

Довготривалі зміни геомагнітного поля за даними спостережень на магнітних обсерваторіях України

© Ю. П. Сумарук, 2011

Інститут геофізики НАН України, Київ, Україна

Надійшла 13 травня 2011 р.

Представлено членом редколегії М. І. Орлюком

По магнитометрическим данным геомагнитных обсерваторий Украины "Киев", "Львов", "Одесса" приведен анализ долговременных изменений компонент модуля вектора напряженности магнитного поля Земли за весь период их наблюдений в зависимости от положения обсерватории, а также магнитной и солнечной активности.

According to magnetometric data of the Ukrainian observatories "Kiev", "Lvov", "Odesa" the long-term changes of the component and module of geomagnetic field for the whole period of their observations have been analyzed depending on position of the observatories and solar and geomagnetic activities.

Вступ. Магнітне поле Землі неперервно змінюється як у просторі, так і в часі. Варіації магнітного поля в часі зумовлені зовнішніми і внутрішніми джерелами (щодо поверхні Землі). Зовнішні джерела — це магнітосферні та іоносферні системи струмів, зміна яких пов'язана з варіаціями інтенсивності сонячного вітру, тобто його швидкості, густини плазми та напрямку і величини в замороженого в нього міжпланетного магнітного поля. Магнітне поле магнітосферних та іоносферних струмів генерує у провідних шарах земної поверхні під обсерваторією телуричні струми, магнітне поле яких накладається на головне геомагнітне поле та поле від зовнішніх струмів [Maus, Luhg, 2005]. Амплітуда телуричних струмів залежить від часових градієнтів геомагнітних варіацій і провідності земної поверхні в місці знаходження обсерваторії. Отже, магнітна обсерваторія реєструє сумарне магнітне поле, розділити яке на складові є дуже складним завданням. Наявність декількох обсерваторій повною мірою спрощує це завдання, оскільки телуричні струми в околі обсерваторій різні. Крім того, географічні координати обсерваторій неоднакові, а отже, їх положення відносно зовнішніх джерел, особливо іоносферних, також змінюється,

що дає можливість ідентифікувати ці джерела. Довгі ряди спостережень елементів геомагнітного поля на одній обсерваторії дають змогу використати їх для аналізу довгострокових змін головного магнітного поля Землі (ГМПЗ), які називають віковими варіаціями (ВВ) [Яновский, 1978]. ВВ знаходять за аналізом змін середньорічних значень елементів геомагнітного поля.

Проблему знаходження джерел ВВ розв'язують уже багато років [Тверской, 1936; Калинин, 1984]. Немає сумніву, що в середньорічних значеннях поля є компонента, пов'язана зі зміною сонячної активності, однак на кількісному та якісному рівнях це досі не доведено [Ладынин и др., 2006; Dremukhina et al., 2008; Шевнин и др., 2009].

Вплив геомагнітної активності на амплітуду компонент повного вектора поля виявляють унаслідок їх змін з періодами близько 2 [Sumaruk, 2000; Ладынин, Попова, 2008], 11, 22 і, навіть, 80 років [Sumaruk, 2007].

Ми проаналізували зміни магнітного поля Землі на магнітних обсерваторіях України за весь час їх неперервної діяльності (п'ять останніх 11-річних циклів сонячної активності) з метою виділення в подальшому ВВ від зов-

нішніх і внутрішніх джерел. Середньомісячні значення H -компоненти досліджували для виділення сезонної зміни та зв'язку із сонячною активністю, вираженою індексом $F_{10,7}$.

Використані дані. Геомагнітні обсерваторії України "Київ", "Львів", "Одеса" (табл. 1) розташовані у різних геологічних зонах, тому спостережувані ВВ магнітного поля Землі відрізняються унаслідок як різного географічного положення, так і різних властивостей підстильних поверхонь цих обсерваторій.

Широти обсерваторій розрізняються лише на $\sim 3^\circ$, тому варіації від зовнішніх магнітосферних струмів (кільцевого (RC), частинно-кільцевого (PRC), струму у хвості (DT) та струму на магнітопаузі (DCF)), що протікають на відстані від кількох радіусів Землі і вище, однакові за величиною. Проте іоносферні системи струмів, що протікають на висоті від 120 км і вище, генерують різні за величиною ВВ геомагнітного поля [Космическая геофизика, 1976]. Так, авроральні іоносферні електрострумені (DP) та зворотні від них струми в середні широти генерують більші за амплітудою варіації на обсерваторіях "Львів" та "Київ", аніж на обсерваторії "Одеса", а S_q -система струмів, навпаки, генерує більшу варіацію на обсерваторії "Одеса", тому що остання розміщена ближче до фокуса S_q -системи струмів.

