

Особливості вікових варіацій геомагнітного поля у північній полярній частині Землі

© Ю. П. Сумарук, П. В. Сумарук, 2013

Інститут геофізики НАН України, Київ, Україна

Надійшла 15 грудня 2012 р.

Представлено членом редколегії М. І. Орлюком

Исследованы вековые вариации (ВВ) геомагнитного поля в северной полярной шапке по среднегодовым данным 13 высокоширотных магнитных обсерваторий. Выделены ВВ от внутренних и внешних источников. Показано значительное влияние солнечной и геомагнитной активности на величину ВВ разных периодов.

Secular variations of the geomagnetic field on the data of 13 high latitude magnetic observatories at north polar cap are investigated. Secular variations from internal and external sources are selected. It is shown that solar and geomagnetic activities have to a great extent influence for secular variations of different periods.

Вступ. Вікові варіації (ВВ) геомагнітного поля мають складну просторово-часову структуру. На цей час немає сумніву, що значну частину їх складають варіації від зовнішніх джерел [Калинин, 1984; Ладынин, Попова, 2008; Шевнин и др., 2009; Dremukhina et al., 2008]. Ще М. С. Бобров [Бобров, 1961] виділив три зони на поверхні Землі, в яких варіації геомагнітного поля суттєво розрізняються. Однією з таких зон є полярні шапки Землі. В полярних шапках, навіть за малих значень K_p — індексу, коли немає розвинутих магнітосферного кільцевого струму та авроральних електроструменів, а отже, і струмів затікання в полярні шапки, в денні години літнього сезону існують великі нерегулярні збурення [Бобров, 1961; Мансуров, 1969; Iwasaki, 1971; Friis-Cristensen et al., 1972; Svalgaard, 1973]. Джерело таких збурень — потужний полярний електрострум, який тече в іоносфері на геомагнітних широтах $\sim 80^\circ$ і напрямом якого залежить від знака азимутальної (B_y) компоненти міжпланетного магнітного поля (ММП) [Сумарук и др., 1974; Сумарук и др., 1992]. Електрострум чітко фіксується на денній стороні полярної шапки. Інтенсивність його зменшується в рівнодення і в зимовий сезон. Широта електроструменя може незначно змінюватися зі зміною геомагнітної активності [Сумарук и др., 1992].

На рис. 1 [Сумарук и др., 1974] стрілками показані величини варіацій. При $B_y < 0$ електрострум тече за годинниковою стрілкою

і охоплює геомагнітний полюс, а отже, веде до збільшення Z -компоненти геомагнітного поля на магнітних обсерваторіях Туле і Алерт. При $B_y > 0$ струм має протилежний напрям. Максимальної сили електрострум набуває над магнітними обсерваторіями Резолют Бей і Моуд Бей, що веде до збільшення амплітуди варіацій в горизонтальній складовій поля. В літні місяці величина збурення від полярного електроструменя може досягати перших сотень нанотесла [Сумарук, Фельдштейн, 1975].

У збурених умовах струми затікання від авроральних електроструменів значно збільшують величину варіацій в полярних шапках та їх широтний розподіл.

Крім полярного електроструменя, дія якого найкраще спостерігається у вертикальній компоненті на обсерваторіях Туле ($\Phi=87,68^\circ$), Алерт ($\Phi=86,90^\circ$) та в горизонтальній компоненті на обсерваторіях Резолют Бей ($\Phi=82,91^\circ$), Моуд Бей ($\Phi=79,88^\circ$), на величину варіацій в полярних шапках впливає також кільцевий магнітосферний струм [Сумарук и др., 1980]. Спрямований на захід, у північній полярній шапці він генерує поле, яке веде до збільшення вертикальної компоненти, а в приполярних широтах — до спаду горизонтальної компоненти поля. Отже, в роки високої сонячної і, відповідно, геомагнітної активності абсолютні значення Z більші, ніж у роки низької активності, і це має відобразитись у ВВ геомагнітного поля.

