

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ ІМЕНІ С. І. СУББОТІНА**

**СУМАРУК ЮРІЙ ПЕТРОВИЧ**

УДК 550.385.4.36:550.383:523.62.72

**ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ВІКОВИХ ВАРІАЦІЙ  
ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ВІД ЗОВНІШНІХ ТА ВНУТРІШНІХ ДЖЕРЕЛ**

04.00.22 – геофізика  
103 – Науки про Землю

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

**КИЇВ – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геофізики імені С.І. Субботіна НАН України.

**Науковий консультант** доктор геологічних наук, професор,  
**Орлюк Михайло Іванович**,  
завідувач відділом геомагнетизму  
Інститут геофізики імені С.І. Субботіна НАН України

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Чорногор Леонід Феоктистович**,  
завідувач кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

доктор фізико-математичних наук,  
**Міліневський Геннадій Петрович**,  
головний науковий співробітник  
фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка

доктор технічних наук,  
**Корепанов Валерій Євгенович**,  
заступник директора Львівського центру Інституту космічних досліджень НАНУ-ДКАУ

Захист відбудеться 12 травня 2021 року о 10.00 годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики імені С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, проспект Академіка Палладіна, 32.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту геофізики імені С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, проспект Академіка Палладіна, 32 та на електронному ресурсі: <http://www.igph.kiev.ua>

Автореферат розіслано 08 квітня 2021 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01  
доктор геологічних наук, професор



**Т.К. Бурахович**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Обґрунтування вибору теми дослідження.* Магнітне поле Землі має складну просторово-часову структуру, яка визначається внутрішніми та зовнішніми джерелами. Згідно з дослідженнями, більша частина геомагнітного поля зумовлена джерелами всередині Землі. Тому існує декілька моделей його походження: магнітного динамо, кінематико-гравітаційна модель Кочнева, ротаційна модель Тяпкіна та ін. Однією з найбільш вживаних є модель гідромагнітного динамо, яка найкраще узгоджується з експериментальними даними. Зовнішні джерела геомагнітного поля зумовлені складними процесами в магнітосфері та іоносфері Землі та впливом сонячної активності. Виділення вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх і внутрішніх джерел дозволить більш обґрунтовано тлумачити природу головного магнітного поля Землі та сонячно-земних зв'язків.

Геомагнітне поле неперервно змінюється як в просторі, так і в часі. Часовий спектр змін надзвичайно широкий – від мілісекунд до мільйонів років. Варіації з періодами, близькими до 100 років, дістали назву вікових. Природа вікових варіацій (ВВ) до сьогоднішнього дня є дискусійною, але незважаючи на це, вікові варіації є одним з небагатьох інструментів, які дають змогу вивчати механізм генерації поля та його динаміку. В силу адитивності магнітних полів від різних джерел, на поверхні Землі спостерігаються зашумлені вікові варіації головного магнітного поля Землі (ГМПЗ).

Вікові варіації геомагнітного поля мають складну просторово-часову структуру. Згідно з низкою публікацій, на теперішній час значну частину їх складають варіації від зовнішніх джерел (Калинин, 1984; Ладынин, Попова, 2008; Шевнин и др., 2009).

Розділення вікових варіацій від зовнішніх та внутрішніх джерел має важливе значення, оскільки дозволяє виділити вікові варіації від внутрішніх джерел в чистому вигляді і, таким чином, покращити розуміння механізмів генерації головного магнітного поля Землі.

Найперспективнішим способом такого розділення є побудова моделей джерел варіацій. При моделюванні процесу необхідно дотримуватися принципу подібності, що означає повторення в моделі деякого процесу або його характерних рис. Якщо кількість знань про досліджуваний об'єкт достатня, то можна скласти рівняння чи систему рівнянь, яке описує явище, і за відомими параметрами, які в нього входять, а також граничними і початковими умовами визначити кількісні критерії принципу подібності.

Для опису просторової структури головного магнітного поля Землі існує ряд моделей IGRF (Maus et al., 2005; Macmillan, Maus, 2005; Finlay et al., 2010), які представляють поле у вигляді коефіцієнтів розкладу за сферичними гармоніками для конкретної епохи. Регулярні вікові варіації головного магнітного поля Землі, які є неоднорідними в просторі, вимагають побудови таких моделей кожного року.

В даний час маємо величезні масиви даних як про часові варіації геомагнітного поля в різних точках Землі, так і про магнітні поля зовнішніх джерел (сонячний вітер, магнітосферні та іоносферні струми). Крім того, значних успіхів було

досягнуто в інших науках про Землю (геології, тектоніці, геотерміці, палеомагнітології, сейсмології, гравіметрії та ін.), тому аналіз і синтез їх результатів сумісно з даними магнітології можуть значно покращити наше розуміння природи геомагнітного поля та його варіацій.

При вираховуванні величини вікових варіацій користуються середньорічними значеннями компонент геомагнітного поля, одержаними на магнітних обсерваторіях світової мережі. Немає сумніву, що в середньорічні значення включені величини поля як від внутрішніх, так і від зовнішніх джерел.

Донедавна вклад компонент від зовнішніх джерел не враховували, припускаючи, що усереднення іррегулярних варіацій за інтервал часу тривалістю в рік веде до виключення цієї компоненти. Як показали роботи останніх десятиліть, такого спрощення робити не можна. Визначення швидкості зміни головного магнітного поля Землі за геомагнітними вимірюваннями без врахування впливу варіацій, зв'язаних з магнітосферно-іоносферними системами струмів, інтенсивність яких залежить від сонячної хвильової та корпускулярної активності, веде до неправильної оцінки динаміки земного диполя.

Дана робота має важливе науково-прикладне значення, адже на основі нової методики розділення вікових варіацій від зовнішніх і внутрішніх джерел дасть можливість покращити вже існуючі моделі магнітосфери та іоносфери, що в свою чергу дозволить науковцям покращити моделі джерел головного магнітного поля Землі.

*Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.* Робота виконана на базі відділу геомагнетизму Інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України за такими науковими темами: «Дослідження зв'язку геомагнітного поля з кліматом і довготривалими змінами оточуючого середовища» (1998–2002), № держ. реєстрації 0198U000211; Динаміка геомагнітних варіацій, її відображення в процесах атмосферної циркуляції та зв'язок з еволюцією геосфер Землі (2003 - 2008), № держ. реєстрації 0103U000389; Динаміка і моделі геомагнітного поля за результатами інструментальних спостережень і палеомагнітних досліджень (2009 - 2014), № держ. реєстрації 0109U000102; «Літосферні і зовнішні джерела геомагнітного поля території України: проблеми геологічної еволюції земної кори, рудо- та нафтогазоносності і екологічного стану довкілля» (2013–2017) № держ. реєстрації 0113U000344; «Інформативність магнітних моделей різновікових тектонотипів мантийно-корових структур для вирішення задач геодинаміки та прогнозування корисних копалин території України» (2018–2022), № держ. реєстрації 0118U000013.

*Мета і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження.* Метою роботи було дослідження просторово-часового розподілу вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх і внутрішніх джерел та оцінка вкладу цих джерел в залежності від параметрів сонячної та геомагнітної активності.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

1) дослідити просторово-часові зміни вікових варіацій геомагнітного поля під впливом зовнішніх і внутрішніх джерел;

- 2) розробити методику розділення вікових варіацій від зовнішніх і внутрішніх джерел;
- 3) оцінити вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля залежно від збуреності магнітного поля;
- 4) дослідити залежність вікових варіацій геомагнітного поля від сонячної і геомагнітної активності;
- 5) дослідити геомагнітну активність та енергетику магнітосфери в останніх циклах сонячної активності;
- 6) дослідити просторово-часову структуру геомагнітного поля території України та оцінити вклад зовнішніх і внутрішніх джерел у вікову варіацію за даними українських геомагнітних обсерваторій.

*Об'єкт дослідження* – магнітне поле Землі та навколоземне середовище.

*Предмет дослідження* – вікові варіації геомагнітного поля та сонячно-земні зв'язки.

*Методи дослідження та достовірність і обґрунтованість отриманих результатів і висновків.* Дослідження просторово-часового розподілу вікових варіацій геомагнітного поля під впливом зовнішніх та внутрішніх джерел здійснювались за допомогою статистичних аналізів і математичних розрахунків з використанням даних геомагнітних обсерваторій України та світової мережі INTERMAGNET, а також даних міжнародних центрів даних по сонячно-земній фізиці, що дало змогу з максимальною достовірністю оцінити вклад зовнішніх джерел.

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів і висновків забезпечується застосуванням статистичних та строгих математичних розрахунків при використанні даних світових геомагнітних обсерваторій і міжнародних центрів по сонячно-земній фізиці.

*Наукова новизна отриманих результатів.*

1. Досліджено просторово-часовий розподіл вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх та внутрішніх джерел на різних широтах земної поверхні. Показано, що в високих широтах Землі вікові варіації більше відображаються у вертикальній складовій, а в низьких широтах – у горизонтальній складовій геомагнітного поля. Вікові варіації на всіх широтах мають дві компоненти: одна пов'язана з внутрішніми джерелами, інша - із зовнішніми.
2. Розроблено методику розділення вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх і внутрішніх джерел за допомогою довгих рядів спостережень на геомагнітних обсерваторіях розміщених на різних широтах.
3. Зроблено оцінку вкладу зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля. Вперше показано, що величина вкладу залежить від збуреності геомагнітного поля. В збурені дні величина вкладу у вікову варіацію геомагнітного поля співрозмірна з величиною вікової варіації.
4. Вперше пораховано вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля за даними геомагнітних обсерваторій України. Показано, що величина вкладу

залежить від геомагнітної активності. У збурені роки амплітуда змін вікових варіацій зростає в 1,5 - 2 рази.

5. Впроваджено нові методи вимірювання й обробки даних на геомагнітних обсерваторіях «Львів», «Київ», «Одеса». Розроблено нові програми для первинної обробки та online відправки даних в форматі INTERMAGNET до міжнародних центрів даних.

6. Розроблено новий метод усунення завад при реєстрації складових геомагнітного поля на обсерваторії, що створюються електрифікованими постійним струмом залізницями.

*Практичне значення отриманих результатів.*

Запропонована нова методика розділення впливу зовнішніх і внутрішніх джерел на вікові варіації геомагнітного поля дасть змогу значно покращити вже існуючі моделі магнітосфери та іоносфери, адже в ній використовуються точні дані з геомагнітних обсерваторій світу. Це в свою чергу дозволить науковцям покращити моделі джерел головного магнітного поля Землі.

Дослідження довготривалих змін геомагнітного поля за даними спостережень на магнітних обсерваторіях світу дозволить розглянути динаміку змін геомагнітного поля і дати прогноз на майбутнє. Адже, як показано в дисертаційній роботі, після 50-х років ХХ століття спостерігається різке зменшення геомагнітної активності, пов'язане зі зменшенням величини великомасштабного магнітного поля Сонця й наближенням до мінімуму 200-літнього циклу сонячної активності. Зменшення сонячної і геомагнітної активності призводить до аномальних змін метеорологічних процесів у земній атмосфері.

Отримані сертифікати INTERMAGNET для геомагнітних обсерваторій «Львів» та «Київ» підтверджують повноправне членство цих обсерваторій у світовій мережі й вказує на їх високий рівень. Дані з українських геомагнітних обсерваторій використовуються науковцями всього світу для вирішення фундаментальних і прикладних задач, а саме: для розробки моделей IGRF, побудови карт магнітного схилення (D), які використовуються для потреб морського та повітряного сполучення, карт вертикальної компоненти (Z) і модуля (T), а точніше їх аномалій, які пов'язані з покладами мінеральної сировини, а також в видобувній промисловості.

*Особистий внесок здобувача.* Основні наукові результати та висновки, викладені в дисертаційній роботі, одержані автором особисто та опубліковані в журналах, які входять до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з фізико-математичних наук та в престижних загальнонавчаних геофізичних журналах за кордоном. За темою дисертації автором опубліковано 62 наукові праці: 37 статей (11 входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science), з них 9 – без співавторів та 25 тез доповідей на українських та міжнародних наукових конференціях та нарадах.

Безпосередньо автором здійснено:

1) вперше розроблено й впроваджено нову методику розділення вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх і внутрішніх джерел за допомогою аналізу

довгих рядів спостережень магнітних обсерваторій, розміщених на різних широтах;

2) проведено аналіз довготривалих змін компонент повного вектора напруженості геомагнітного поля за даними спостережень на магнітних обсерваторіях України;

3) досліджено вікові варіації геомагнітного поля за даними геомагнітних обсерваторій України «Львів», «Київ», «Одеса» по всіх, збурених і спокійних днях;

4) продемонстровано залежність геомагнітної активності від змін секторної структури міжпланетного магнітного поля за даними геомагнітних обсерваторій;

5) досліджено залежність варіацій геомагнітного поля від початкового стану магнітосферно-іоносферної системи струмів у фазу розвитку великої магнітної бурі;

6) розроблено методику діагностики азимутальної компоненти міжпланетного магнітного поля за даними антарктичної магнітної обсерваторії;

7) впроваджено нові методи вимірювання та обробки даних на геомагнітних обсерваторіях «Львів», «Київ», «Одеса». Розроблено програми для первинної обробки та online відправки даних у форматі INTERMAGNET до міжнародних центрів даних.