Аналогічно різними є і внески у спостережувані варіації геомагнітного поля індукованих струмів у підстильних поверхнях обсерваторій, хоча внесок від глибших джерел (наприклад, струмів на межі ядро—мантія) однаковий.

Для дослідження використані середньомісячні та середньорічні значення горизонтальної (H), вертикальної (Z) складових поля, магнітного схилення (D) і модуля поля (T) за всіма (індекс a), п'ятьма міжнародно-спокійними

(індекс q) і збуреними (індекс d) днями в 1957—2008 рр. [Головков и др., 1983].

Методика обробки даних та результати досліджень. За середньогодинними значеннями H -, D -, Z -компонент поля обчислено середньодобові й середньомісячні значення за всіма днями, а також середньомісячні значення за п'ятьма міжнародно-спокійними днями та п'ятьма міжнародно-збуреними днями. Список цих днів регулярно виставляють на сайті МЦД у м. Кіото (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp>). За середньомісячними значеннями обчислено середньорічні значення компонент геомагнітного поля (рис. 1—4).

Спостерігається різний характер змін H -, D -, Z -компонент геомагнітного поля. Горизонтальна компонента H змінювалась синхронно на всіх обсерваторіях. Її ріст спостерігався у 1959—1978 рр. (інтервал Δt_1 — фаза росту). В 1979—1980 рр. H -компонента залишалась майже постійною, і лише в 1981 р. почався спад її абсолютної величини, який продовжувався до 1991 р. (інтервал Δt_2 — фаза спаду). З 1991 до 2004 р. H -компонента змінювалась нерегулярно в межах ± 12 нТл, і лише в 2005 р. розпочалося її регулярне зростання.

В табл. 2 наведено величини росту ΔH_1 за інтервал часу Δt_1 , спаду ΔH_2 за інтервал часу Δt_2 , різницю $\Delta H = \Delta H_1 - \Delta H_2$, а також середню швидкість зміни H -компоненти за вказані вище роки. Найбільший ріст $\Delta H_1 = 237$ нТл і, відповідно, найбільша швидкість змін $\Delta H_1 / \Delta t_1 = 13,2$ нТл/рік спостерігаються на фазі росту на обсерваторії LVV, найменші — на ODE ($\Delta H_1 = 155$ нТл, $\Delta H_1 / \Delta t_1 = 8,6$ нТл/рік). На фазі спаду H -компоненти, навпаки, найменша величина зареєстрована на LVV і приблизно однакова на KIV та ODE, таке саме співвідношення відзначено між швидкостями спаду. Очевидно, подібна різниця у швидкості росту та спаду величини H на обсерваторіях пов'язана

Т а б л и ц я 1. Деякі параметри геомагнітних обсерваторій

Назва	Код	Довгота	Широта	Період спостережень, роки
«Київ» (Димер)	KIV	30,30° (104,54°)	50,43° (45,98°)	1958—2009 (1958)
«Львів» (Івано-Франкове)	LVV	23,75° (98,63°)	49,90° (45,14°)	1952—2009 (1929)
«Одеса» (Степанівка)	ODE	30,88° (104,26°)	46,78° (41,66°)	1936—2009 (1896)

Примітка. У дужках — інші назви обсерваторій, виправлені геомагнітні широти та довготи, роки початку роботи обсерваторій. Координати обсерваторій взято із публікації [Abston et al., 1985].

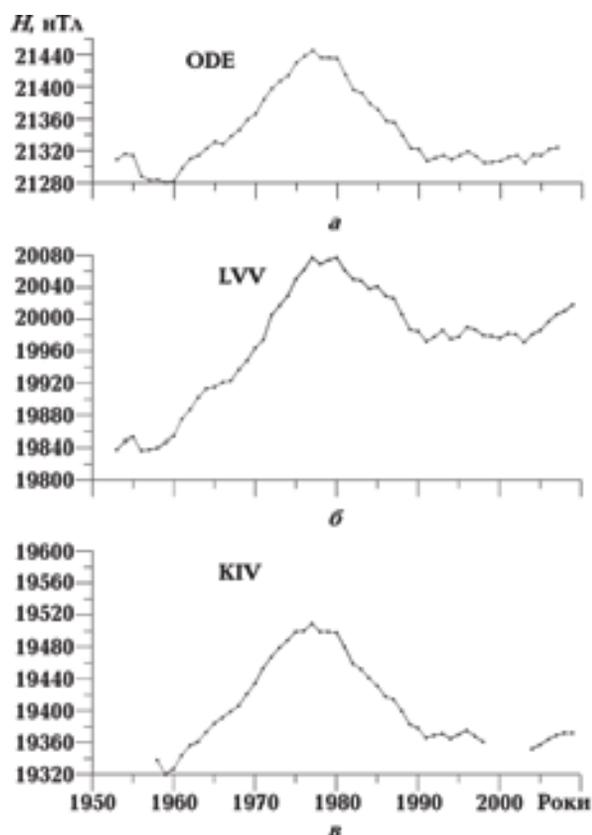


Рис. 1. Середньорічні значення H -компоненти за всіма днями на геомагнітних обсерваторіях "Одеса" (ODE), "Львів" (LVV) і "Київ" (KIV): a — 1953—2007 рр.; b — 1953—2009 рр.; b — 1958—2009 рр.