Виділення ВВ геомагнітного поля від внутрішніх джерел у полярних шапках — склад-

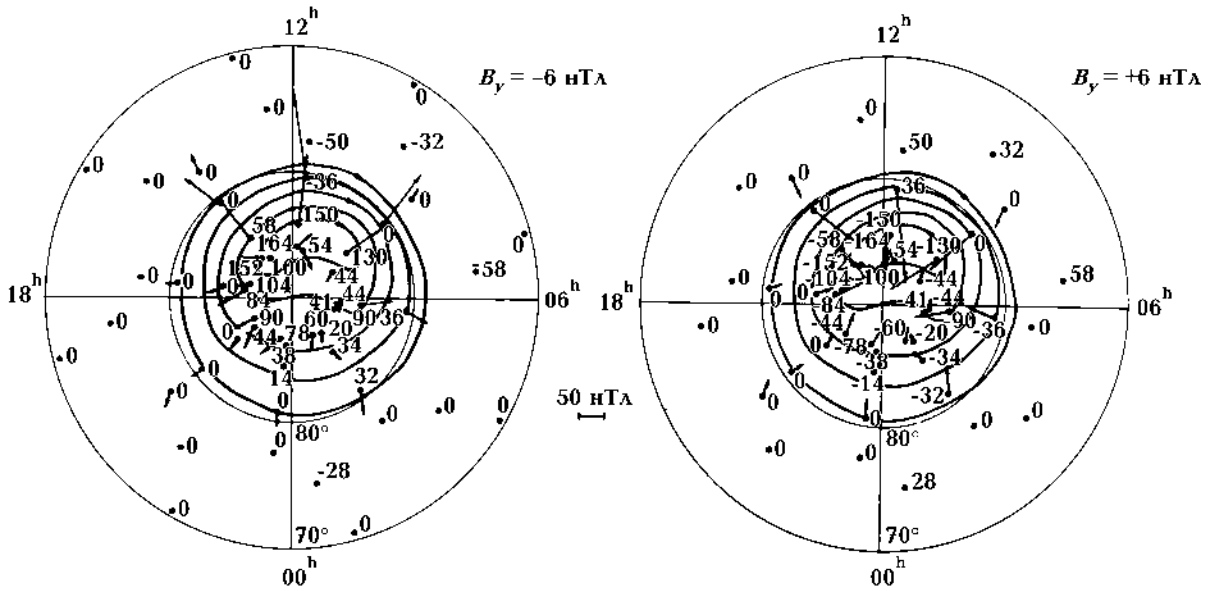


Рис. 1. Іоносферні системи струмів у північній полярній шапці при $B_y = \pm 6$ нТл.

не завдання внаслідок існування особливих іоносферних систем струмів, інтенсивність яких пов'язана з азимутальною компонентою ММП і не залежить від геомагнітної активності.

Мета статті — показати, що в північній полярній шапці Землі значна частина ВВ, які визначають як різницю між середньорічними значеннями елементів поля, генерована зовнішніми джерелами.

Використані дані. Для дослідження вибрано середньорічні значення 13 високоширотних магнітних обсерваторій з роботи [Головков и др., 1983] та з сайту geomag.bgs.ac.uk/

[gifts/annual_means.shtme](#). Геомагнітні (Φ , Λ) та географічні (ϕ , λ) координати обсерваторій подано в табл. 1, а положення в географічних координатах показано на рис. 2. Більшість обсерваторій розпочали спостереження поля у другій половині ХХ ст. (рік початку спостереження див. у табл. 1). У межах полярної шапки розміщені шість з вибраних нами обсерваторій: THU і GDH — Гренландія, ALE, RES, MBC, СВВ — Канада. Сім інших обсерваторій розташовані близько до полярної шапки.

Досліджували ВВ повної індукції (T) та у вертикальній (Z) і горизонтальній (H) складових поля (рис. 3).

Таблиця 1. Список обсерваторій, дані з яких використано в статті

Обсерваторія	ABB-код	Геомагнітні координати, град		Географічні координати, град		Рік початку спостережень	ВВ ₁ (T), нТл
		Φ	Λ	ϕ	λ		
Туле	THU	87,86	014,3	77,48	290,83	1956	10
Алерт	ALE	86,90	157,07	82,50	297,50	1961	18
Резолют Бей	RES	82,91	302,92	74,70	265,10	1953	4
Моулд Бей	MBC	79,88	264,81	76,30	240,60	1962	7
Годхавн	GDH	78,53	033,98	69,23	306,48	1926	1
Кембрідж Бей	СВВ	76,51	303,09	69,10	255,00	1972	0
Нью Алесунд	NAL	76,80	128,88	78,92	011,93	1966	36
Бейкер Лейк	BLC	73,18	322,06	64,33	263,97	1951	-17
Хейс	HIS	72,33	155,79	80,62	058,05	1934	30
Медвежий	BJN	71,34	123,39	74,50	019,20	1951	25
Нарсарсуак	NAQ	69,91	038,55	61,20	314,60	1968	0
Форт Черчілл	FCC	67,98	328,38	58,80	265,90	1957	-14
Мінук	MEA	61,58	306,22	54,62	246,67	1917	-23