Особистий внесок в наукових працях, написаних в співавторстві наступний. В роботі [Semenov et al., 2003], мета якої вивчення провідності мантії Землі в регіоні Центральної Європи, автором проведено роботи по обслуговуванню магнітоваріаційної апаратури, збору та обробки даних з цієї апаратури. В роботах [Сумарук, Сумарук, 2004, 2005, 2006], в яких досліджується рівень відліку поля нерегулярних магнітних варіацій, джерела  $S_q$ -варіацій магнітного поля в середніх широтах, енергетика магнітосфери на різних рівнях сонячної та магнітної активності, автором опрацьована спеціалізована фахова література, зібрано, досліджено та систематизовано дані з міжнародних центрів даних, прийнята участь в побудові графіків та отриманні рівнянь регресії, а також в інтерпретації отриманих результатів. В роботі [Сумарук, Сумарук, 2007], в якій досліджується динаміка змін клімату в залежності від сонячної активності, автором порахована і проілюстрована динаміка змін геомагнітної активності, що виражається добовою сумою K-індексів, з використанням даних геомагнітної обсерваторії «Львів». Здійснено обробку збуреності геомагнітного поля на цій обсерваторії в період спокійного і збуреного поля. В роботі [Сумарук та ін., 2009], в якій приведений історичний огляд спостережень на геомагнітній обсерваторії «Львів», автором опрацьовано літературу, архівні матеріали, а також описано технічні характеристики приладів і методика обробки даних на геомагнітній обсерваторії «Львів» з часу її заснування до сьогодення. В роботі [Лаба та ін., 2010] вивчено вплив інтенсивності спалахового енерговиділення на магнітосферу Землі. Автором зібрано та опрацьовано матеріали з геомагнітної обсерваторії та міжнародних центрів даних. Вираховано вклад магнітосферних струмів під час потужних магнітних бур в 2003 році. Проаналізована залежність геомагнітної активності, пов'язаної з подіями на Сонці в цей період. В роботі [Sumaruk, Reda, 2011], в якій досліджено залежність вікових

варіацій геомагнітного поля від сонячної активності, автором оброблено дані з середньоширотних геомагнітних обсерваторій. Отримано рівняння регресії залежності вікових варіацій на сусідніх обсерваторіях. В роботі [Sumaruk et al., 2011] описано шлях розвитку спостережень на українських геомагнітних обсерваторіях з моменту заснування, автором зроблено опис апаратури, що працювала на обсерваторіях, а також описано методика абсолютних й варіаційних спостережень і обробки даних. В роботі [Семенов и др., 2011] автором опрацьовано літературу по цій статті та прийнято участь в дискусії по даному питанню. В роботах [Orliuk et al., 2012; Орлюк та ін., 2012], в яких досліджується просторово-часова структура геомагнітного поля України, автором запропонована й реалізована методика розділення варіацій від зовнішніх та внутрішніх джерел. Пораховано вклад у варіацію геомагнітного поля від магнітосферних та іоносферних джерел. В роботі [Сумарук та ін., 2012], в якій досліджується геомагнітна активність та енергетика магнітосфери у 19-24 циклах сонячної активності автором опрацьовано матеріали з міжнародних центрів по сонячно-земних зв'язках. Пораховано кількість енергії, що поступила в магнітосферу із сонячного вітру за 19-24 цикли сонячної активності. В роботі [Neska et al., 2013], в якій досліджується вплив електрифікованих залізниць на роботу геомагнітних обсерваторій, автором опрацьовано літературу та підготовлено дані з геомагнітної обсерваторії. Запропоновано метод усунення завад при реєстрації складових геомагнітного поля на обсерваторії, що створюються електрифікованими постійним струмом залізницями. Автор також приймав участь у дискусійних нарадах при написанні цієї статті. В роботі [Сумарук, Сумарук, 2013а], в якій досліджено вікові варіації в північній полярній шапці, автором опрацьовано дані високоширотних обсерваторій. Виділені вікові варіації від внутрішніх і зовнішніх джерел. В роботі [Сумарук, Сумарук, 2013б], в якій досліджено вікові варіації магнітного поля в полярних шапках Землі автором показано, що вікові варіації генеруються внутрішніми і зовнішніми джерелами. Показано, що величина вікових варіацій від зовнішніх джерел залежить від сонячної та геомагнітної активності та змінюється циклічно. В роботі [Сумарук, Сумарук, 2013в] досліджується вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля, автором запропонована і реалізована методика розрахунку вкладу зовнішніх джерел у вікову варіацію. В роботі [Орлюк та ін., 2014], в якій досліджено вклад індукційних струмів в вікову варіацію за даними українських обсерваторій, автором опрацьовано дані з геомагнітних обсерваторій України. Пораховано й представлено в графічному вигляді вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію. Прийнято участь в інтерпретації результатів досліджень. В роботі [Гвишиани и др., 2015], в якій досліджено зменшення геомагнітної і сонячної активності, автором опрацьовано літературу та дані з геомагнітних обсерваторій і міжнародних центрів даних. Показано, що з часом геомагнітна та сонячна активність зменшуються. Проаналізовано можливі причини цього зменшення. В роботах [Сумарук, Сумарук, 2016а; Orliuk et al., 2018], в яких досліджено часові зміни вікових варіацій геомагнітного поля в Європі, автором опрацьовано дані європейських геомагнітних обсерваторій. Побудовано графіки просторово-часових змін вікових варіацій на цих обсерваторіях. В роботі [Сумарук, Сумарук, 2016б], в



якій досліджено вікові варіації геомагнітного поля в Антарктиді, автором опрацьовані дані з геомагнітних обсерваторій, розміщених в Антарктиді, а також дані, що характеризують сонячну активність. Зроблено висновок, що вікові варіації в Антарктиді генеруються кількома джерелами, які розміщені всередині Землі, в корі та зовнішньому середовищі. В роботі [Сумарук та ін., 2016], в якій досліджено динаміку вікових варіацій геомагнітного поля з часом, автором на основі обробки даних з геомагнітних обсерваторій знайдено опорні роки, коли вікові варіації змінюють знак або змінюється швидкість зміни величини варіацій. Показано, що опорні роки спостерігаються в роки екстремумів сонячної активності і співпадають з роками джерків у вікових варіаціях. В роботі [Сумарук, Сумарук, 2017] досліджено вікові варіації геомагнітного поля на Африканській тектонічній плиті. Автором на основі обробки даних з геомагнітних обсерваторій проаналізовано часовий спектр вікових варіацій. Показано, що вікові варіації мають короткоперіодну і довгоперіодну складові. В роботі [Neska et al., 2018] автором опрацьовано дані з українських геомагнітних обсерваторій та прийнято участь в дискусії по тематиці даної статті. В роботі [Sobitnyak et al., 2018], в якій досліджено магнітні бурі в районі одеської магнітної аномалії, автором опрацьовано дані з геомагнітної обсерваторії «Одеса» та прийнято участь в обговоренні при написанні цієї статті. В роботах [Сумарук та ін., 2019а, б], в яких проведено моделювання регіонального магнітного поля, автором опрацьовано літературу по цьому питанню. Прийнято участь в постановці та розв'язку даної задачі. Зібрано й опрацьовано дані з Європейських геомагнітних обсерваторій. Проінтерпретовано отримані результати.

*Апробація результатів дисертації.* Основні результати дисертаційної роботи були представлені на міжнародних і регіональних конференціях та семінарах у формі усних та стендових доповідей: Workshop on repeat magnetic stations, 2003 (Niemegk, Germany); XIIth IAGA Workshop on geomagnetic observatory instruments, data Acquisition and Processing, 2006 (Belsk, Poland); 8-ма, 10-та, 11-та і 12-та Українські конференції по космічним дослідженням 2007–2012 рр. (Євпаторія); 3<sup>rd</sup> anniversary Symposium GeObMag «Surlary national geomagnetic observatory «Liviu Constantinescu» 65 years of continuous work», 2008 (Bucharest, Romania); 11th IAGA Scientific Assembly, 2009 (Sopron, Hungary); Международная конференция «Искусственный интеллект в изучении магнитного поля Земли. Российский сегмент INTERMAGNET», 2011 (Углич, Россия); 5<sup>th</sup> MagNetE Workshop on European geomagnetic repeat station survey 2009–2010 (Rome, Italy); XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, 2012 (Cádiz, Spain); 12<sup>th</sup> Odessa International Astronomical Gamow Conference-School “Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-Astronomy and Astrobiology”, 2012 (Одеса); 23<sup>rd</sup> International CODATA Conference “Open Data & Information For A Changing Planet”, 2012 (Taipei, Taiwan); Partnership conference “Geophysical observatories, multifunctional GIS and data mining”, 2013 (Kaluga, Russia); V Міжнародна наукова конференція «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища», 2013 (Львів); 14-та українська конференція з космічних досліджень, 2014 (Ужгород); 15-та, 16-та, 18-та українська конференція з космічних досліджень, 2015, 2016, 2017 (Одеса); XVIIth

IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data acquisition and Processing 2016 (Dourbes, Belgium); XVIII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data acquisition and Processing, 2018 (Conrad Observatory of the Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Austria); 18-та українська конференція з космічних досліджень, 2018 (Київ); 20<sup>th</sup> Gamow Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology”, 2020 (Odessa, Ukraine).

*Структура і обсяг дисертації.* Дисертаційна робота викладена на 326 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 5 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 274 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 30 таблицями та 110 рисунками. Список використаних джерел містить 455 найменувань.

*Подяки.* Дисертація виконана в відділі геомагнетизму Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Автор дисертаційної роботи висловлює щире подяку науковому консультанту доктору геологічних наук, професору Михайлу Івановичу Орлюку за консультації та поради, спільні дослідження та підтримку при виконанні роботи. Дисертант щиро вдячний академіку НАН України, доктору фіз.-мат. наук, професору В.І. Старостенко і старшому науковому співробітнику канд. фіз.-мат. наук О.В. Легостаєвій за їх підтримку в реалізації міжнародних проектів і договорів, завдяки яким геомагнітні обсерваторії України ввійшли до мережі INTERMAGNET. Автор вдячний співробітникам відділу геомагнетизму та геомагнітної обсерваторії «Львів» Інституту геофізики за поради та підтримку при написанні даної роботи. Нарешті, автор глибоко вдячний батькам, дружині, дітям і внукам за їх терпіння і всебічну підтримку.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено загальну характеристику роботи, обґрунтовано доцільність обраного напрямку та актуальність дисертації, сформульовано мету роботи, завдання, наукову проблему, які треба було вирішити, і методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, сформульовано основні наукові та практичні досягнення здобувача, а також подано інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами Інституту, апробації одержаних результатів, публікацій, структури та обсягу роботи.

У **першому розділі «Стан проблеми»** описано головні моделі та механізми генерації головного магнітного поля Землі. Показано, що на сьогоднішній день не існує моделі, яка б точно описувала головне магнітне поле Землі. Всі вони базуються на певних припущеннях і допущах. Наведено головні методи виділення та аналізу вікових варіацій та їхній спектр. Приведено механізми генерації вікових варіацій. Детально розглянуто зовнішні джерела вікових варіацій до яких відносяться: динамо-струми в іоносфері, екваторіальний іоносферний

електрострумінь, кільцевий магнітосферний струм, струми в хвості магнітосфери, авроральні електрострумені та полярний іоносферний електрострумінь.

На сьогоднішній день найуживанішою моделлю є *аналітична модель*. Згідно з цією моделлю напруженість магнітного поля  $H_T$ , можна представити як:

$$H_T = H_o + H_m + H_a + H_e + \delta H,$$

де  $H_o$  – поле однорідного намагнічування Землі;  $H_m$  – поле, створене джерелами, які пов'язані з неоднорідністю будови внутрішніх шарів Землі,  $H_a$  – поле, створене намагніченістю земної кори;  $H_e$  – поле від зовнішніх джерел;  $\delta H$  – поле варіацій. Суму полів  $H_o + H_m + H_e$  називають нормальним полем.

Представлення поля в аналітичному виді є зручним при розв'язанні великої кількості задач, пов'язаних з дослідженням зовнішнього поля, задач навігації й орієнтації, виділенні тренда (дослідження аномалій, обумовлених коровими джерелами).

*Модель IGRF* - це серія математичних моделей, які описують головне магнітне поле Землі і його вікові варіації. Вони базуються на сферичному гармонічному аналізі. Для точок, які знаходяться на поверхні Землі

$$U = R \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (g_n^m \cdot \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta),$$

де  $R$  – радіус Землі, а  $P_n^m(\cos \theta)$  – приєднані поліноми Лежандра  $n$ -го степеня і  $m$ -го порядку ( $n \geq 1$ ,  $m \leq n$ );  $\lambda$  – довгота відрахована від Грінвічського меридіану;  $\theta$  – коширота,  $N$  – номер моделі.

З багатьох гіпотез, які висувались для пояснення природи геомагнітного поля, тільки гіпотеза *самозбуджуючого динамо* витримала всі випробування і немає протиріч з нагромадженими до цього часу експериментальними даними. Походження квазістаціонарного великомасштабного магнітного поля Землі пояснюють дією гідромагнітного динамо в рідкому ядрі. Теорія гідромагнітного динамо є тривимірною задачею, і рівняння, які треба розв'язувати, є нелінійними в частинних похідних.

В *ротаційному механізмі* К.Ф. Тяпкіна джерелами електричних струмів є електричні заряди, які виникають на двох внутрішніх границях Землі: на границі внутрішнього ядра з зовнішнім (шар F в моделі Буллена), та на границі зовнішнього ядра з мантиєю. Розділення зарядів може відбуватись за рахунок дифузії або тепломасопереносу. При цьому утворюється подвійний електричний шар. Переміщення обкладинок такого подвійного шару веде до виникнення електричного струму.

В *кінематико-гравітаційній моделі* генерації магнітного поля Землі, запропонованій В.О. Кочневим, магнітне поле створює струм, який є вихровим рухом позитивно зарядженої плазми зовнішнього ядра планети. Основними генераторами руху плазми є осьове обертання планети і горизонтальні складові гравітаційного поля Місяця і Сонця, які створюють в ядрі глибинні течії іонізованої рідини.

*Західний дрейф* пояснюється різницею в швидкостях обертання ядра й оболонки Землі, внаслідок чого поверхня ядра випереджає оболонку Землі.

Західний дрейф геомагнітного поля першим побачив ще в кінці XVII століття англійський геофізик і астроном Едмунд Галлей. Треба зазначити, що західний дрейф геомагнітного поля і західний дрейф поля вікових варіацій – це не одне і теж саме.

Деякі автори в якості джерел вікових варіацій розглядають диполі, які описуються шістьма параметрами, а за вихідні дані взято компоненти геомагнітного поля, вчислені за IGRF коефіцієнтами для конкретної епохи. Параметри диполів наступні: коширота, довгота, відстань від центру Землі, а також величина магнітного моменту і два кути, які визначають орієнтацію вектора в просторі.

*Метод ієрархічної дипольної моделі*, безумовно, цікавий, але як і в будь-якій «оберненій задачі» геофізики спроби інтерпретувати особливості геомагнітного поля в термінах якого-небудь гіпотетичного типу руху рідини в ядрі наштовхуються на фундаментальні математичні труднощі, які пов'язані з неоднозначністю будь-якого частинного рішення.