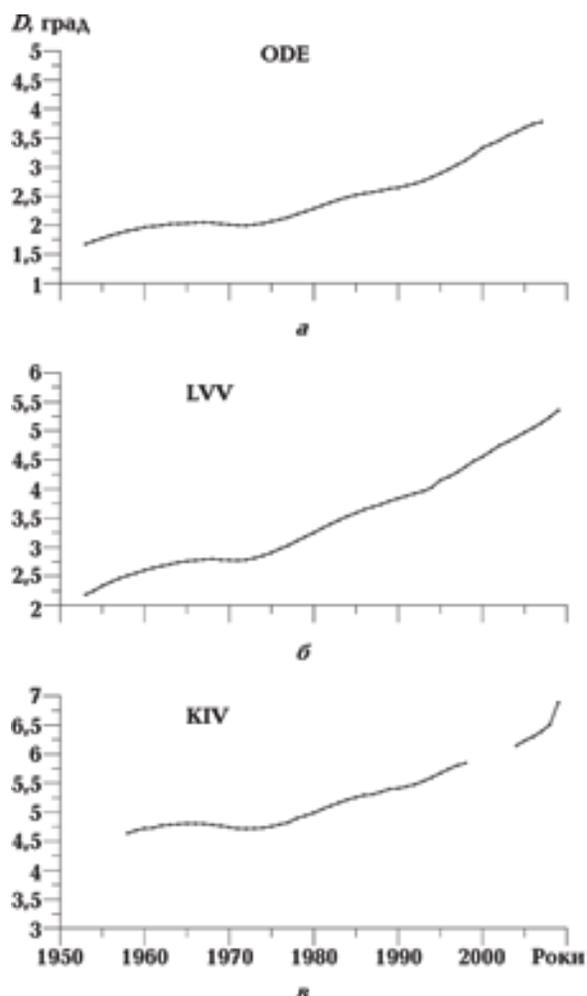


Рис. 2. Середньорічні значення D -компоненти за всіма днями на геомагнітних обсерваторіях. Умовні позначення див. на рис. 1.

на з різними властивостями підстильних поверхней обсерваторій. Характерною є також різниця ΔH у періоди Δt_1 та Δt_2 . Ця величина на LVV дорівнює 133 нТл, тобто намагнічення підстильної поверхні в період Δt_1 значно більша за розмагнічення в період Δt_2 . Отже, новий ріст H -компоненти на LVV, який спостерігаємо з 2005 р., почався на значно вищо-

му рівні. На KIV різниця $\Delta H = 46$, на ODE $\Delta H = 17$ нТл, тобто значно менша, ніж на LVV. Спостерігається майже симетричність процесу намагнічення — розмагнічення підстильної поверхні.

Величина магнітного схилення неперервно зростала (див. рис. 2), швидкість росту її на обсерваторіях неоднакова, вона також зміню-

Т а б л и ц я 2. Величина зміни горизонтальної компоненти

Обсерваторія	ΔH_1 , нТл	ΔH_2 , нТл	ΔH , нТл	$\Delta H_1 / \Delta T_1$, нТл/рік	$\Delta H_2 / \Delta T_2$, нТл/рік
ODE	155	138	17	8,6	12,4
KIV	188	142	46	10,4	12,9
LVV	237	104	133	13,2	9,5

Т а б л и ц я 3. Середні швидкості зміни магнітного схилення за різні періоди часу, хв/рік

Обсерваторія	1959—1978	1981—1990	1991—2008
LVV	1,7	3,6	4,6
ODE	0,7	2,4	4,1
KIV	0,4	2,7	—

валася з часом. Найбільша швидкість росту величини D зареєстрована на LVV. В інтервалі часу Δt_1 швидкість менша, ніж в інтервалі Δt_2 . Зміна швидкості росту найбільша на ODE, і вже в інтервалі часу 1991—2008 рр. вони майже однакові (табл. 3).