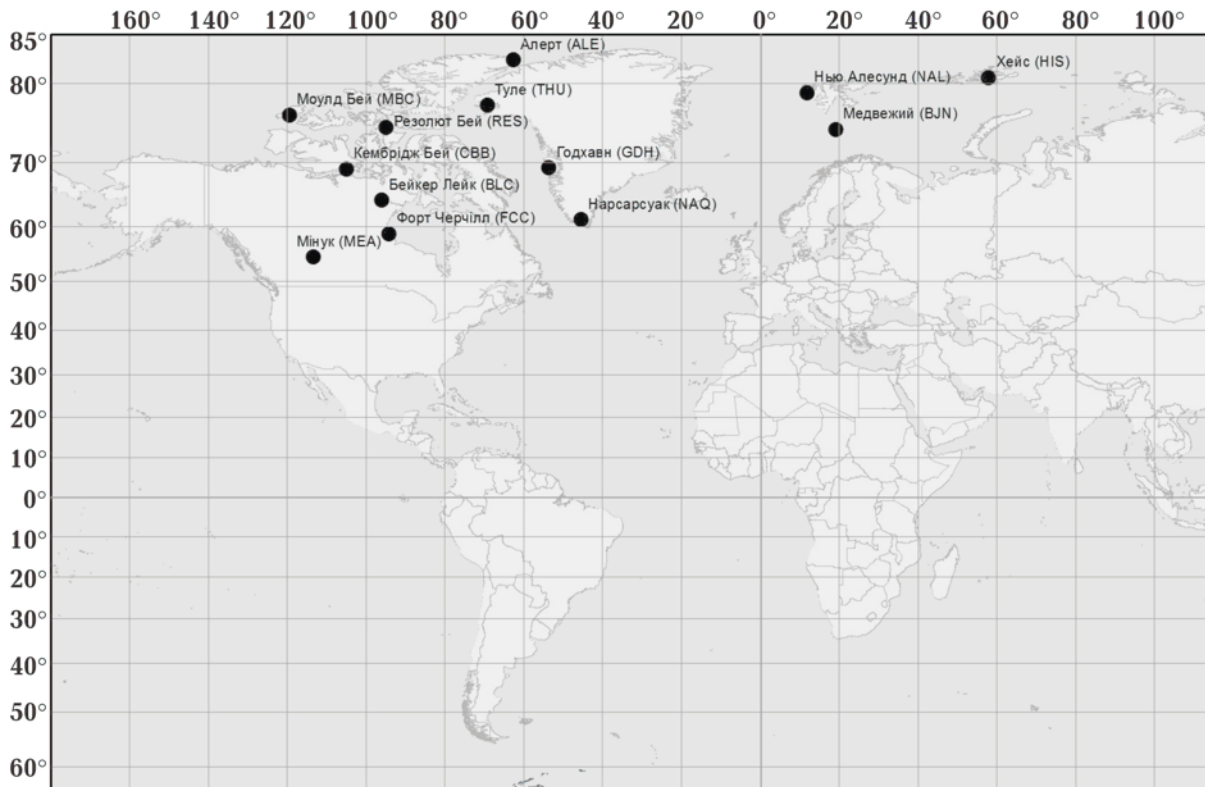


Рис. 2. Положення магнітних обсерваторій у високих широтах Північної півкулі Землі.

Результати досліджень. На рис. 4 добре видно короткоперіодні (2—4 роки), циклічні (~11 років) й довгоперіодні квазисинусоїдальні варіації. Як короткоперіодні, так і довгоперіодні варіації на всіх обсерваторіях змінюються в фазі (до 2003 р.), тобто криві $BB(T)$ приймають максимальні та мінімальні значення в одні й ті самі роки (з точністю до величини найбільшої амплітуди короткоперіодної варіації). Роки зміни знака $BB(T)$ на обсерваторіях різні, тобто криві зсунуті по осі ординат на певну величину. Для того щоб зміна знака $BB(T)$ відбулась в один і той самий рік, рівень відліку поля $BB(T)$ на більшості обсерваторій слід змінити. На обсерваторіях ALE, THU, RES, MBC, GOD, BJN, NAL, HIS рівень відліку потрібно підняти, а на обсерваторіях BLC, FCC, MEA — опустити на певну величину. Після проведення такої операції зміна знака $BB(T)$ з додатного на від'ємний відбувається в 1978 р. На обсерваторіях з довгими рядами спостережень GOD і MEA також спостерігається зміна знака $BB(T)$ з від'ємного на додатний в 1947 р. Нові рівні відліку $BB_1(T)$ показані в останньому стовпці табл. 1.

На квазисинусоїдальну варіацію $BB(T)$ накладаються циклічна та короткоперіодна ва-

ріації, які пов'язані, беззаперечно, зі зміною сонячної активності. Циклічну 11-річну варіацію можна виключити фільтром з 11-річним біжним вікном. Короткоперіодні (квазидворічні) варіації детально вивчали [Sumaruk, 2001; Ладынин, Попова, 2008]. Варіації являють собою позитивні та негативні піки, які «спотворюють» гладку довгоперіодну варіацію. Особливо великі позитивні піки $BB(T)$ спостерігалися в 1969—1970, 1989—1990, 1994, 2003 рр., що пов'язано з високою сонячною активністю, негативні піки — в 1964, 1975, 1995—1996 рр., що зумовлено низькою сонячною активністю. Слід виділити додатний пік 2003 р., який чітко спостерігається на всіх обсерваторіях полярної шапки (а також в інших широтних зонах). У 2003 р., на спаді 23-го циклу сонячної активності, відбулося декілька магнітних екстратур [Лаба та ін., 2010], під час яких D_{st} -індекс магнітної активності перевищував 400 нТл (під час великих магнітних бур $D_{st} \approx 200$ нТл). Потужний кільцевий магнітосферний струм, який розвинувся під час бур, привів до значного збільшення абсолютних значень Z (і, відповідно, T) у полярній шапці, що відобразилось як позитивний пік у $BB(T)$.