Одним з найчастіше вживаних є *графічний метод*. На карту певного масштабу наносяться значення вікового ходу усередненого (або не усередненого для одного року) для певної епохи і сполучаються лініями однакої значення вікових варіацій. Лінії однакового значення вікових варіацій називаються ізопорами. Ізопори та фокуси вікового ходу геомагнітних елементів є результатом статистичної обробки усереднених середньорічних значень поля.

В останнє десятиріччя для об'єктів, які мають складну просторово-часову еволюцію (до яких відносяться і вікові варіації) застосовують *вейвлет-аналіз*. Основна ідея вейвлет-аналізу полягає в розкладі досліджуваної функції за системою базисних функцій, які мають спеціальні властивості, зокрема добру локалізацію в часовій області. Аналіз дає змогу одержувати інформацію про особливості варіацій часових рядів, яка описує еволюцію процесів. Вейвлет-аналіз добре доповнює аналіз Фур'є і їх доцільно застосовувати одночасно.

*Спектр вікових варіацій* має три полоси коливань: основне коливання з періодом  $8 \cdot 10^3$  років; коливання сусідніх частот з періодом  $\sim 10^3$  років; коливання з періодами  $\sim 10^2$  років і більш короткими. На поверхні Землі реєструються варіації від внутрішніх джерел з періодами більше 10 років. Варіації з меншими періодами загасають завдяки високій електропровідності мантії. Вікові варіації геомагнітного поля мають такі характерні періоди: 10000, 1800, 1200, 600, 360, 60, 30, 20 і 10 років.

Для пояснення генерації вікових варіацій пропонують декілька механізмів. Глобальні варіації зв'язують з крутильними коливаннями в ядрі (Брагинский, 1970а, б; 1982), а локальні – з нестійкостями в пограничному шарі на границі ядро–мантія (Брагинский, Фишман, 1987). В роботі (Рузмайкин и др., 1989) пропонується механізм генерації вікових варіацій, пов'язаний з дією флуктуаційного турбулентного динамо в зовнішньому ядрі Землі. Суть механізму полягає в тому, що в рідкому ядрі внаслідок турбулентної конвекції генеруються дрібномасштабні флуктуаційні магнітні поля, які мають властивості подібні до властивостей вікових варіацій.

В статті професора Г. Рискіна (Ryskin, 2009) пропонується новий механізм генерації вікових варіацій. У розчині, який є провідником електрики і рухається в магнітному полі, індукується струм, який генерує додаткове магнітне поле. Океанічна вода є провідником ( $\sigma=3,2 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$ ). Магнітне поле, яке індукується в океані за рахунок його течій в магнітному полі Землі, залежить від часу і може бути представлено як вікові варіації.

Геомагнітне збурення  $D$  на Землі можна представити як суму збурень від різних джерел:

$$D = S_q + S_q' + DR + DRP + DP + DCF + DT + DPC,$$

де  $S_q$  – спокійна сонячно-добова варіація;  $S_q'$  – варіація від екваторіального іоносферного електроструменя;  $DR$  – варіація від кільцевого магнітосферного струму;  $DRP$  – варіація від частинного кільцевого струму;  $DP$  – варіація від авроральних іоносферних електроструменів та струмів розтікання їх в полярну шапку та середні широти;  $DCF$  – варіація від струмів на магнітопаузі;  $DT$  – варіація від струмів в хвості магнітосфери;  $DPC$  – варіація, пов'язана з полярним іоносферним електроструменем.

У другому розділі «Просторово-часовий розподіл вікових варіацій та тектонічна будова Землі» досліджено, як змінюються вікові варіації на різних широтах земного шару, від високих широт до екватору в залежності від різної геомагнітної активності. Досліджено зміни вікових варіацій на Африканській тектонічній плиті та європейській частині Євразійської тектонічної плити. Вперше розроблена методика розділення вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх та внутрішніх джерел.

У підрозділі **2.1. Вікові варіації в полярних шапках** досліджено зміну вікових варіацій в Північній та Південній полярних шапках.

В полярних шапках Землі при малій геомагнітній активності в денні години літнього сезону існують великі нерегулярні збурення. Джерелом таких збурень є потужний полярний електрострум, який тече в іоносфері на геомагнітних широтах  $\sim 80^\circ$  і напрямок якого залежить від знаку азимутальної компоненти міжпланетного магнітного поля. 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. Електрострум охоплює геомагнітний полюс, відтак веде до збільшення або зменшення геомагнітного поля на магнітних обсерваторіях «Туле» (THU) і «Алерт» (ALE). Максимальної сили електрострум набуває над магнітними обсерваторіями «Резольют-Бей» (RES) і «Моулд-Бей» (MBC), що веде до збільшення амплітуди в горизонтальній складовій поля. В літні місяці величина збурення від полярного електроструменя може досягати перших сотень нанотесла. В збурених умовах струми затікання від авроральних електроструменів значно збільшують величину варіацій в полярних шапках та їх широтний розподіл. На величину варіацій в полярних шапках, як сказано вище, впливає також кільцевий магнітосферний струм. 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. Для дослідження даного

явища були вибрані середньорічні значення тринадцяти високоширотних магнітних обсерваторій.

На рис. 1 показані вікові варіації повної індукції геомагнітного поля у високих широтах Північної півкулі Землі. Добре видно короткоперіодні (2–4 роки), циклічні (~11 років) та довгоперіодні квазисинусоїдальні варіації. Як короткоперіодні, так і довгоперіодні варіації на всіх обсерваторіях змінюються у фазі (до 2003 р.), тобто криві ВВ( $T$ ) приймають максимальні і мінімальні значення в одні і ті ж самі роки (з точністю до величини найбільшої амплітуди короткоперіодної варіації). Роки зміни знаку ВВ( $T$ ) на обсерваторіях різні, тобто криві зсунуті по осі ординат на певну величину. Для того, щоб зміна знаку ВВ( $T$ ) відбувалась в один і той самий рік, рівень відліку поля ВВ( $T$ ) на більшості обсерваторій слід змінити.

На обсерваторіях ALE, THU, RES, MBC, GDH, BJV, NAL, HIS рівень відліку треба підняти, а на обсерваторіях BLC, FCC, MEA – опустити на певну величину. Після проведення такої операції зміна знаку ВВ( $T$ ) з додатного на від'ємний відбудеться у 1978 р.

На обсерваторіях з довгими рядами спостережень GDH і MEA спостерігається також зміна знаку ВВ( $T$ ) з від'ємного на додатний у 1947 р.

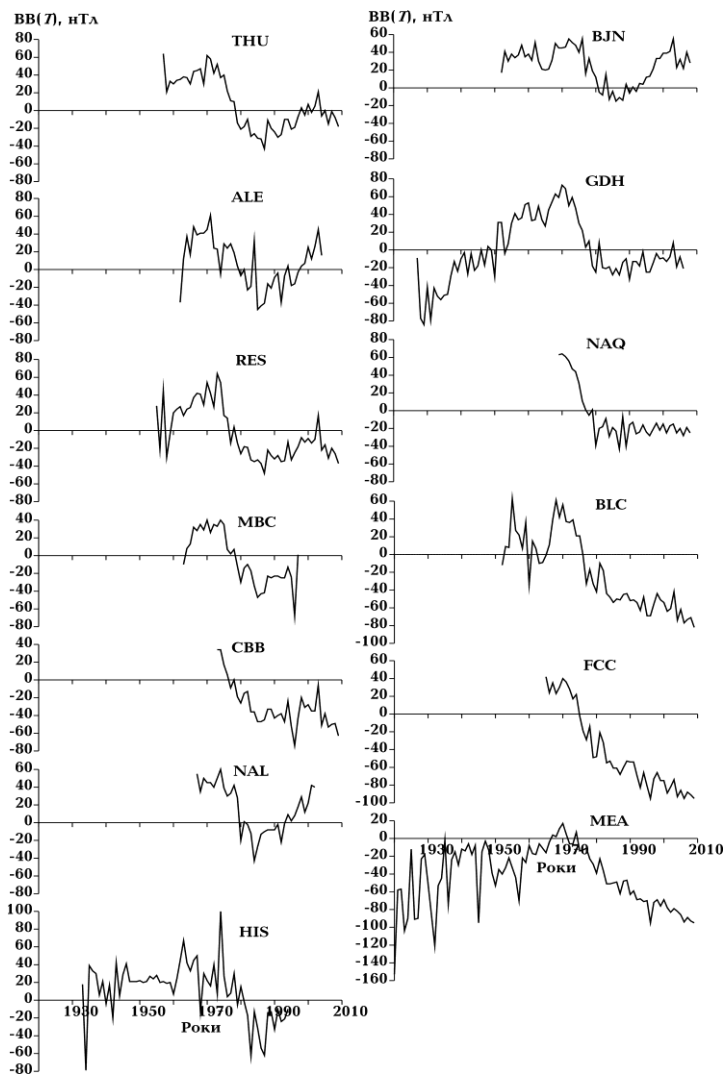


Рис. 1. Вікові варіації повної індукції геомагнітного поля ( $T$ ) на геомагнітних обсерваторіях Північної полярної шапки.

На квазісинусоїдальну варіацію  $BB(T)$  накладаються циклічна та короткоперіодна варіації, які пов'язані зі зміною сонячної активності. Циклічну 11-річну варіацію можна виключити фільтром з 11-річним біжучим вікном. Короткоперіодні (квазидворічні) варіації являють собою позитивні та негативні піки, які «спотворюють» гладку довгоперіодну варіацію. Особливо великі позитивні піки  $BB(T)$  спостерігалися у 1969–1970, 1989–1990, 1994, 2003 рр., що пов'язано з високою сонячною активністю, негативні піки – у 1964, 1975, 1995–1996 рр., що зумовлено низькою сонячною активністю.

Слід виділити додатний пік в 2003 р., який чітко спостерігається на всіх обсерваторіях полярної шапки (а також інших широтних зонах). У 2003 р. на спаді 23-го циклу сонячної активності відбулось декілька магнітних екстратур, 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, призвів до значного збільшення абсолютних значень  $Z$  ( $i$ , відповідно,  $T$ ) у полярній шапці, що відобразилося як позитивний пік у  $BB(T)$ .

Горизонтальна компонента в полярній шапці мала за абсолютною величиною і її вікові варіації істотно різняться на обсерваторіях. Джерелами їх є полярний електрострум і струми затікання з авроральної іоносфери. Короткоперіодні  $BB(H)$  на всіх обсерваторіях збігаються за фазою. На кожній обсерваторії знаки короткоперіодних  $BB(H)$  і  $BB(Z)$  протилежні.  $BB(Z)$  мають більшу амплітуду, ніж  $BB(H)$ , і співмірні на всіх обсерваторіях. Отже, джерело  $BB(Z)$  розміщено далеко. Очевидно, це - кільцевий магнітосферний струм.

Характерною ознакою довгоперіодних  $BB(H)$  є те, що вони змінюються за фазою з  $BB(Z)$  на більшості обсерваторій, крім СВВ і RES, де зміни їх відбуваються за протифазою. Обсерваторії СВВ і RES розташовані під полярним іоносферним електроструменем, тому основна частина  $BB(H)$  на них генерується цим електроструменем.

Для дослідження вікових варіацій в Південній полярній шапці вибрано середньорічні значення вертикальної та горизонтальної компонент геомагнітного поля на 10 обсерваторіях, розміщених в Антарктиді.

На рис. 2, а показано згладжені вікові варіації вертикальної компоненти на антарктичних обсерваторіях та на обсерваторіях, розміщених в суміжних регіонах та обсерваторіях THU, RES і MBC в Північній полярній шапці Землі рис. 2, б. Всі величини позитивні і збільшувались до 1969–1970 рр. Максимальні значення  $BB(Z)$  спостерігалися на обсерваторіях SYO (140 нТл/рік), NVL (136 нТл/рік), MOL (109 нТл/рік). На обсерваторіях, які знаходяться ближче до геомагнітного полюса (VOS, DRV, MIR), максимальна величина  $BB(Z)$  значно менша. Тобто магнітна індукція зменшувалась в Антарктиді неоднаково, і пояснити таке зменшення ослабленням магнітного моменту центрального диполя чи його зміщенням не можна.

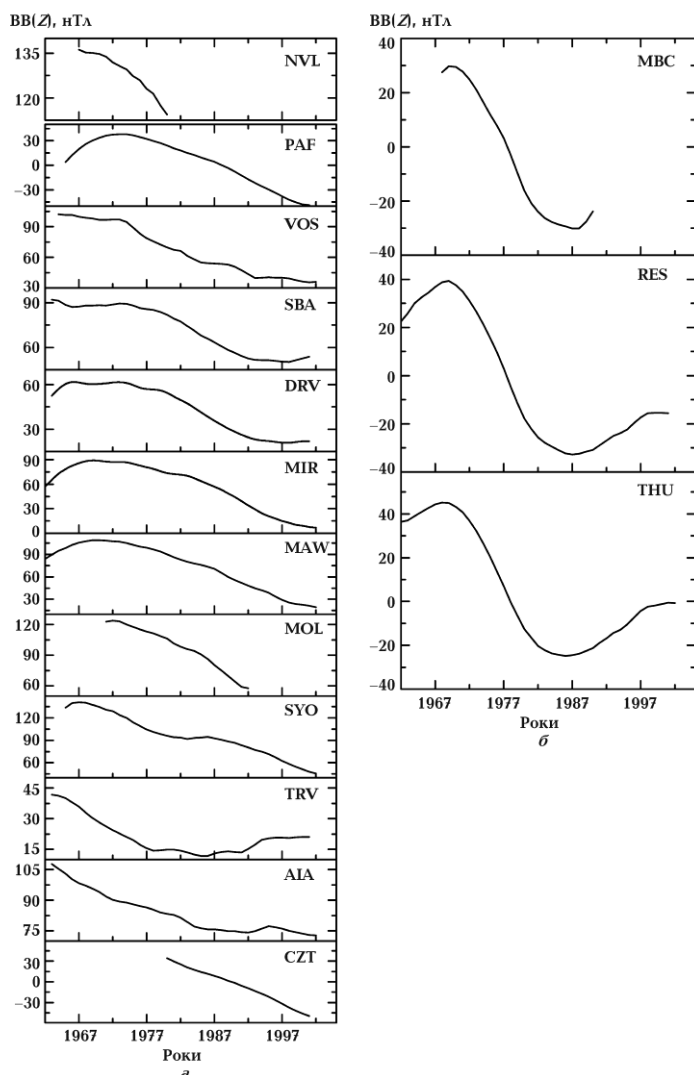


Рис. 2. Згладжені 11- та 3-річними біжучими фільтрами величини  $BB(Z)$  на антарктичних магнітних обсерваторіях (а) і обсерваторіях THU, RES і MBC в північній полярній шапці Землі (б).

