at the regions of magnetic anomalies and at the seismoactive regions.