У табл. 2 наведено значення цього піку в

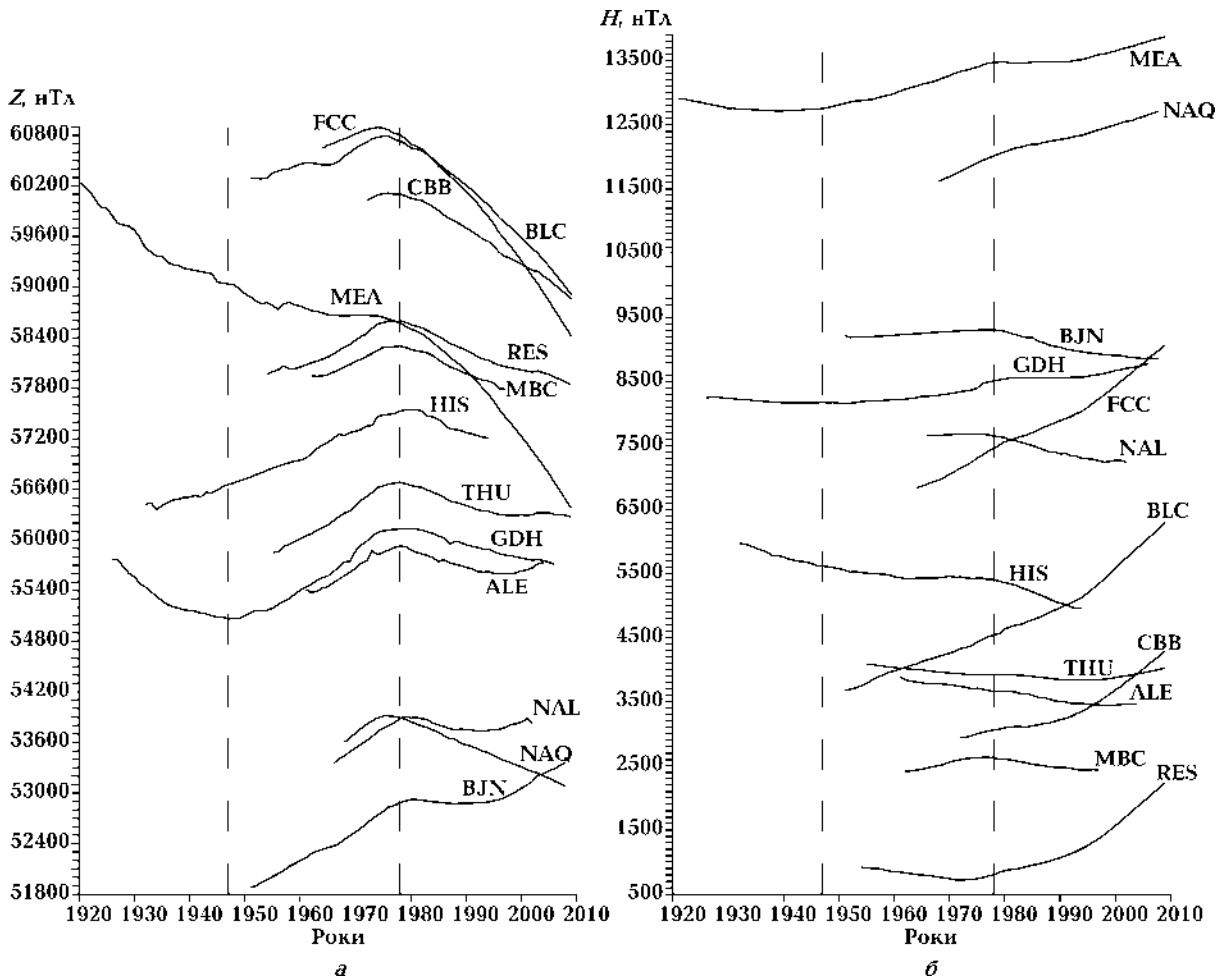


Рис. 3. Абсолютні значення Z (а) і H (б) компонент геомагнітного поля на обсерваторіях, дані яких використані в статті.

2003 р. для індукції T ($\Delta BB(T)$), вертикальної $\Delta BB(Z)$ та горизонтальної $\Delta BB(H)$ складових. Як видно, величина варіації в T (і, відповідно, в Z) спадає зі зменшенням геомагнітної широти і зростає в H . Величини варіацій від зовнішніх джерел сумірні з повною BB на певній обсер-

ваторії. Обсерваторія HIS у 2003 р. не працювала.

Слід зазначити, що чутливість $BB(T)$ до зміни сонячної та геомагнітної активності на обсерваторіях різна. Найбільша чутливість спостерігається на острівних і берегових об-

Т а б л и ц я 2. Внесок зовнішніх джерел у вікову варіацію (BB) у 2003 р.

Обсерваторія	АВВ-код	$\Delta BB(T)$, нТл	$\Delta BB(Z)$, нТл	$\Delta BB(H)$, нТл
Туле	THU	21	29	-4
Алерт	ALE	24	24	-6
Резолют Бей	RES	33	33	-5
Моулд Бей	MBC	—	—	-5
Годхавн	GDH	22	28	-17
Кембрідж Бей	СВВ	37	37	-16
Нью Алесунд	NAL	—	25	-8
Бейкер Лейк	BLC	24	21	-16
Медвежий	ВJN	23	34	-8
Нарсарсуак	NAQ	6	13	-20
Форт Черчілл	FCC	14	14	-18
Мінук	MEA	6	6	-12

серваторіях. Це явище підтверджено у статті [Ryskin, 2009].

Динаміка змін магнітної індукції. За інтервал часу від 1926 до 2009 р. у північній полярній шапці можна виокремити шість підінтервалів (табл. 3).