Вікові варіації Н-компоненти в Антарктиді мало змінюються з часом, однак просторові зміни їх великі.  $BB(H)$  змінюють знак залежно від положення обсерваторії. Такий розподіл  $BB(H)$  показує значний вплив на вікові варіації магнітосферних та іоносферних струмів. Обсерваторії полярної шапки знаходяться в області впливу магнітосферного кільцевого струму та полярного іоносферного електроструменя, а авроральні SNA, NVL ще і під впливом авроральних електроструменів.

Експериментальні дані показують, що складової вікових варіацій, яка б змінювалась за фазою в обох полярних шапках на всьому досліджуваному інтервалі часу, не спостерігається. На проміжку часу 1957–1978 р.  $BB(Z) > 0$  в обох полярних шапках, тобто змінюється за фазою. Максимальні  $BB(Z)$  спостерігалися у 1969–1970 рр. У 1979 р. в північній полярній шапці  $BB(Z)$  змінює знак, тобто індукція поля почала зменшуватися  $BB(Z) < 0$ , а в південній шапці спад індукції поля продовжується хоч із меншою швидкістю  $BB(Z) > 0$ .

Оскільки  $BB(Z)$  на даному проміжку часу в полярних шапках змінюється за протифазою, пояснити дане явище можна зміщенням центрального диполя на



південь або впливом зовнішніх джерел. Переміщення диполя на південь не підтверджується даними інших обсерваторій, тому треба прийняти припущення про вплив зовнішніх джерел.

У підрозділі 2.2. **Динаміка часових змін вікових варіацій на Землі** за даними геомагнітних обсерваторій Північної та Південної півкуль було досліджено вікові варіації повної індукції геомагнітного поля  $BB(T)$  згладжені 3- і 11-річним біжучим вікном (див. рис.3). Визначено роки змін  $BB(T)$  та їх перших похідних. Ці роки було названо опорними. Показано, що опорні роки співпадають з екстремумами сонячної активності.

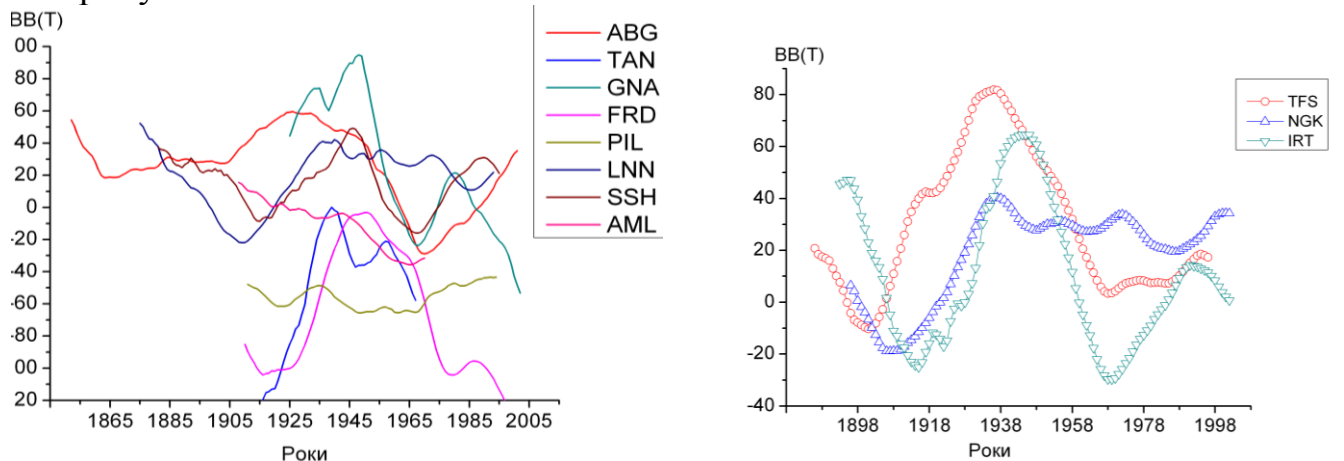


Рис. 3. Вікові варіації повної індукції геомагнітного поля  $BB(T)$  згладжені 3- і 11-річними біжучими середніми на магнітних обсерваторіях: *a* – «Санкт-Петербург» (LNN), «Алібаг» (ABG), «Шешань» (SSH), «Тананаріве» (TAN), «Амберлі» (AML), «Гнангара» (GNA), «Фредеріксбург» (FRD) і «Пілар» (PIL); *б* – «Німек» (NGK), «Тбілісі» (TFS), «Іркутськ» (IRT).

Співставлення графіків всіх вище названих обсерваторій дає змогу виділити опорні роки за проміжок часу з початку XX століття і до 2010 р. Такими роками є 1907, 1920, 1936, 1947, 1960, 1969, 1986 і 2003.

Опубліковані в літературі роки джерків у 1947, 1969 і 1979 рр. співпадають з опорними роками. Тому, немає сумніву, що зовнішні джерела відіграють велику, а може й основну роль у зміні величини та знака вікових варіацій.

У підрозділі 2.3. **Вікові варіації і тектонічна будова Землі** описано, як ведуть себе вікові варіації, що реєструються геомагнітними обсерваторіями на Африканській тектонічній плиті та європейській частині Євразійської тектонічної плити.

*Африканська тектонічна плита (АФ)* – одна з найстабільніших. Доказом цього є наявність на ній великої кількості гарячих точок (вулканів). Швидкий рух плити змазав би їх (Жарков, 1983). Вона є опорною при розрахунках відносних швидкостей переміщення інших тектонічних плит. Африканський континент є найбільшою платформою. На границях плит або близько до них знаходяться магнітні обсерваторії «Плесанс» (PLS), «Крозе» (CZT), «Гуйнар» (GHI), «Мірний» (MRN), «Асцепшин» (ASC). На берегах континенту розміщені обсерваторії «Матуту» (LMM), «Херманюс» (HER), «Луанда» (LUA), «Мока» (MFP), «М'Бур» (MBO). До АФ-плити належить і о. Мадагаскар, який знаходиться в межах

шельфової частини континенту. На острові працює магнітна обсерваторія «Тананаріве» (TAN), яка веде спостереження за геомагнітним полем з 1903 р. Рельєф АФ-плити сформувався в докембрії. Нині активні тектонічні процеси спостерігаються переважно в східній частині континенту. Тут розміщені магнітні обсерваторії «Аддіс-Абеба» (AAE) та «Найробі» на кайнозойському вулканічному поясі, а також «Хартебісток» (HBK) у зоні землетрусів і сучасного оргенезу. Оскільки ВВ вміщують складову, пов'язану з тектонічними процесами, то різна інтенсивність їх в окремих частинах Африканської плити повинна відобразитися у вікових варіаціях. За середньорічними значеннями вертикальної, горизонтальної складових та повного значення індукції магнітного поля – вчислені вікові варіації за весь проміжок часу, в якому велись спостереження абсолютних значень поля на кожній обсерваторії.

На рис. 4, а показано вікові варіації магнітної індукції  $T$  на магнітних обсерваторіях, розміщених у Східній Африці: MLT, AAE, LMM, HBK, HER і на островах в Індійському океані: TAN, PLS, CZT, PAF, а на рис. 4, б – ВВ( $T$ ) на магнітних обсерваторіях в Західній Африці: GUI, TAM, MBO, BNG, LUA, TSU.

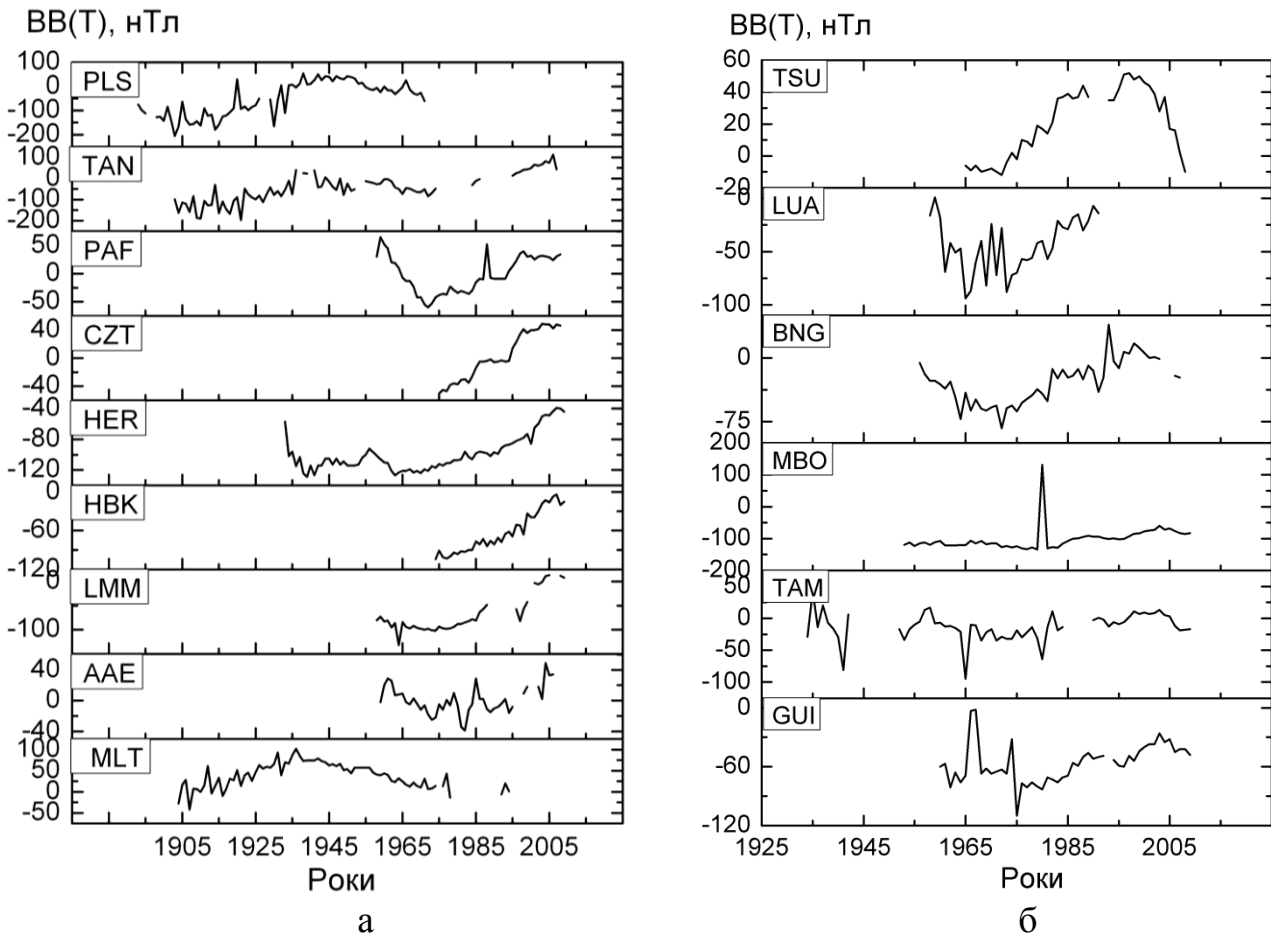


Рис. 4. Вікові варіації індукції ВВ ( $T$ ) на магнітних обсерваторіях у Східній Африці та Індійському океані (а) і в Західній Африці (б).

Основною особливістю ВВ( $T$ ) на Африканській плиті є квазісинусоїдальні графіки змін з часом і їх синфазність у Східній Африці і малі значення ВВ( $T$ ) у Західній Африці. На квазісинусоїду накладаються короткоперіодні варіації, пов'язані з сонячною активністю. Криві змін ВВ( $T$ ) набувають екстремальних

значень у 40-х (максимуми) та у 70–80-х роках ХХ століття (мінімуми).

Амплітуди пораховані тільки для обсерваторій, ряди даних яких охоплюють не менше 40 років. Як виняток, пораховано також амплітуду вікових варіацій на обсерваторії НВК, ряд спостережень на обсерваторії – 35 років. Прибережні та острівні обсерваторії мають великі амплітуди вікових варіацій. На континентальних обсерваторіях вікові варіації значно менші.

Окремою групою виділяються острівні обсерваторії TAN та PLS. На цих обсерваторіях амплітуди ВВ(Т) та ВВ(З) змінюються в межах від 249 до 304 нТл, причому варіації 3–4 рази змінювали знак. На острівних обсерваторіях CZT та PAF, які розміщені на границі Африканської плити з Антарктичною плитою, ВВ(Т) та ВВ(З) змінюються аналогічно, однак вони почали працювати в 60-х роках ХХ століття, тому бачимо зміну знака тільки один раз.

Зміною рівня відліку поля ВВ(Т) на кожній обсерваторії можна добитися зміни знака в один і той же рік на всіх обсерваторіях. Таким роком є 1979 р. Можливість формальною процедурою синхронізувати зміни знака ВВ на всіх обсерваторіях свідчить про те, що варіації генеруються декількома джерелами.

На рис. 5, а показано незгладжені вікові варіації горизонтальної складової ВВ(Н) на східній частині плити, а на рис. 5, б – на західній.

Довгоперіодні ВВ(Н) на обсерваторіях Африканської плити можна згрупувати залежно від положення обсерваторії відносно геомагнітного екватора. На геомагнітному екваторі і близько до нього розміщені обсерваторії ААЕ і ВNG. Тут ВВ(Н) приймають значення близькі до нуля. З віддаленням від екватора на південь ВВ(Н) < 0 і максимального значення абсолютна величина набуває на обсерваторії «Цунеб», тобто недалеко від центру Південноафриканської аномалії. З віддаленням від екватора на північ ВВ(Н) приймає додатні значення, максимальні значення спостерігаються на обсерваторіях «Гаманрассет» та «Гуйнар».

Після 1979 р. абсолютні значення ВВ(Н) < 0 в південній частині Африканської плити почали зменшуватись, а на обсерваторіях LMM, НВК, TAN змінили знак. Роки зміни знака різні, але процес спаду абсолютних значень розпочався одночасно у 1970 р. В північній частині Африканської плити з 1979 до 2003 р. ВВ(Н) мало змінювалась, після 2003 р. тут почався ріст ВВ(Н) > 0.