Як видно на рис. 2, на лінійний тренд зміни швидкості росту D -компоненти накладаються нелінійні варіації. Ці варіації мають квазисинусоїдальну форму. Максимуми їх спостерігалися в 1964, 1986 рр., мінімум — у 1973 р., перехід через нуль — у 1959, 1968, 1977, 1991 рр. Отже, екстремуми квазисинусоїди спостерігаються в роки мінімумів магнітної активності, а зміна знака — в максимумах або в близьких до них роках. Очевидно, такі варіації пов'язані із сонячною активністю.

Абсолютні значення вертикальної компоненти Z поля неперервно зростали на трьох обсерваторіях за майже прямолінійним законом (див. рис. 3). На пряму лінію накладались квазисинусоїдальні коливання, які найчіткіше видно на графіках KIV та ODE в 1959—1977 рр. За фазою ці коливання збігаються з квазисинусоїдою в магнітному схиленні. На обсерваторії LVV ці варіації мають іншу форму і амплітуда їх більша. Середня швидкість росту Z -компоненти найбільша на LVV — 26 нТл/рік; на ODE — 25, на KIV — 24 нТл/рік.

Як відомо, повна індукція модуля T у середніх широтах відображає вплив багатьох джерел, які спричиняють зміни в горизонтальній та північній складових (зовнішні: кільцевий магнітосферний струм, авроральні електрострумені, динамо-струми та внутрішні тороїдальні струми в корі та на межі ядро—мантія), зміни в схиленні або східній складовій (зовнішні джерела: струми вздовж силових ліній головного магнітного поля, меридіональна складова авроральних електроструменів і струмів розтікання від них у середні широти; внутрішні джерела: полоїдальні струми в корі та на межі ядро—мантія), а також зміни у вертикальній складовій (S_q -струми, струми

вздовж силових ліній, телуричні струми). Тому величина T показує сумарний ефект впливу всіх вищеназваних складових, і прив'язувати та постулювати зміни величини T одним джерелом не можна. Реєструється, як і в Z -складовій, майже прямолінійне зростання напруженості поля (рис. 4). Оскільки $T^2 = H^2 + Z^2$, то початок відхилення від прямолінійної залежності спостерігається у той рік, коли горизон-

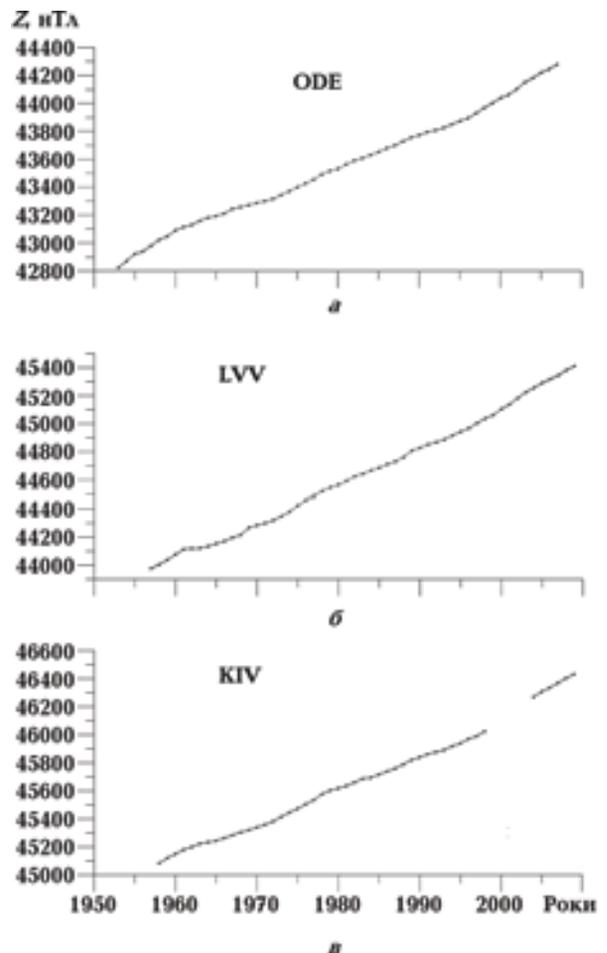


Рис. 3. Середньорічні значення Z -компоненти за всіма днями на геомагнітних обсерваторіях. Умовні позначення див. на рис. 1.