Динаміку змін індукції поля у північній полярній шапці можна описати так. До 1947 р. індукція поля зменшувалася $BB(T) < 0$, абсолютна величина $BB(T)$ спадала. В 1947 р. спостерігався максимум 18-го циклу сонячної активності. Після 1947 р. до 1978 р. індукція зростала і була досягнута максимальна величина, яка спостерігалася в 1968—1970 рр., тобто близько максимуму 20-го циклу сонячної активності. З 1978 до 2003 р. індукція спадала, хоча темпи цього спаду неоднакові, до 1988 р. $BB(T) < 0$, але її абсолютна величина збільшується, після 1988 р. — зменшується. Перегин $BB(T)$ спостерігається близько максимуму 22-го циклу сонячної активності. Таким чином, зміни магнітної індукції і її BB у північній полярній шапці спостерігаються в роки близько до максимумів сонячної активності або в роки максимумів.

Слід підкреслити, що в 2003 р. синхронність змін довгоперіодних варіацій індукції на обсерваторіях полярної шапки порушується, тому для інтервалу 2003—2010 рр. у табл. 3 поставлено знак запитання. На приполюсних обсерваторіях THU, RES, СВВ $BB(T) < 0$ і її абсолютна величина повільно зростає. На гренландських обсерваторіях GDH і NAQ $BB(T) < 0$ і мало змінюється, на канадських FCC, BLC, MEA $BB(T) < 0$ і абсолютна величина її різко зростає, тобто магнітна індукція зменшується. Це підтверджує результат роботи [Орлюк, Ромеєць, 2011].

Динаміка змін $BB(Z)$ і $BB(H)$. Оскільки в полярній шапці вертикальна компонента сумірна з повною напруженістю поля, слід очікувати таких самих BB . Порівняння рис. 4 і 5 показує, що $BB(Z)$ на всіх обсерваторіях в деталях

повторює $BB(T)$. В ті самі роки змінюються знаки довгоперіодних варіацій, збігаються і їх екстремуми та піки короткоперіодних варіацій.

Горизонтальна компонента в полярній шапці мала за абсолютною величиною, і BB її суттєво відмінні на обсерваторіях. Найімовірнішими джерелами їх є полярний електрострум, струми затікання з авроральної іоносфери та кільцевий магнітосферний струм [Iwasaki, 1971; Сумарук и др., 1974]. Короткоперіодні $BB(H)$ на всіх обсерваторіях переважно збігаються за фазою. Говоримо «переважно», тому що величина їх в деякі роки сумірна з допустимими помилками вимірювань. Основні піки, згадувані вище, збігаються. На кожній обсерваторії знаки короткоперіодних $BB(H)$ і $BB(Z)$ протилежні, тому можна припустити, що вони мають одні й ті самі джерела. У вертикальній компоненті короткоперіодні $BB(Z)$ значно більші за амплітудою, ніж $BB(H)$, і сумірні на всіх обсерваторіях. Отже, джерело $BB(Z)$ розміщено далеко. Очевидно, це кільцевий магнітосферний струм.

Характерною ознакою довгоперіодних $BB(H)$ є те, що вони змінюються у фазі з $BB(Z)$ на більшості обсерваторій, крім СВВ і RES, де зміна їх відбувається у протифазі.

Відомо, що $\sim 2/3$ повної варіації в горизонтальній компоненті геомагнітного поля генерується зовнішніми джерелами і тільки $1/3$ — внутрішніми. Оскільки обсерваторії RES і СВВ розташовані під полярним іоносферним електроструменем, основна частина $BB(H)$ на них генерується цим електроструменем, тобто зовнішнім джерелом.

Обговорення. Змінення напруженості магнітного поля Землі у північній полярній шапці є складним. За час, протягом якого велись спостереження поля, напруженість як збільшувалася, так і зменшувалася за величиною. Спостерігаються короткоперіодні варіації (2—4 роки), циклічні та довгоперіодні.

Т а б л и ц я 3. Динаміка магнітної індукції та $BB(T)$ за 1926—2010 рр.

Період	Роки	T	Екстремуми $BB(T)$, нТл	Абсолютні значення $ BB(T) $	Максимум сонячної активності, роки	Цикл
1	1926—1947	Зменшується	Від -80 до 0	Зменшується	1947	18
2	1947—1970	Збільшується	Від 0 до 73	Збільшується	1969	20
3	1970—1978	»	Від 73 до 1	Зменшується	1979	21
4	1978—1988	Зменшується	Від 1 до -52	Збільшується	1989	22
5	1988—2003	»	Від -52 до 8	Зменшується	2001	23
6	2003—2010	Змінне	?	Знакозмінне	—	—