Вікові варіації горизонтальної складової на обсерваторіях Африканської плити можна згрупувати залежно від положення обсерваторії відносно геомагнітного екватора. Це також свідчить про значний вплив зовнішніх джерел.

Таким чином, вікові варіації на АФ-плиті мають складові від внутрішніх і зовнішніх джерел. Їх можна розділити на квазіпостійну (ВВ<sub>1</sub>) та змінні (різних періодів (ВВ–ВВ<sub>1</sub>) складові. За ВВ<sub>1</sub> вибираємо варіацію в роки, коли відбувається зміна знака на всіх обсерваторіях АФ-плити. Такими роками є 1979 р. (а також 1947 р. і 1907 р., визначені менш впевнено). Допускаємо, що ВВ<sub>1</sub> відображають дію джерел на границі ядро–мантія та джерела, пов'язані з тектонікою регіону. В тектонічно більш активній Східній частині АФ-плити вікові варіації більш динамічні. Складова ВВ–ВВ<sub>1</sub> найімовірніше відображає поле, пов'язане із зовнішніми джерелами, що свідчить про її зв'язок із сонячною активністю. Вона має як короткоперіодні варіації, так і довгоперіодні (~80 років).

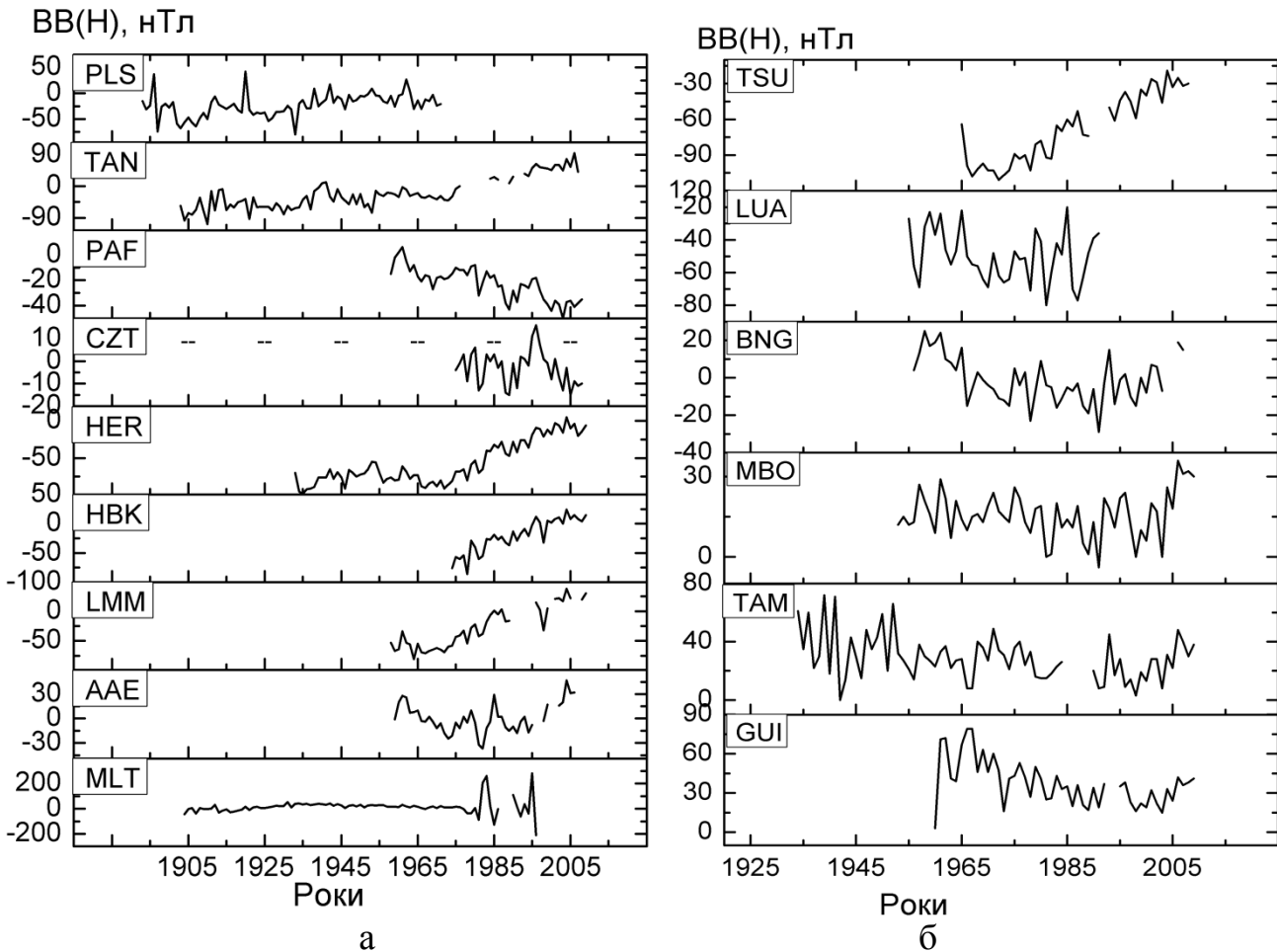


Рис. 5. Вікові варіації горизонтальної складової поля  $BB(H)$  на магнітних обсерваторіях у Східній Африці та в Індійському океані (а) та в Західній Африці (б).

*Євразійська тектонічна плита* – одна з найбільших та найнеоднорідніших. Вона охоплена зоною землетрусів і сучасного орогенезу та межує з північної, північно-західної та північно-східної сторін з Північноамериканською плитою, з південно-східної сторони з Китайською плитою, з південної сторони з Африканською та Іранською плитами.

На Європейському континенті достатньо густа мережа магнітних обсерваторій, які мають довгі ряди спостережень за абсолютними значеннями напруженості геомагнітного поля і його компонент, що дає змогу прослідкувати за змінами в часі як короткоперіодних (11-, 22-річних), так і довгоперіодних (60-, 80-, 100-річних) варіацій.

Європа – єдиний регіон, де починаючи з 20-х років минулого століття напруженість магнітного поля збільшувалась у пульсуючому режимі з періодом  $\sim 22$  роки. Збільшення напруженості спостерігаємо і сьогодні. Виключення становлять тільки високоширотна обсерваторія «Медвежий» (BJN) у Норвегії, де напруженість поля спадала в 80-х роках, та прибережні – іспанська «Сан-Фернандо» (SFS) і португальська «Коїмбра» (COI), де спад поля тривав до 30-х років XX століття.

На рис. 6 показано графіки  $BB(T)$ ,  $BB(Z)$ ,  $BB(H)$ , згладжені 3- і 11-річними вікнами, на магнітній обсерваторії «Німець» (NGK) за 1896–2009 рр.

Порівняння графіків  $BB(T)$  і  $BB(Z)$  показує паралелізм в їх ході, який

порушується в інтервалі часу, коли  $BB(H)$  наближається до нуля. В такі інтервали  $BB(Z) \approx BB(T)$ . Такі явища спостерігалися близько 1907, 1947, 1979 рр. (це роки максимумів 14-го, 18-го і 21-го циклів сонячної активності). В інтервали часу, коли  $BB(H) < 0$ , тоді  $BB(T) < BB(Z)$ , а при  $BB(H) > 0$ ,  $BB(T) > BB(Z)$ .

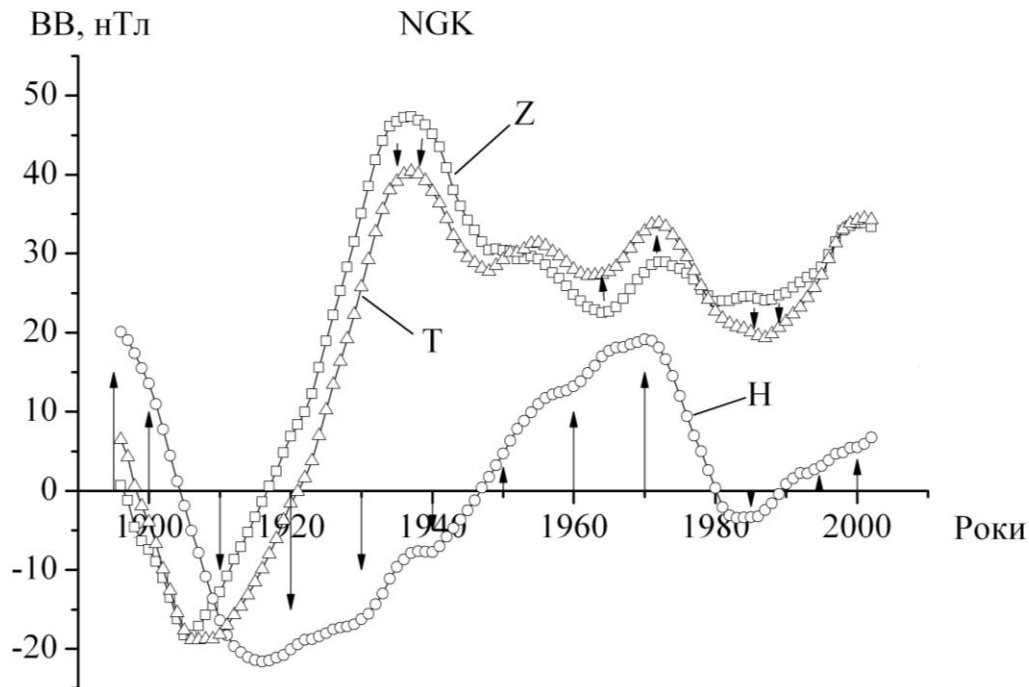


Рис. 6. Графіки часових змін середніх значень  $BB(T)$ ,  $BB(Z)$ ,  $BB(H)$ , згладжених 3- і 11-річними біжними вікнами, на обсерваторії «Німек».

З ростом абсолютної величин  $BB(H)$  абсолютна величина різниці  $BB(T) - BB(Z)$  також зростає. На рис. 6 напрямок зміни  $BB(H)$  відносно нульового значення та  $BB(T)$  відносно зміни  $BB(Z)$  показано стрілками.

Згідно з прийнятою на сьогодні гіпотезою основна частина  $BB$  генерується внутрішніми джерелами. Якщо припустити, що  $BB(H)$  мають основними джерелами зовнішні струми, то по наведених вище даних бачимо, що зовнішні джерела вносять значний вклад у вікову варіацію, причому не хаотично, а у відповідності зі змінами сонячної і геомагнітної активності.

Зміни  $BB(H)$  та  $BB(Z)$ , зареєстровані на європейських обсерваторіях за весь час їх спостережень, мають хвильовий характер, причому амплітуди коливань  $BB(Z)$  збільшуються із збільшенням широти обсерваторії, а  $BB(H)$  із зменшенням широти. У вертикальній компоненті можна виявити коливання з періодами  $\sim 22$  та 80 років. Амплітуди 22-річних коливань збільшуються з ростом широти обсерваторії. Очевидно, це проявлення 22-річного хейлівського циклу сонячної активності. У горизонтальній компоненті 22-річних коливань чітко не спостерігається, оскільки в високих широтах  $BB(H)$  мале. Ці факти підтверджують наявність у вікових варіаціях значної за величиною компоненти від зовнішніх джерел.

Найбільш цікавою особливістю вікових варіацій на обсерваторіях в Європі (і не тільки) є подібність графіків їх змін з часом. Тобто вікові варіації на всіх обсерваторіях (особливо в  $H$ -компоненті) змінюються в фазі незалежно від знака (див. рис. 7). Щоб одержати графік зміни  $BB(H)$  з часом на певній обсерваторії,

треба взяти цей графік на будь-якій іншій обсерваторії і зсунути його паралельно по осі ординат на певну величину.

Тобто  $VB(H) = VB(H)_0 \pm VB_{oi}$  в будь-який рік, де  $VB_{oi}$  – постійна величина для  $i$ -ї обсерваторії,  $VB(H)_0$  – значення вікової варіації на базовій обсерваторії в цей же рік.

Чисельно  $VB(H)_0$  можна визначити, знаючи базову обсерваторію варіацій, з відповідними варіаціями змін інтенсивності зовнішнього джерела.

Іншими словами, можна сказати, що вікові варіації генеруються двома джерелами. Іntenсивність першого (внутрішнього) квазіпостійна, другого (зовнішнього) змінюється з часом.

При зсуві графіків зміни вікових варіацій за часом по осі ординат змінюються роки зміни знака вікових варіацій. Значить, операцією зсуву кривих вікових варіацій по осі ординат можна синхронізувати роки зміни знака вікових варіацій на всіх обсерваторіях і знайти величину  $VB_0$  на цій обсерваторії, а за даними постійних величин побудувати модель чи моделі внутрішніх джерел. Головною трудностю при синхронізації графіків змін вікових варіацій є вибір року реальної зміни знака вікової варіації, тобто знаходження тієї базової обсерваторії, на якій в даний час постійна  $VB_0$  рівна нулю. Задачу можна розв'язати, якщо відомий фізичний механізм зовнішнього джерела.

Якщо джерелом змінних процесів є зовнішні струми, а внутрішні струми дають квазіпостійну складову, то можна «прив'язати» зовнішні струми до змін сонячної і геомагнітної активності.

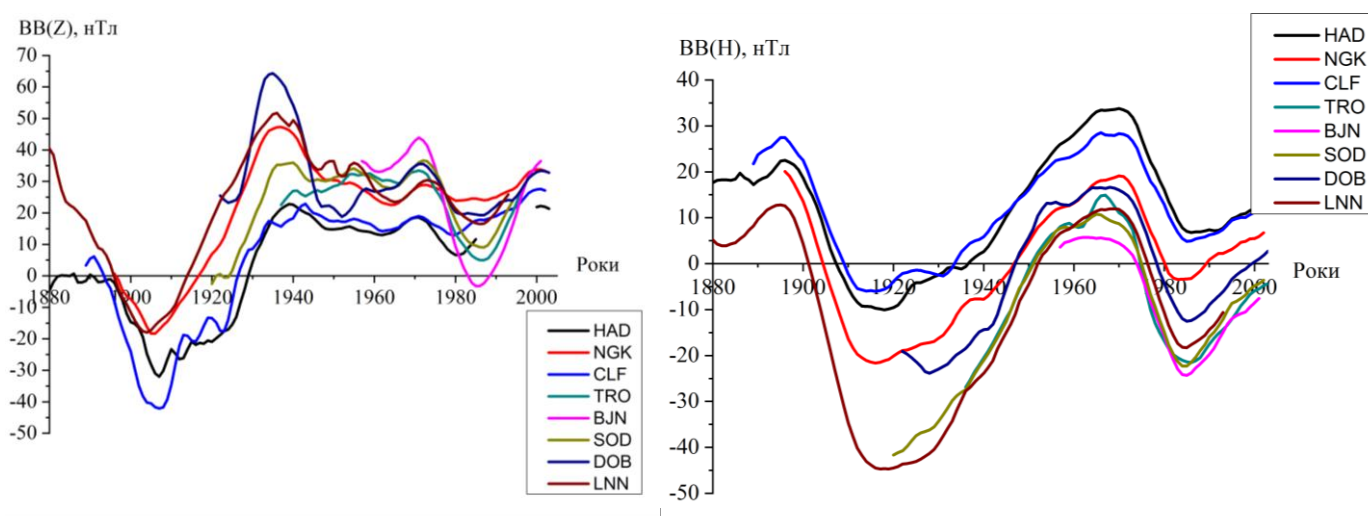


Рис. 7. Згладжені  $VB(Z)$  та  $VB(H)$  на високоширотних (BJN, TRO) субавроральних (SOD, DOB, LNN), середньширотних (NGK, HAD, CLF) європейських обсерваторіях.