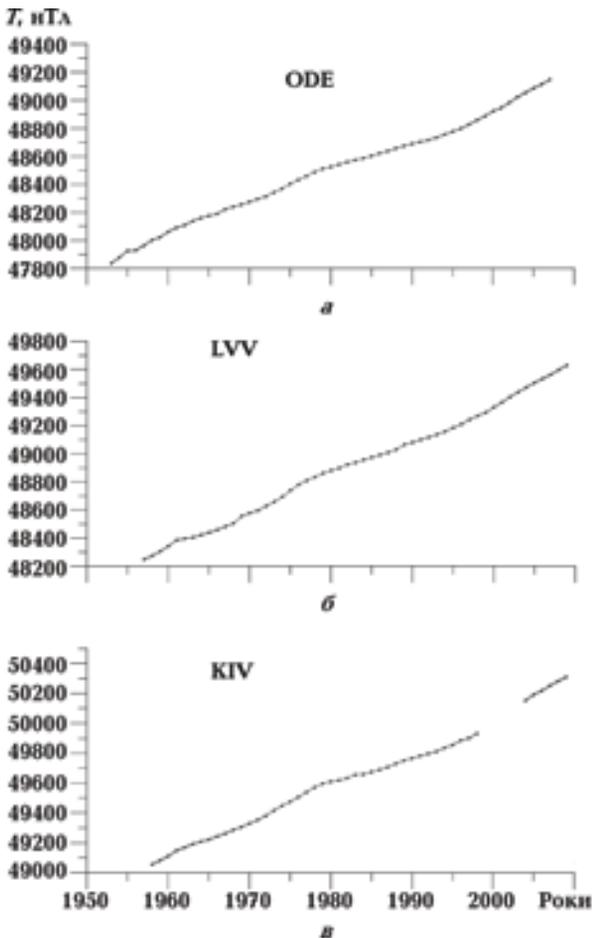


Рис. 4. Середньорічні значення модуля вектора T на геомагнітних обсерваторіях. Умовні позначення див. на рис. 1.

тальна складова починає зростати. Середня швидкість росту напруженості поля за досліджуваний інтервал часу становить, нТл/рік: LVV — 23; KIV — 21, ODE — 21.

Проведено аналіз середньомісячних значень H -, D -, Z -компонент за усі, спокійні та збурені дні (рис. 5). Як видно, середньомісячні значення H_d завжди менші, ніж H_q , а значення H_a є проміжними між ними. Це явище має фізичний зміст, оскільки збільшення магнітної активності відображається у зменшенні горизонтальної компоненти на досліджуваних обсерваторіях унаслідок розвитку магнітосферно-іоносферної системи струмів.

У магнітоспокійні дні внесок зовнішніх джерел у варіацію горизонтальної компоненти мінімальний.

На фоні росту H -компоненти з року в рік добре відслідковуються сезонні варіації як в H_d і H_a , так і в H_q , які є синфазними. Амплітуди сезонних змін найбільші у рівнодення і мінімальні в зимові та літні місяці. Причина такого явища відома, оскільки інтенсивність інжекції сонячного вітру в магнітосферу найбільша у рівнодення [Космическая геофизика, 1976]. Спостерігалось відхилення H_q у бік зменшення в березні — жовтні. Оскільки H_q вираховують у міжнародно-спокійні дні, коли магнітних збурень немає, тобто кільцевий струм слабкий і може давати на поверхні Землі зменшення H -компоненти на ~ 10 нТл і це зменшення компенсується додатним збуренням такої самої величини від струмів на магнітопаузі

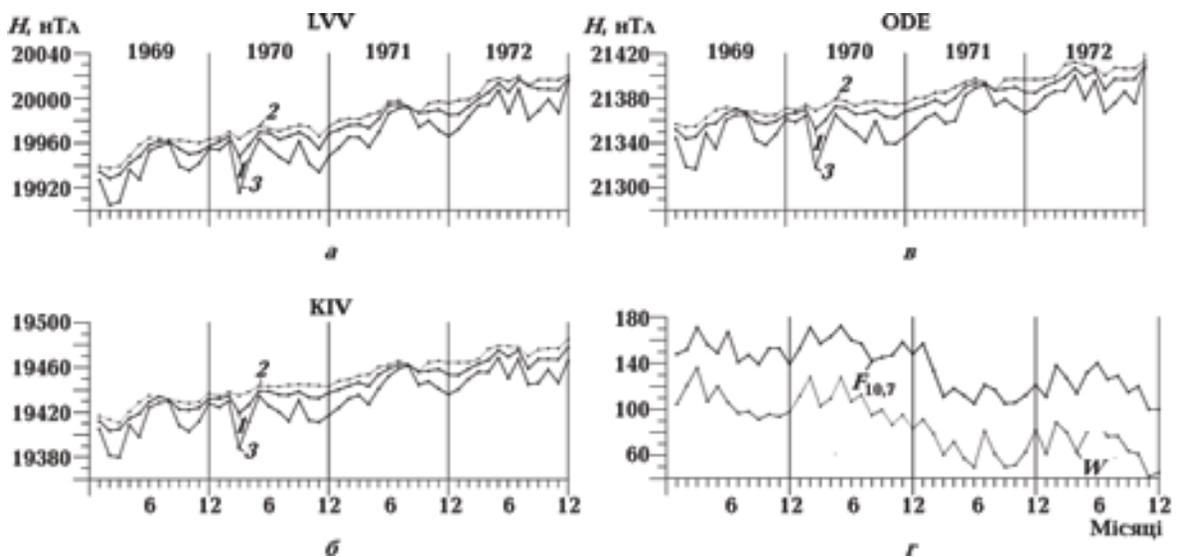


Рис. 5. Середньомісячні значення H -компоненти (а—в) та чисел Вольфа (W) і параметра $F_{10.7}$ (r) на геомагнітних обсерваторіях LVV (а), KIV (б), ODE (в) за 1969—1972 рр. Дні: 1 — всі, 2 — спокійні, 3 — збурені.