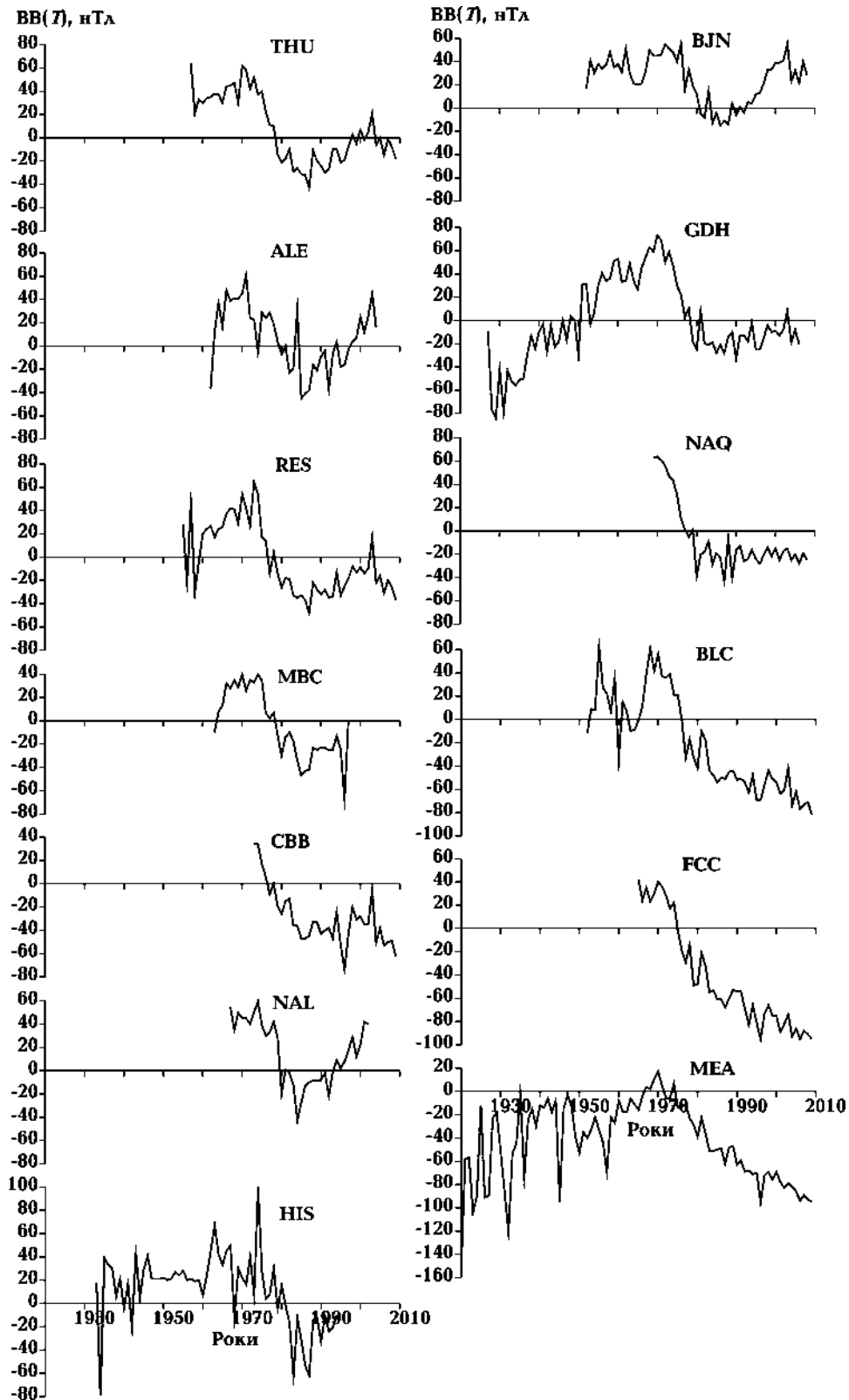


Рис. 4. Вікові варіації індукції геомагнітного поля (T) на вибраних обсерваторіях.

Основним джерелом короткоперіодних варіацій, безсумнівно, є магнітосферні та іоно-

сферні струми, величина яких змінюється залежно від сонячної активності [Sumaruk, Reda,