На рис. 8 показано залежність зміни  $\Delta VB(T)$  від широти обсерваторії в інтервалі 1969–1986 рр. та 1986–2003 рр. Спостерігається лінійна залежність  $\Delta VB(T)$  від широти як на фазі росту, так і на фазі спаду, тобто процес зміни  $VB(T)$  інтенсивніше проходить з наближенням до полюса. Лінійна залежність  $\Delta VB(T)$  від широти порушується для обсерваторії TFS і COI, що, найімовірніше, пов'язано з впливом інших регіональних внутрішніх джерел.

Із збільшенням широти обсерваторії вікові варіації вертикальної компоненти збільшуються і на полюсі  $VB(Z)=VB(T)$ . Ріст величини змінної частини вікових варіацій з широтою в цьому часовому інтервалі означає, що вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію збільшується. Повна напруженість геомагнітного поля на обсерваторіях в північній полярній шапці досягла максимуму в 1978 р. і в 1979 р. починає спадати, тобто вікова варіація цього року змінює знак з позитивного на негативний.

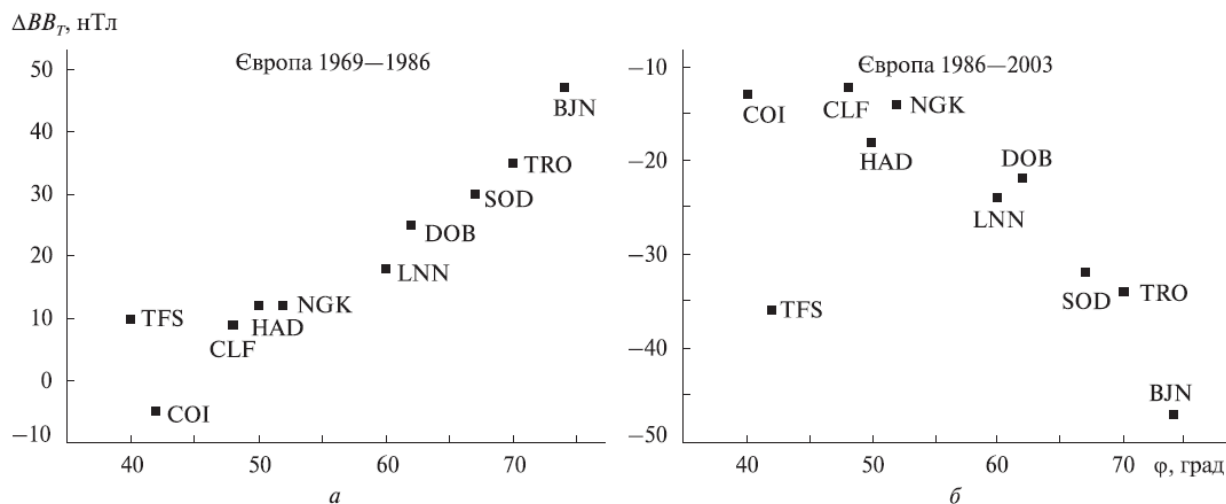


Рис. 8. Залежність зміни вікових варіацій індукції геомагнітного поля  $\Delta VB(T)$  від широти обсерваторії в інтервалах 1969–1986 рр. (а) та 1986–2003 р. (б).

В літературі таку різку зміну знака вікових варіацій називають джерком. При цьому припускається, що така зміна викликана різкою зміною активності внутрішніх джерел. Деякі автори в цьому не впевнені, а В.П. Головков і А.О. Сімонян зауважили, що джерки приурочені до років максимумів сонячної активності.

Максимальні  $VB(T)$  спостерігаються в Центральній Європі – на обсерваторії «Тіхань»  $VB(T) = 26$  нТл/рік, поступово зменшуючись з переміщенням на північ – на обсерваторії  $BJN$   $VB(T) = 14$  нТл/рік, а на приполюсних  $THU$ ,  $RES$ ,  $ALE$   $VB(T)$  за 1979 р. змінюються від  $-3$  до  $-6$  нТл/рік. Тобто  $VB(T)$  цього року тут мале і від’ємне. Це значить, що на полюсі  $VB(T)$  від зовнішніх джерел у 1978–1979 рр. близька до нуля. Оскільки поле від кільцевого магнітосферного струму однорідне по всій Землі, можна вважати, що в цей рік  $VB(T)$  генерувалось тільки внутрішніми джерелами. Приймаючи значення вікових варіацій за 1979 р. за нульовий рівень поля компоненти, залежної від зовнішніх джерел, і постулюючи, що вікові варіації від внутрішніх джерел мало змінюються з часом, можна знайти величину компоненти від внутрішніх джерел цього року та в найближчі роки по всьому регіону.

Південна компонента міжпланетного магнітного поля зростала за абсолютною величиною від 1969 р. до 1974–1976 рр. і спадала до 1979 р. Великомасштабне магнітне поле Сонця в цей інтервал часу було направлено на північ від Сонця (позитивне). На європейських магнітних обсерваторіях  $VB(Z)$  (див. рис. 7) збільшувалось, а  $VB(H)$  (див. рис. 7) зменшувалось, при цьому величина варіації



ВВ(Z) більша для високоширотних обсерваторій. У 1979 р. спостерігався максимум 21-го циклу сонячної активності. Великомасштабне магнітне поле Сонця в цей рік змінило знак (направлено на Північному полюсі до Сонця). Середньорічні величини  $V_z$ -компоненти прийняли позитивні значення. Геомагнітна активність почала зменшуватись, що викликало відповідні зміни вікових варіацій.

Нова зміна знака Великомасштабного магнітного поля Сонця у 1989 р. (максимум 22-го циклу сонячної активності) призвела до відповідних змін вікових варіацій на європейських магнітних обсерваторіях. В інтервал часу 1969–1989 рр. вклався один хейлівський цикл сонячної активності і це відобразилось у вікових варіаціях. Таким чином, можна стверджувати, що зміни знака і величини Великомасштабного магнітного поля Сонця і, відповідно, середньорічних значень  $V_z$ -компоненти міжпланетного магнітного поля веде до зміни величини і знака вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх джерел. Різкі зміни величини і знаку вікових варіацій (джерки) відображають зміну геомагнітної активності, пов'язаної з Великомасштабним магнітним полем Сонця. Такий розвиток подій в хейлівському циклі сонячної активності у 1969–1989 р. показує, що різкого скачка арктичного фокуса на південь не було. Фокус почав розвиватися у 1969 р., досягнув максимуму в середині 70-х років і релаксував в кінці 80-х років, він був відображенням змін геомагнітної активності, пов'язаної з ~22-річним хейлівським циклом сонячної активності.

Отже, в результаті досліджень визначено, що вікові варіації геомагнітного поля на магнітних обсерваторіях Європи складаються з двох компонент: квазіпостійної від внутрішніх джерел і змінної, яка пов'язана з зовнішніми джерелами. Компонента від зовнішніх джерел відображається у вікових варіаціях вертикальної та горизонтальної компонент поля і величина її збільшується у вертикальній компоненті із збільшенням широти місця спостереження, а в горизонтальній компоненті із зменшенням широти (до  $\phi \sim 45^\circ$ ). Величина і знак компоненти вікових варіацій від зовнішніх джерел добре корелюють з величиною і знаком Великомасштабного магнітного поля Сонця і, відповідно, з величиною і знаком середньорічних значень південної компоненти міжпланетного магнітного поля.

У третьому розділі «Сонячна і геомагнітна активність і вікові варіації» досліджено вікові варіації геомагнітного поля від сонячної і геомагнітної активності. Побудовані рівняння залежностей вікових варіацій на різних обсерваторіях. Проаналізовано особливості сонячної і геомагнітної активності в кінці 20-го і на початку 21-го століття. Детально проаналізовані великі бурі 2003 року, підраховано оцінку вкладу кільцевого струму у вікову варіацію для цього року. Досліджено залежність сонячної активності на структурність міжпланетного магнітного поля. Досліджено вплив сонячної активності на величину енергії, яка поступає в магнітосферу.

У підрозділі 3.1. Виділення вікових варіацій від різних джерел досліджено залежність вікових варіацій від зовнішніх джерел, таких як кільцевий магнітосферний струм і авроральні іоносферні електрострумені для різних періодів сонячної і геомагнітної активності. Вікові варіації ВВ(H) і ВВ(Z) розраховуються як різниця між середньорічними величинами горизонтальної та вертикальної



компонент. Проаналізувавши  $VB(H)$  і  $VB(Z)$  для обсерваторій LNN, BEL і LVV по всіх, збурених і спокійних днях можна бачити короткоперіодні (близько двох років) і довгоперіодні варіації. Амплітуди короткоперіодних  $VB(H)$  зростають від LNN до LVV і найбільші для збурених днів. Довгоперіодні  $VB(H)$  змінюються за квазисинусоїдальним законом таким же чином як змінюється індекс  $\Sigma K_p$ . Короткоперіодні і довгоперіодні  $VB(Z)$  співпадають за фазою на всіх обсерваторіях, причому амплітуди  $VB(Z)$  по збурених днях більші ніж по спокійних. Такий вплив на вікові варіації може давати кільцевий магнітосферний струм, який розвивається під час магнітних бур і зменшує горизонтальну складову на низьких широтах і збільшує вертикальну складову у високих широтах. Найбільші ряди спостережень за геомагнітним полем є на обсерваторіях LNN, COI. Зіставивши графіки  $VB(H)$  і  $VB(Z)$  на цих двох обсерваторіях, можна побачити, що короткоперіодні  $VB(H)$  і  $VB(Z)$  мають більшу амплітуду на обсерваторії COI. Більша амплітуда варіацій  $VB(H)$  на COI пояснюються тим, що COI знаходиться ближче до екватора чим LNN. Більші амплітуди  $VB(Z)$  на COI можна пояснити тим, що COI – берегова обсерваторія і індуквані струми в океанських течіях збільшують їх амплітуду.

Залежність змін  $VB(H)$  на всіх середньоширотних і субавроральних геомагнітних обсерваторіях Північної півкулі можна описати рівнянням:

$$VB(H)_i = K \cdot VB(H)_{i+1} \pm VB(H)_0,$$

де  $K$  – постійний коефіцієнт для даної обсерваторії, а  $VB(H)_0$  – позитивна величина, також постійна для цієї обсерваторії, але її вибирають таким чином, щоб роки зміни знаку  $VB(H)$  на всіх обсерваторіях співпадали. Якщо прийняти опорною геомагнітну обсерваторію LVV, то рівняння залежності  $VB(H)$  на геомагнітній обсерваторії LVV від  $VB(H)$  на інших обсерваторіях показані в таблиці 1. Точки пертину цих ліній з віссю ординат показують значення  $VB(H)_0$ .

Таблиця 1

**Рівняння залежності  $VB(H)$  на геомагнітній обсерваторії LVV від  $VB(H)$  на інших обсерваторіях**

Обсерваторія	$SV(H)_{LVV}$	Обсерваторія	$SV(H)_{LVV}$
Одеса	$0,80SV(H)_{ODE}-2,22$	Бельск	$0,83SV(H)_{BEL}+1,29$
Ленінград	$0,97SV(H)_{LNN}-4,00$	Німек	$0,91SV(H)_{NGK}+5,07$
Київ	$0,82SV(H)_{KIV}-2,25$	Шамбон-ла-Фаре	$0,93SV(H)_{CLF}+14,73$
Москва	$0,78SV(H)_{MOS}-2,21$	Лервік	$0,98SV(H)_{LER}+7,80$
Сурларі	$0,94SV(H)_{SUA}-2,01$	Хартленд	$1,02SV(H)_{HAD}+17,43$
Нурміярві	$1,03SV(H)_{NUR}-3,59$	Коїмбра	$0,97SV(H)_{COI}+29,51$

На рис. 9 показано залежність середніх за цикл  $VB(H)$  на обсерваторії HAD від величини середніх за цикл чисел Вольфа від 15-го до 22-го циклів.

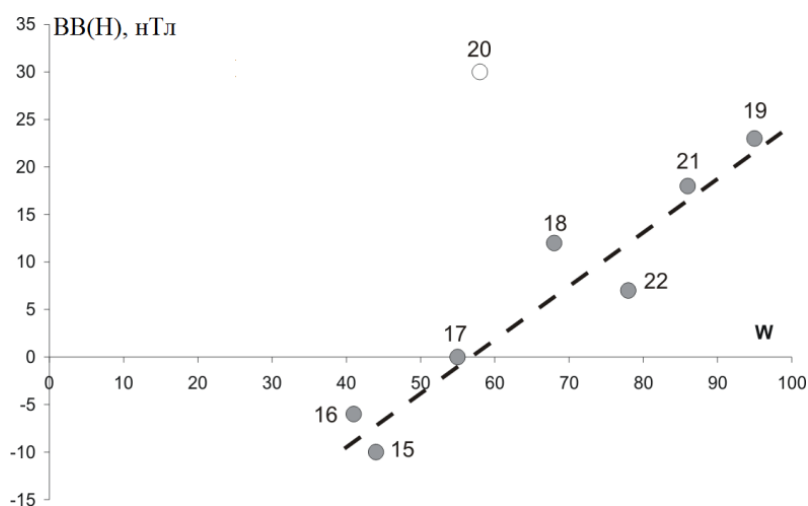


Рис. 9. Залежність  $BB(H)$  на магнітній обсерваторії HAD від середніх за цикл чисел Вольфа ( $W$ ).