[Порчхидзе, Фельдштейн, 1978], то можна припустити, що подібні зменшення H_q мають інше джерело.

На рис. 5, г представлені ряди середньомісячних значень чисел Вольфа (W) та параметра $F_{10,7}$ за 1969—1972 рр. Параметр $F_{10,7}$ характеризує інтенсивність радіовипромінювання Сонця на частоті 3000 МГц і разом з числами Вольфа добре відзначає сонячну активність. Як видно з рис. 5, г, параметри $F_{10,7}$ і W добре корелюють з величинами H_a та H_d і менше — з H_q . Це означає, що в середньомісячні (середньорічні) значення H_a істотний внесок робить варіація H , пов'язана із сонячною активністю, що необхідно враховувати під час обчислення вікових варіацій.

На рис. 6 показано, як змінюються абсолютні середньомісячні значення магнітного

схилення за ті самі роки. Як указано вище (див. рис. 2), величина магнітного схилення (D — додатне за відхилення магнітного меридіана на схід від географічного) за 1953—2008 рр. зростала і тільки в 1968—1972 рр. незначно спадала. Такий спад, імовірно, пов'язаний із включенням у ВВ схилення [Mandea, 2001]. Величини D_d завжди більші за D_q . Різниця ($D_d - D_q$) збільшується з ростом геомагнітної активності. Спостерігається і сезонний ефект; різниця ($D_d - D_q$) зростає у рівнодення і мінімальна в літні місяці.

Як видно на рис. 7, величина Z_d завжди більша за Z_q . На фоні неперервного росту Z дуже слабо виділяється сезонний ефект.

За порівняння рис. 5—7, сезонні варіації абсолютних значень H -компоненти змінюються в протифазі до варіацій Z -складової та схи-

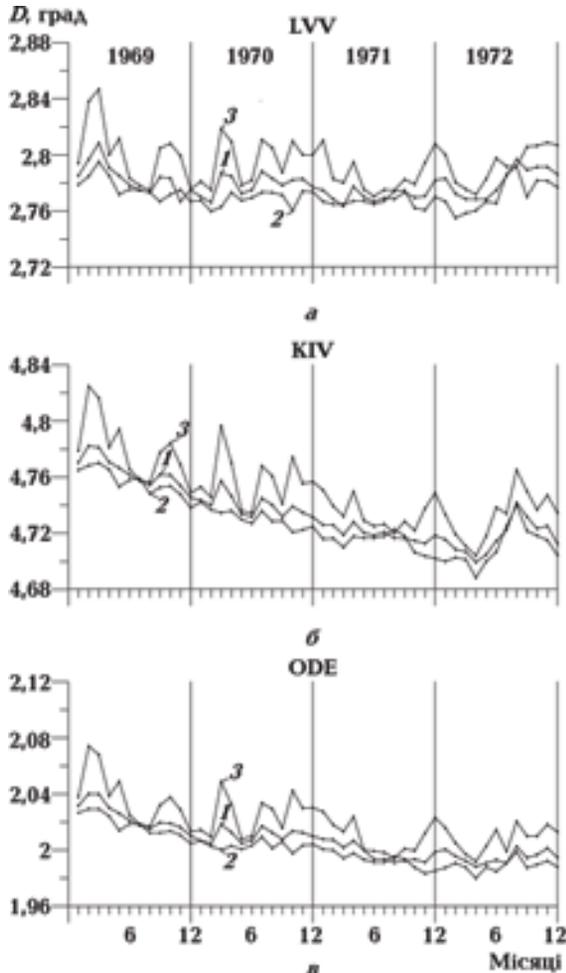


Рис. 6. Середньомісячні значення D -компоненти на геомагнітних обсерваторіях за 1969—1972 рр. Умовні позначення див. на рис. 5.