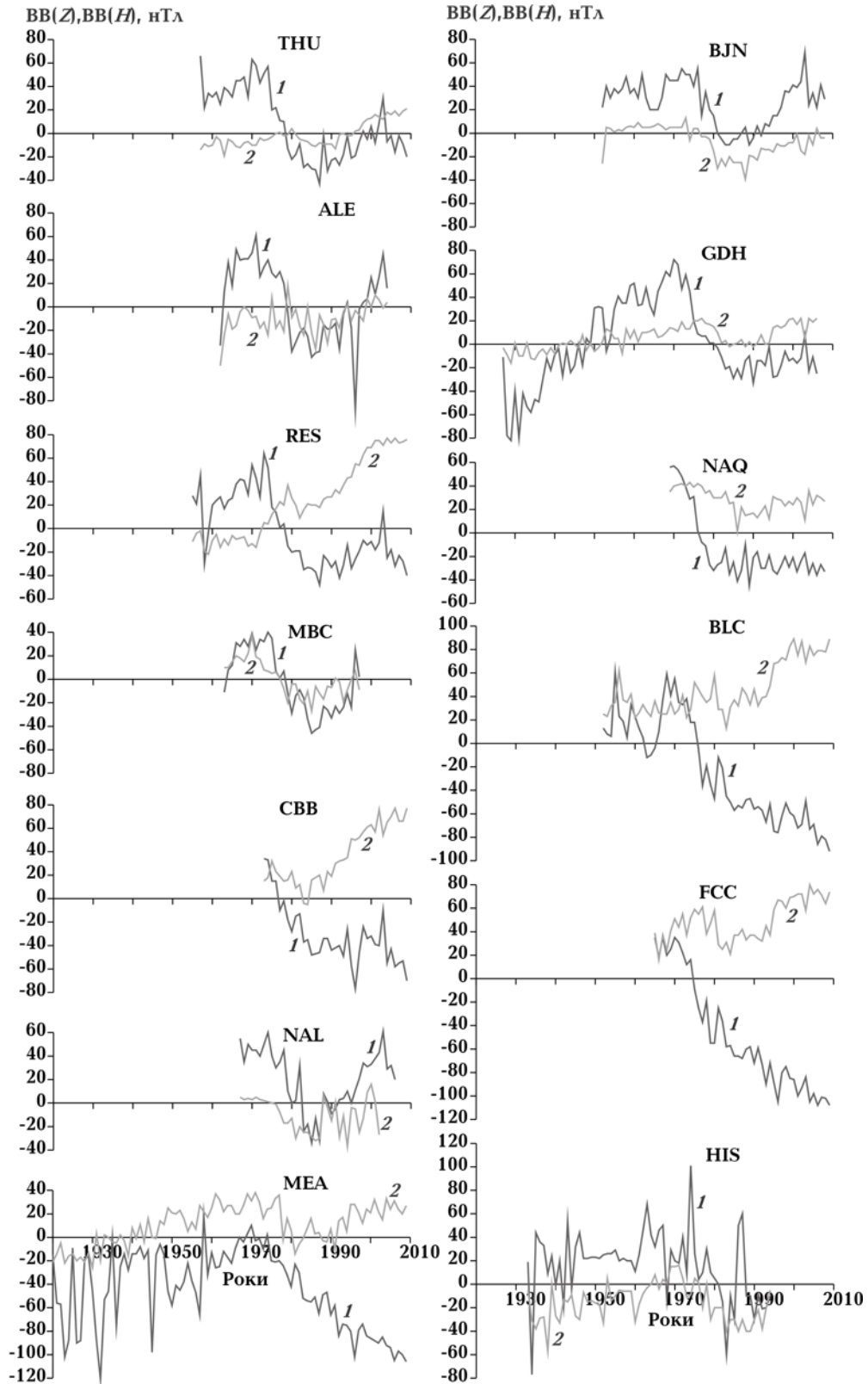


Рис. 5. Вікові варіації вертикальної (1) та горизонтальної (2) компонент на високоширотних магнітних обсерваторіях.

2011]. В літературі стверджується [Ладынин, Попова, 2008], що короткоперіодні вікові ва-

ріації мають тільки внутрішні джерела. З цієї думкою можна погодитися тільки частково.

Як показано в [Sumaruk, 2010], ВВ, обчислені за п'ятьма міжнародно-спокійними (S_q) в кожному місяці та міжнародно-збуреними (S_d) днями, збігаються за фазою, але амплітуда за S_d -днями набагато більша. Це означає, що у збурених інтервалах часу частка ВВ від зовнішніх джерел більша, ніж у спокійних інтервалах.

Синфазність довгоперіодних квазисинусоїдальних варіацій та можливість зміною рівня відліку величини ВВ(T) привести час зміни знака ВВ(T) до одного і того самого року на всіх обсерваторіях дають змогу припустити, що довгоперіодні варіації генеруються двома джерелами.

Перше джерело (внутрішнє) генерує сталу або малозмінну в часі компоненту ВВ₁(T), величину якої визначають, як різницю між зведеним та спостережуваним рівнями відліку, друге (зовнішнє) — компоненту ВВ₂(T), яка змінюється за квазисинусоїдальним законом. Величини ВВ₁(T) малі на околополюсних обсерваторіях, мають великі додатні значення на острівних обсерваторіях (HIS, BJN, NAL, ALE) і від'ємні на континентальних обсерваторіях MEA, FCC і BLC.

Як указано вище, в полярній шапці спостерігали синхронні довгоперіодні варіації. Очевидно це ВВ₂(T). Однак у подальшому синхронність порушилась, на гренландських обсерваторіях ВВ(T) < 0 і мало змінюється, а на континентальних (BLC, FCC і MEA) ВВ(T) < 0 різко зростає за абсолютною величиною. В 1978, 2003 рр., згідно з термінологією [Головков, Симонян, 1988; Manda, 2001], у ВВ спостерігали джерки, які збіглися з екстремальними явищами на Сонці. Найімовірніше, збіг років, в яких відбуваються джерки, та зміни ВВ(T), які виявлені нами в цій роботі, показують, що це одне й те саме явище.