Легко бачити лінійну залежність між величинами. Тільки 20-й цикл «випадає» з цієї залежності. Таким чином можна вважати, що у вікових варіаціях спостерігаються три типи варіацій від зовнішніх джерел. Короткоперіодні варіації (квазідворічні), амплітуда яких зростає в магнітозбуренні дні і фази яких в  $H$  і  $Z$  компонентах протилежні; середньоперіодні ( $\sim 11$  років) вікові варіації, величина яких спадає на фазі росту сонячної активності і зростає на фазі спаду; і довгоперіодні ( $\sim 80$  років) вікові варіації, які мають графіки залежності від часу квазісинусоїдальної форми, а зміни знака довгоперіодних вікових варіацій відбулися у 1902–1905, 1947–1949, 1979–1980 рр.

Оскільки, вікова варіація геомагнітного поля вираховується як різниця між середньорічними значеннями елементів поля для оцінки внеску у вікові варіації зовнішніх джерел, необхідно вибрати такий інтервал часу, в якому інтенсивність зовнішнього джерела вікових варіацій достовірно відома. У 2003 р. на фазі спаду активності 23-го сонячного циклу спостерігався ряд дуже великих магнітних бур, які дали значний вклад у середньорічні значення поля за цей рік. Цей рік було обрано, щоб оцінити внесок зовнішніх джерел у вікову варіацію та його розподіл на поверхні Землі, оскільки величини збурень на 127 обсерваторіях світової мережі були добре відомі. Величину варіації від зовнішніх джерел обчислювали за формулою:

$$\Delta BB = BB_{2003} - (BB_{2002} + BB_{2004})/2,$$

де  $BB$  – вікова варіація напруженості геомагнітного поля та її складових за певний рік (вказаний індексом). Зміна вікових варіацій від внутрішніх джерел відбувається повільно і тому, беручи різницю між послідовними роками, вона виключається. Оскільки кільцевий магнітосферний струм, який тече на захід, дає зменшення повної напруженості поля, то в горизонтальній складовій зменшення поля на екваторі максимальне, а на полюсах дорівнює нулю. Широтну залежність  $\Delta BB(H)$  від кільцевого магнітосферного струму можна представити за законом косинуса:

$$\Delta BB_1(H) = -\Delta BB(H)_{\max} \cos \varphi,$$

де  $\varphi$  – широта обсерваторії;  $\Delta BB(H)_{\max}$  – максимальна величина  $\Delta BB(H)$  на екваторі (з експериментальних даних дорівнює  $-20$  нТл). Відхилення від модельних даних

спостерігається на обсерваторіях авроральної зони, що свідчить про вплив іоносферних електроджетів, а також на обсерваторіях, де великий вплив індукційних струмів у підстилаючих поверхнях. Залежність величини вікових варіацій від зовнішніх джерел у вертикальній компоненті поля залежно від географічної широти можна представити за законом синуса:

$$\Delta BB_1(Z) = \Delta BB(Z)_{\max} \sin \varphi$$

За експериментальними даними  $\Delta BB(Z)_{\max} = \pm 20$  нТл. Надзвичайно великі відхилення  $\Delta BB(Z)$  від модельної кривої спостерігаються на обсерваторіях «Карачі» (KRC) і «Ташкент» (TKT), що свідчить про неоднорідності в підстилаючих поверхнях цих обсерваторій. У Південній півкулі більшість обсерваторій розташована на берегах океанів або на островах, тому їх дані спотворені береговим ефектом або океанічними течіями.

Потужні магнітні бурі 2003 р. дали значний внесок у вікові варіації геомагнітного поля. Особливо чітко спостерігається вплив на вікові варіації іоносферних авроральних електроструменів. У районах магнітних аномалій, сейсмоактивних регіонах, на границях літосферних плит величина внеску у вікову варіацію від зовнішніх джерел значно збільшується.

У підрозділі 3.2. **Особливості сонячної та геомагнітної активності у XX та на початку XXI століття** за даними геомагнітних обсерваторій INTERMAGNET і МЦД по сонячно-земній фізиці проаналізовані зміни сонячної і геомагнітної активності в 19-24 циклах сонячної активності.

На рис. 10 показано середньорічні числа Вольфа ( $W$ ) у 19–23-му і на гілці росту 24-го циклів, різниці між середньорічними значеннями чисел Вольфа ( $\Delta W$ ), а також квазідворічні варіації чисел Вольфа (КДВ). КДВ характеризують короткоперіодні варіації сонячної активності і добре корелюють з іоносферною та геомагнітною активністю, метеорологічними явищами.

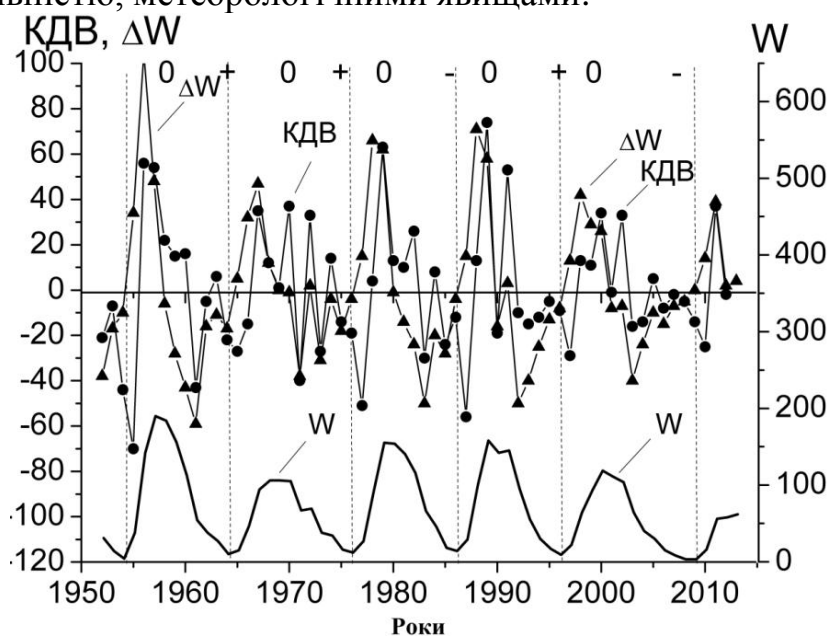


Рис. 10. Середньорічні числа Вольфа ( $W$ ) у 19–23-му і на гілці росту 24-го циклів сонячної активності, різниця між середньорічними значеннями чисел Вольфа ( $\Delta W$ ) і квазідворічні варіації чисел Вольфа (КДВ). Вертикальні штрихові лінії проведено в роки мінімумів сонячної активності.

Магнітні бурі – явище планетарне, тому їх кількість повинна об'єктивно характеризувати геомагнітну активність. Було проаналізовано число бур різної інтенсивності у 19-23-му циклах сонячної активності і на фазі розвитку 24 циклу, а також загальне число бур в кожному циклі ( $N$ ) і середнє за рік в цьому циклі ( $N_{cp}$ ). У непарних циклах  $N_{cp}$  більше ніж у парних, тобто в геомагнітній активності виконується правило Гневишева - Оля. Аналіз бур за кожен рік з 1952 до 2013 р. показав аналогічну картину змін, подібну до сонячної активності. Геомагнітна активність, виражена індексом  $\Sigma(H-S_q)$ , на обсерваторіях, розміщених на різних континентах, однакова і добре корелює з сонячною активністю, вираженою числами Вольфа  $W$ . У 19-му циклі сонячної активності спостерігається запізнення геомагнітної активності на два роки. У парному 20-му циклі запізнення уже рівне п'яти рокам. У 21-му циклі – три роки, а в наступних 22-му та 23-му циклах роки максимумів сонячної та геомагнітної активності співпадають.

Після 1957–1959 рр. (максимум 19-го циклу) геомагнітна активність зменшується. У 20-му циклі геомагнітна активність, як і сонячна, розвивалась особливим чином. Геомагнітна активність була низькою, і максимальне число бур в циклі спостерігалось на фазі спаду сонячної активності (1973–1975 рр.). Необхідно звернути увагу на максимум геомагнітної активності у 23-му циклі (1996–2009 рр.), хоч максимум сонячної активності, виражений числами Вольфа, у 23-му циклі був на 24 % меншим, ніж у 22-му. Максимум геомагнітної активності 23-го циклу вищий рівня максимуму 22-го. Особливо активними були 2001 та 2002 р. і жовтень–листопад 2003 р. Магнітні екстрабурі в жовтні–листопаді 2003 р. були найпотужнішими не тільки у 23-му циклі, але і після максимуму сонячної активності в 1957 р. Загалом в досліджуваному інтервалі часу геомагнітна активність зменшується, причому особливо різко на фазі росту 24-го циклу, коли спостерігалися переважно малі і помірні бурі.

Отже, за даними інструментальних спостережень на магнітних обсерваторіях світової мережі та за даними міжнародних центрів по сонячно-земній фізиці геомагнітна і сонячна активності досягли максимуму в кінці 50-х років ХХ століття. Надалі спостерігається стрибкоподібне зменшення активності. Менша активність спостерігалася в 20-му циклі (1964–1976 рр.), а найменша - на фазі розвитку 24-го циклу. Різке зменшення геомагнітної активності викликане зменшенням величини Великомасштабного магнітного поля Сонця та наближенням до мінімуму ~200-річного циклу сонячної активності в 2050–2060 рр.

У підрозділі **3.3. Вікові варіації та дуже великі геомагнітні бурі** досліджено надзвичайно великі магнітні бурі 29–31 жовтня 2003 р. та 20–21 листопада 2003 р. та пораховано вклад зовнішніх джерел у варіацію під час цих бур.

Спалахові події в жовтні-листопаді 2003 року викликали значний інтерес учених у всьому світі, оскільки вони характеризувались екстремальними значеннями параметрів на Сонці, у магнітосфері та іоносфері Землі. Надзвичайні події в ці місяці спричинені «проходженням» по видимому диску Сонця трьох дуже великих активних областей з дуже складною магнітною конфігурацією. Серія магнітних бур у жовтні–листопаді 2003 р. призвела до значного зменшення напруженості геомагнітного поля, що відобразилося в короткоперіодних ВВ.

Перша магнітна буря мала раптовий початок і амплітуду 760 нТл (в горизонтальній складовій) на магнітній обсерваторії «Львів». На рис. 11 показано величину  $(H-S_q)$  та  $D_{st}\cos\Phi$  за 29–31 жовтня 2003 р.  $H$  – це середньогодинні абсолютні значення горизонтальної складової поля, а  $S_q$  – середні значення  $H$  в ті ж години за п'ять міжнародно-спокійних днів в жовтні 2003 р.,  $D_{st}\cos\Phi$  – варіація від кільцевого магнітосферного струму на геомагнітній широті обсерваторії «Львів»,  $\Phi$  – геомагнітна широта обсерваторії. Різниця  $\Delta = (H-S_q) - D_{st}\cos\Phi$  дає величину вкладу в варіацію від авроральних іоносферних електроструменів та їхніх зворотних струмів у середні широти (рис 12).

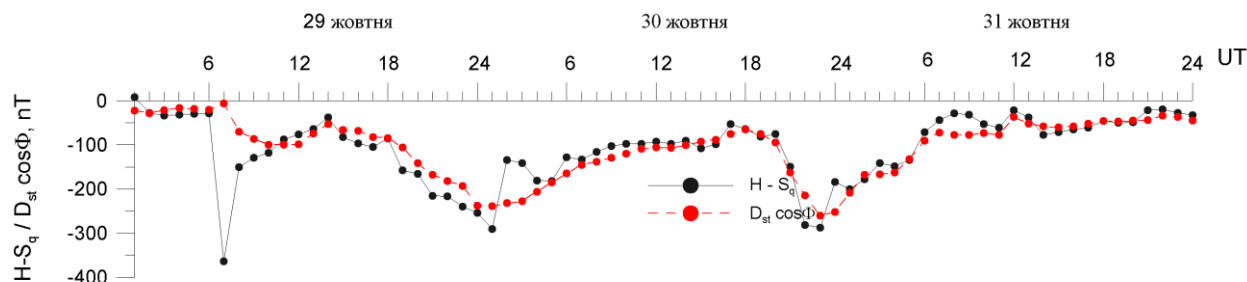


Рис.11. Варіації  $H-S_q$  та  $D_{st}\cos\Phi$  на магнітній обсерваторії «Львів» для бурі 29–31 жовтня 2003 р.

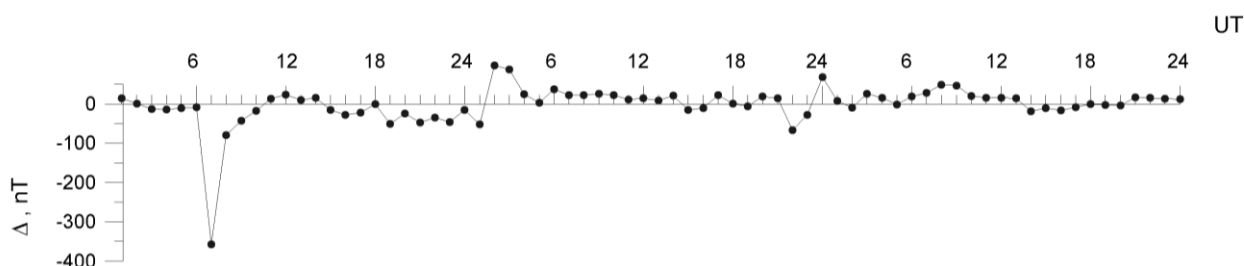


Рис. 12. Величина вкладу у варіацію від авроральних іоносферних електроструменів та їхніх зворотних струмів у середні широти.

20 листопада 2003 р. спостерігалась магнітна екстрабура, пов'язана із серією спалахів із активних областей Сонця, що призвели до екстрабури 29–31 жовтня 2003 р. Сонячна активність бурі 20 листопада була значно нижчою,  $D_{st}$ -індекс досягнув максимального значення  $-472$  нТл. Джерела цих бур знаходились на активній геліодовготі, яка спостерігалась майже в усіх циклах XX століття і домінувала в генерації більшості бур 23-го циклу.