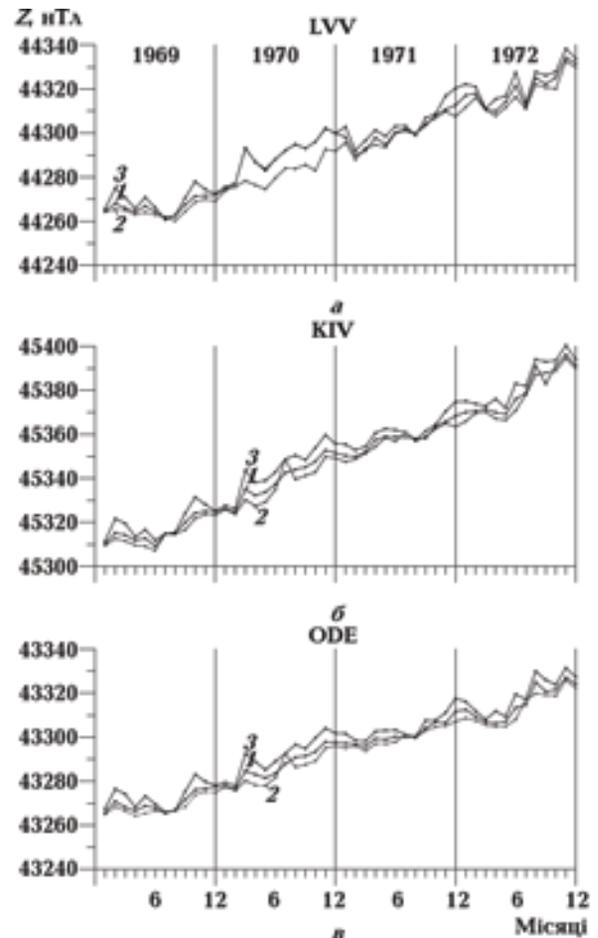


Рис. 7. Середньомісячні значення Z -компоненти на геомагнітних обсерваторіях за 1969—1972 рр. Умовні позначення див. на рис. 5.

лення D , причому амплітуди змін H приблизно удвічі більші за амплітуди величин Z і D .

Обговорення. Спостереження за компонентами магнітного поля Землі в Україні ведуть три геомагнітні обсерваторії "Львів", "Київ" та "Одеса". Кожна з них розміщена в регіонах з різною геологічною будовою підстильної поверхні, тому слід очікувати, що варіації геомагнітного поля відрізнятимуться. Змінення магнітного поля періодично замірюють у пунктах вікового ходу, що дає змогу виявити тонку структуру вікових змін геомагнітного поля [Максимчук та ін., 2010]. Згідно з результатами дослідження, варіації модуля поля на обсерваторіях однаково змінюються за фазою, але розрізняються за величиною. Повна напруженість поля зростає за майже прямолінійним законом. Швидкість росту модуля поля найбільша на LVV. На прямолінійну залежність накладаються коливання з періодами ~ 11 і ~ 22 роки. Можна припустити, що такі коливання пов'язані із сонячною активністю.

Вертикальна компонента поля змінюється подібно до модуля T , але середня швидкість росту її за досліджуваний інтервал часу становила, нТл/рік: LVV — 26; ODE — 25; KIV — 24.

Зміни магнітного схилення складніші. Магнітне схилення на території України зросло і тільки в 1968—1972 рр. незначно спало. Швидкість росту схилення змінювалась. За цим параметром досліджуваний інтервал часу можна розділити на три підінтервали, в яких середня швидкість різко змінювалась. Початок змін схилення в кожному підінтервалі пов'язаний із характерними змінами горизонтальної компоненти поля.

Горизонтальна компонента поля змінювалась за квазисинусоїдальним законом. За даними обсерваторій Північної півкулі, період цієї квазисинусоїди приблизно 80 років [Sumaruk, 2001]. Геомагнітні обсерваторії України спостерігали лише частину квазисинусоїди. Мінімальні значення H -компоненти були в 1957—1959 рр., максимальне — у 1977—1979 рр. Середня швидкість збільшення H -компоненти на цьому підінтервалі часу найбільша на LVV і найменша на ODE (див. табл. 2). Саме на цьому підінтервалі часу зареєстрована найменша середня швидкість зростання D -компоненти. Фаза спаду H -компоненти розпочалась у 1981 р. і тривала до 1990 р., найбільшою була на KIV і найменшою — на LVV (на цьому підінтервалі часу розпочалось різке зростання

D -компоненти). Очевидно, що різниці в швидкостях росту H - і D -компонент на різних обсерваторіях зумовлені різною величиною телурічних струмів у підстильних поверхнях обсерваторій. Можна припустити, що ріст H -компоненти на одному інтервалі часу і спад на іншому, а також різкі зміни швидкості росту D -компоненти на тих самих підінтервалах часу пов'язані із сонячною і, відповідно, магнітною активностями, тобто спричинені зовнішніми джерелами.