Список літератури

- Бобров М. С. Общепланетарная картина геомагнитных возмущений корпускулярного происхождения // Солнечная активность. — 1961. — № 1. — С. 36—94.
- Головков В. П., Коломийцева Г. И., Коняшенко Л. П., Семенова Г. М. Каталог среднегодовых значений геомагнитного поля мировой сети магнитных обсерваторий. — Москва, 1983. — Вып. 16. — 342 с.
- Головков В. П., Симонян А. О. Джерки в вековых геомагнитных вариациях на интервале 1930—1980 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. — 1988. — 28, № 1. — С. 164—167.
- Калинин Ю. Д. Вековые геомагнитные вариации. — Новосибирск: Наука, 1984. — 160 с.
- Лаба І. С., Підстригач І. Я., Сумарук Ю. П., Сумарук Т. П., Сумарук П. В., Баран О. А. Надзвичайна сонячна й геомагнітна активність в жовтні — листопаді 2003 року // Журн. фіз. досліджень. — 2010. — 14, № 3. — С. 3902—3913.
- Ладынин А. В., Попова А. А. Квазипериодические

Висновки. 1. Вікові варіації геомагнітного поля у північній полярній шапці Землі мають складну просторову та часову структуру, і джерела їх розміщуються як усередині, так і зовні Землі. Співвідношення між величинами варіації від зовнішніх і внутрішніх джерел змінюються і залежать від сонячної активності. Зміна характеру вікових варіацій, тобто їх зменшення або збільшення, чи зміна знака спостерігається в максимумах сонячної активності або в близькі до них роки.

2. В полярних шапках та в близьких до них районах спостерігаються короткоперіодні (2—4 роки), циклічні та довгоперіодні вікові варіації. Визначити період довгоперіодних варіацій не можна, оскільки ряди середньорічної індукції поля та її компонент короткі.

3. Індукція поля досягла максимальної величини в 1978 р. Після цього вона зменшується, причому швидкість процесу зростає із зменшення широти обсерваторії. Процес зменшення тривав синхронно на всіх обсерваторіях до 2003 р. У подальшому синхронність змін довгоперіодних варіацій порушилась.

4. Короткоперіодні та циклічні вікові варіації змінюються у фазі на всіх обсерваторіях. Короткоперіодні ВВ(Z) та ВВ(H) змінюються у протифазі. Амплітуди короткоперіодних варіацій більші на острівних та прибережних обсерваторіях. Джерелом короткоперіодних і циклічних варіацій є іоносферні та магнітосферні струми, пов'язані із сонячною активністю.

5. Довгоперіодні вікові варіації мають джерела як зовні, так і всередині Землі. Довгоперіодна варіація від внутрішніх джерел ВВ₁ мало змінюється з часом. Величина ж її від зовнішніх джерел ВВ₂ змінюється за квазисинусоїдальним законом зі зміною сонячної активності.

- флуктуации скорости векового хода геомагнитного поля по данным мировой сети обсерваторий за 1985—2005 гг. // Геология и геофизика. — 2008. — **49**, № 12. — С. 1262—1273.
- Мансуров С. М. Новые доказательства связи между полями космического пространства и Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1969. — **9**, № 4. — С. 768—769.
- Орлюк М. І., Роменець А. О. Структура та динаміка квазіпостійного магнітного поля Землі на її поверхні та в ближньому космосі // Геодинаміка. — 2011. — **2**(11). — С. 227—229.
- Сумарук П. В., Фельдштейн Я. И. Токовые системы летнего сезона в приполюсной области // Аппаратурные и методические разработки в геофизике. — Киев:Наук. думка, 1975. — С. 75—83.
- 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.
- Сумарук П. В., Фельдштейн Я. И., Порчхигзе Ц. Д. Вариации геомагнитного поля на геомагнитных полюсах // Physica solaris terrestrius. — 1980. — № 12. — С. 70—80.
- Сумарук П. В., Фельдштейн Я. И., Шевнина Н. Ф. Вариации Z в приполюсной области в зависимости от интенсивности и знака азимутальной компоненты ММП // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1974. — **14**, № 6. — С. 1069—1079.
- 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 аэронавигация. — 2009. — **49**, № 3. — С. 315—320.
- Dremukhina L., Gromova L., Levitin A., Shevnin A., Avdeeva E. Longterm changes of geomagnetic field on IZMIRAN observatory // Proc. XXXI Ann. Seminar «Physics of auroral phenomena». — Apatity, 2008. — P. 57—60.
- Friis-Christensen E., Lassen K., Wilhelm J., Wilcox J. M., Gonsales C., Colburn D. S. Critical component of the interplanetary field responsible for large geomagnetic effects in the polar cap // J. Geophys. Res. — 1972. — **77**. — P. 3371—3375.
- Iwasaki N. Localized abnormal geomagnetic disturbance near geomagnetic pole and simultaneous ionospheric variation // Rept. Ionosph. Space Res. Japan. — 1971. — **25**. — P. 163—172.
- Mandea M. How well is the main field secular variations known? // Contributions to Geophys. and Geod. — 2001. — **31**, № 1. — P. 233—243.
- Ryskin G. Secular variation of the Earth's magnetic field: induced by the ocean flow? // New J. Physics. — 2009. — **11**. — P. 063015. — www.njp.org.
- Sumaruk Yu. P. On external sources of the Earth's magnetic field // Contribution to Geophys. and Geod. — 2001. — **31**, № 1. — P. 353—354.
- Sumaruk Yu. Secular variations at Ukrainian magnetic observatories // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 4. — С. 177—179.
- Sumaruk Yu., Reda J. Secular variations of the geomagnetic field and solar activity // Геофиз. журн. — 2011. — **33**, № 4. — С. 134—141.
- Svalgaard L. Polar cap magnetic variations and their relationship with the interplanetary magnetic sector structure // J. Geophys. Res. — 1973. — **78**. — P. 2064—2070.