Висновки. На геомагнітних обсерваторіях України варіації геомагнітного поля в усіх компонентах є синхронними, але розрізняються у деталях, оскільки підстильні поверхні під обсерваторіями є неоднаковими.

Найбільші амплітуди варіацій спостерігаються на геомагнітній обсерваторії "Львів", оскільки вона розміщена поблизу зони Тейс-сейре — Торнквіста.

Довгоперіодні варіації горизонтальної компоненти поля на всіх обсерваторіях суттєво відрізняються від варіацій вертикальної компоненти та магнітного схилення. Горизонтальна компонента змінюється за квазисинусоїдальним законом. Період квазисинусоїди близько 80 років. Українські магнітні обсерваторії спостерігали тільки її частину. Перехід квазисинусоїди через нуль відбувся в 1978—1980 рр. [Sumaruk, 2001; Sumaruk, 2007]. На квазисинусоїду накладаються коливання менших періодів, пов'язаних із сонячною активністю.

Магнітне схилення (східне) і вертикальна компонента поля зростають за весь час спостережень. Швидкість росту магнітного схилення різко змінюється. Роки таких змін збігаються з роками зміни знака швидкості спаду горизонтальної компоненти. На лінійний тренд росту D - і Z -компонент накладаються 80-річна квазисинусоїдальна варіація та короткоперіодні зміни.

Модуль вектора напруженості поля зростає за квазілінійним законом. На лінійну залежність зміни напруженості поля від часу накладались варіації, зумовлені зміною сонячної активності.

Автор щиро вдячний співробітникам геомагнітних обсерваторій "Київ", "Одеса", "Львів", відділу геомагнетизму Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за надання результатів неперервних спостережень абсолютних значень геомагнітного поля та g -ру геол. наук М.І. Орлюку за обговорення теми статті й цінні зауваження.

Список літератури

- Головков В. П., Коломийцева Г. И., Коняшенко Л. П., Семенова Г. М. Каталог среднегодовых значений элементов магнитного поля мировой сети магнитных обсерваторий. — Москва: ИЗМИРАН, 1983. — Вып. 16. — 342 с.
- Калинин Ю. Д. Вековые геомагнитные вариации. — Новосибирск: Наука, 1984. — 160 с.
- Космическая геофизика. — Москва: Мир, 1976. — 544 с.
- 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.
- Ладынин А. В., Попова А. А., Семаков Н. Н. Вековые вариации геомагнитного поля: сравнение спутниковых и наземных данных // Геология и геофизика. — 2006. — **47**, № 2. — С. 278—291.
- Максимчук В. Ю., Орлюк М. І., Трегубенко В. І., Городиський Ю. М., Мясоєдов В. П., Накалов Є. Ф. Наземна абсолютна магнітна зйомка на опорній мережі пунктів вікового ходу в Україні для епохи 2005 р. // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 5. — С. 102—116.
- Порчхигзе Ц. Д., Фельдштейн Я. И. Поле кольцевого тока на магнитном экваторе в магнитоспокойные периоды // Геомагнетизм и аэронамия. — 1978. — **18**, № 5. — С. 884—887.
- Тверской П. Н. Курс геофизики. — Москва; Ленинград; ОНТИ, 1936. — 654 с.
- Шевнин А. Д., Левитин А. Е., Громова Л. И., Дремухина Л. А., Кайнара Л. Н. Солнечная циклическая вариация в магнитных элементах обсерватории "Москва" // Геомагнетизм и аэронамия. — 2009. — **49**, № 3. — С. 315—320.
- Яновский Б. М. Земной магнетизм. — Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. — 592 с.
- Abston C. C., Papitashvili N. E., Papitashvili V. O. Combined international catalog of geomagnetic data // US NGDC Rep. UAG. — 1985. — **92**. — 291 p.
- Dremukhina L., Gromova L., Levitin A., Shevnin A., Avdeeva E. Long-term changes of geomagnetic field on IZMIRAN observatory // Proc. XXXI Ann. Semin. "Physics of auroral phenomena". — Apatity, 2008. — P. 57—60.
- Sumaruk Yu. On external sources of secular variations of the Earth's magnetic field // Contributions to Geophys. and Geod. — 2001. — **31**, № 1. — P. 353—355.
- Sumaruk Yu. On separation of the secular variations of different origins // Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. Monographic vol. — 2007. — C-99 (398). — P. 252—259.
- Mandea M. How well is the main-field secular variations know? // Contributions to Geophys. and Geod. — 2001. — **31**, № 1. — P. 233—243.
- Maus S., Luhr H. Signature of the quiet-time magnetospheric magnetic field and its electromagnetic induction in the rotating Earth // Geophys. J. Int. — 2005. — **162**. — P. 755—763.