Для цієї бурі також були пораховані AE-, AL-, AU-індекси магнітної активності. Максимальні значення AE-індексу (1517 нТл) спостерігалися о 14 год UT, і в подальшому бачимо різкий його спад. Максимальні значення AE-індексу на 7 год випереджують максимум  $D_{st}$ . Незвичайними є зміни AU-індексу, який відображає інтенсивність східного аврорального електроструменя. Максимальне значення 424 нТл індекс мав об 11 год UT, у подальшому він спадав і з 16 год UT 20 листопада до 01 год UT 21 листопада був від'ємний. Це значить, що весь ланцюжок авроральних обсерваторій знаходився під дією західного аврорального електроструменя, який замкнувся і охопив геомагнітний полюс.

Отже, поява екстрабур в роки високої сонячної активності веде до значного зменшення середньорічних значень напруженості геомагнітного поля, а значить, впливає на величину вчислених ВВ поля.

У підрозділі **3.4. Геомагнітна активність і динаміка секторної структури міжпланетного магнітного поля** досліджено залежність геомагнітної активності від зміни секторної структури міжпланетного магнітного поля. Показано, що з ростом сонячної активності двосекторна структура міжпланетного магнітного поля перетворюється в багатосекторну.

Необхідною умовою розвитку геомагнітної бурі є тривале підсилення магнітосферо-іоносферної конвекції. Конвекція посилюється при наявності в сонячному вітрі південної ( $V_Z$ ) складової міжпланетного магнітного поля. У спокійному сонячному вітрі  $V_Z$  близька до нуля. Для генерації великої  $V_Z$ -складової в сонячному вітрі повинна появитися неоднорідність. Така неоднорідність може створитися корональними викидами маси, взаємодією між корпускулярними потоками та ін.

Залежність геомагнітної активності від зміни секторної структури досліджувались в інтервалі часу з 1 липня 1966 р. до 28 травня 1974 р. Цей інтервал часу один з найспокійніших в ХХ столітті і це дає можливість прослідкувати за зміною секторної структури. Мірою геомагнітної активності вибрано індекс  $\Sigma(H-S_q)$ .

У досліджуваному інтервалі часу відбулось 106 обертів Сонця навколо його осі, з них у 62 обертах спостерігалась двосекторна структура міжпланетного магнітного поля, у 44 обертах двосекторна структура порушувалась і ставала багатосекторною.

У варіаціях секторної структури можна виділити три типи динамічних процесів: перший – поступове зародження нового сектора протилежного знака в межах існуючого протягом кількох обертів Сонця; другий – поступове зменшення тривалості сектора і повне його зникнення; третій – зміщення границь між секторами як за годинниковою стрілкою, так і проти неї. Рух границь між секторами за годинниковою стрілкою відповідає збільшенню тривалості попереднього сектора, проти годинникової – зменшенню його тривалості. Пояснення таких змін секторної структури можна дати, використавши модель дископодібного струму, який оточує Сонце і розміщений в його екваторіальній площині.

Зміни знаків секторів міжпланетного магнітного поля, а також відхилення від секторної структури ведуть до значного росту геомагнітної активності.

Величина  $V_Z$  зростає під час відхилень міжпланетного магнітного поля в площині екліптики від спіралі Архімеда та на границях секторів. Величина напруженості міжпланетного магнітного поля в такі проміжки часу також значно збільшується. Максимальних значень  $V_Z$  набуває при  $\Phi = 20-60^\circ$  та  $220-260^\circ$ . У спокійних умовах  $V_Z \leq 5$  нТл і не викликає великих геомагнітних збурень. Величина  $V_Z$  зростає під час відхилень міжпланетного магнітного поля в площині екліптики від спіралі Архімеда та на границях секторів. Величина напруженості міжпланетного магнітного поля в такі проміжки часу також значно збільшується. Максимальних значень  $V_Z$  набуває при  $\Phi = 20-60^\circ$  та  $220-260^\circ$ . У спокійних умовах  $V_Z \leq 5$  нТл і не викликає великих геомагнітних збурень. У ті інтервали часу, коли

порушення секторної структури супроводжуються великими додатними значеннями  $B_Z$ , в зоні полярних сьйв та в середніх широтах магнітні збурення не спостерігаються. При  $B_Z > 0$  відбувається переєднання міжпланетного магнітного поля і силових ліній дипольного поля в районі каспів. Магнітопауза в такі години віддаляється від Землі, широта каспів збільшується, а в полярних шапках спостерігається особливий тип геомагнітних варіацій.

Таким чином, аналіз структури міжпланетного магнітного поля показав, що зміна знака сектора міжпланетного магнітного поля, а також недовготривалі порушення секторної структури, тобто відхилення від напрямку по спіралі Архімеда, ведуть до генерації вертикальної складової міжпланетного магнітного поля. Збільшення сонячної активності веде до перебудови двосекторної структури в багатосекторну, до появи  $B_Z$ -складової міжпланетного магнітного поля значної величини і до збільшення геомагнітної активності, що відображається у вікових варіаціях геомагнітного поля.

У підрозділі **3.5. Енергетика магнітосфери на різних рівнях сонячної активності** досліджено вплив сонячної активності на величину енергії, яка поступає в магнітосферу.

Сонячна активність змінюється як циклічно, так і за фазою в циклі. Тривалість циклу визначається як час між двома послідовними мінімумами і становить: приблизно 11 років (цикл Швабе–Вольфа), 22 роки (цикл Хейла), 80–100 років (цикл Глайсберга), 200, 360, 1000 та ін. Сонячний вітер та корпускулярні потоки переносять через міжпланетний простір енергію у вигляді кінетичної енергії напрямленого руху плазми, теплову та електричну (міжпланетні електричні та магнітні поля). Кількість енергії, яка надходить у магнітосферу, регулюється величиною та напрямком вмероженого в сонячний вітер міжпланетного магнітного поля. Інжектвана в магнітосферу енергія зберігається в ній у деяких формах, а через певний проміжок часу дисипує в іоносфері та атмосфері або ж відразу проникає в іоносферу, генеруючи системи електричних струмів. Порядок значень енергії, яка надходить і дисипує в іоносфері, можна оцінити за індексами активності авроральних електроструменів АЕ за формулами:

$$U_A = (1,75 \text{ АЕ}/100 + 1,6)10^{10} \text{ [Дж/с]},$$

$$U_j = 0,32 \text{ АЕ} \cdot 10^9 \text{ [Дж/с]},$$

де  $U_A$  – збільшення енергії авроральних частинок,  $U_j$  – джоулівська дисипація в іоносфері.

Замінивши АЕ індексом  $\Sigma(H-S_q)$  (для середніх широт), було пораховано середньомісячні величини енергії, що надходить у магнітосферу із сонячного вітру за 19-24-й цикли сонячної активності. Крива цих змін має чітко виражену 11-річну циклічність. Ця енергія прямо пропорційна кількості всіх геомагнітних збурень, що протікали в ці роки. Величина середньої за рік енергії, що поступала в мінімуми 19–24-го циклів, найменша у 2009 р. і у 1,5–2 рази менша за відповідні величини у всіх спостережуваних мінімумах.

Відповідною була і кількість рекурентних геомагнітних збурень для 19-го та 24-го циклів сонячної активності. Рекурентними вважались збурення, котрі повторювались два і більше разів у 27-денному циклі. Максимальна рекурентність

спостерігалась для 2378–2395 обертів Сонця (по Бартельсу) з 23 листопада 2007 р. до 27 січня 2009 р. У цей час кількість спалахів на Сонці була надзвичайно низькою, хоча збурення магнітного поля Землі спостерігались.

**У четвертому розділі «Просторово-часова структура магнітного поля Землі території України»** досліджено довготривалі зміни геомагнітного поля за даними спостережень на магнітних обсерваторіях України, просторово-часову структуру геомагнітного поля території України та оцінено вклад внутрішніх і зовнішніх джерел за допомогою даних українських магнітних обсерваторій. Пораховано вклад індукційних струмів у вікову варіацію з використанням даних геомагнітних обсерваторій України.

У підрозділі **4.1. Геомагнітні обсерваторії України** детально описано шлях розвитку геомагнітних обсерваторій України з моменту їх заснування до теперішніх часів, їх обладнання та методика вимірювань. Показано, які вимоги повинні були виконати обсерваторії, щоб отримати сертифікат INTERMAGNET.

На сьогоднішній день Україна має чотири геомагнітні обсерваторії, три з яких – «Київ», «Львів», «Одеса» – розміщені на території України, четверта – «Академік Вернадський» – в Антарктиді. Показано як змінювалась апаратура і методика абсолютних і варіаційних спостережень на цих геомагнітних обсерваторіях.

З чотирьох обсерваторій три з них «Київ», «Львів» і «Академік Вернадський» є повноправними членами INTERMAGNET. Підтверджуючі сертифікати обсерваторії отримали в 2011, 2005 та 2004 роках відповідно. Геомагнітна обсерваторія «Одеса» працює за протоколом INTERMAGNET і найближчим часом повинна отримати сертифікат цієї організації. Завдяки договорам між Потсдамським центром досліджень (Німеччина) та Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, а також тісній співпраці з Інститутом геофізики Польської академії наук обсерваторія «Одеса» оснащена сучасним обладнанням. Це дає змогу проводити дослідження геомагнітного поля відповідно до сучасних вимог.

У підрозділі **4.2. Довготривалі зміни геомагнітного поля за даними спостережень на магнітних обсерваторіях України** проведений аналіз довготривалих змін компонент магнітного поля Землі за даними геомагнітних обсерваторій «Київ», «Львів», «Одеса» за весь період їх спостережень в залежності від положення обсерваторії, а також геомагнітної і сонячної активності.

Було проаналізовано 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 надалі варіацій від зовнішніх і внутрішніх джерел.

Магнітні обсерваторії України «Київ», «Львів», «Одеса» розміщені в різних геологічних зонах, тому спостережувані варіації магнітного поля Землі будуть відрізнятися як внаслідок різного географічного положення, так і різних властивостей підстилаючих поверхонь цих обсерваторій. Оскільки широти обсерваторій відрізняються лише на декілька градусів, 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, будуть на обсерваторіях однакові за величиною, проте



іоносферні системи струмів, що протікають на висоті від 120 км і вище, будуть генерувати різні за величиною варіації геомагнітного поля. Так, авроральні іоносферні електрострумені (DP) та зворотні від них струми в середні широти будуть генерувати більші за амплітудою варіації на обсерваторіях «Львів» та «Київ», аніж на обсерваторії «Одеса», а  $S_q$ -система струмів, навпаки, оскільки обсерваторія «Одеса» розміщена ближче до фокуса  $S_q$ -системи струмів.

Дослідження показало, що варіації модуля поля на обсерваторіях однаково змінюються за фазою, але відрізняються за величиною. Повна напруженість поля зростає за майже прямолінійним законом. Швидкість росту модуля поля найбільша у LVV. На прямолінійну залежність накладаються коливання з періодами  $\sim 11$  і  $\sim 22$  роки. Можна припустити, що такі коливання пов'язані із сонячною активністю.

Вертикальна компонента поля змінюється аналогічним чином до  $T$ , але середня швидкість росту її за досліджуваній інтервал часу складала в LVV – 26 нТл/рік, в ODE – 25 нТл/рік, в KIV – 24 нТл/рік.

Зміни магнітного схилення більш складні. Магнітне схилення на території України зростало і тільки у 1968–1972 рр. незначно спало. Швидкість росту схилення змінювалась. За цим параметром досліджуваній 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. Як було показано вище, за даними обсерваторій Північної півкулі Землі період цієї квазисинусоїди приблизно 80 років. На магнітних обсерваторіях України спостерігали тільки частину цієї квазисинусоїди. Мінімальні значення  $H$ -компоненти прийняла в 1957–1959 рр., максимальне в 1977–1979 рр. Середня швидкість збільшення  $H$ -компоненти на цьому підінтервалі часу найбільша у LVV і найменша в ODE. Саме на цьому підінтервалі часу найменша середня швидкість зростання  $D$ -компоненти. Фаза спаду  $H$ -компоненти розпочалася в 1981 р. і тривала до 1990 р., найбільшою була в KIV і найменшою у LVV (на цьому підінтервалі часу розпочалося різке збільшення  $D$ -компоненти). Очевидно, що різниці в швидкостях росту  $H$ - і  $D$ -компонент на різних обсерваторіях викликані різними величинами телуричних струмів в підстилаючих поверхнях обсерваторій. Можна припустити, що ріст  $H$ -компоненти на одному інтервалі часу і спад на другому, а також різкі зміни швидкості росту  $D$ -компоненти на тих же підінтервалах часу пов'язані із сонячною, а відповідно, і магнітною активністю, тобто викликані зовнішніми джерелами.

Проведено аналіз середньомісячних значень  $H$ -,  $D$ -,  $Z$ -компонент по всіх, спокійних та збурених днях. Середньомісячні значення  $H_d$  завжди менші, аніж  $H_q$ , а  $H_a$  займає проміжну позицію. Це явище має фізичний зміст, оскільки збільшення магнітної активності відображається в зменшенні величини горизонтальної компоненти на досліджуваних обсерваторіях внаслідок розвитку магнітосферно-іоносферної системи струмів. На фоні росту  $H$ -компоненти з року в рік добре відслідковуються сезонні варіації як в  $H_d$  і  $H_a$ , так і в  $H_q$ , котрі є синфазними. Амплітуди сезонних змін найбільші в рівнодення і мінімальні в зимові та літні

місяці. Причина такого явища відома, оскільки інтенсивність інжекції сонячного вітру в магнітосферу найбільша в рівнодення. Спостерігалось відхилення  $H_q$  в сторону зменшення в березні–жовтні. Оскільки  $H_q$  вираховується в міжнародно-спокійні дні, коли магнітних збурень немає, тобто кільцевий струм слабкий і може давати на поверхні Землі зменшення  $H$ -компоненти на  $\sim 10$  нТл і це зменшення компенсується додатнім збуренням такої ж величини від струмів на магнітопаузі, то можна припустити, що такі зменшення  $H_q$  мають інше джерело.

Величина магнітного схилення ( $D$  – додатне при відхиленні магнітного меридіану на схід від географічного) за 1953–2008 рр. зростала і тільки в 1968–1972 рр. незначно спадала. Такий спад, імовірно, пов'язаний із джерком у вікових варіаціях схилення. 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 в рівнодення і мінімальна в літні місяці.

У підрозділі **4.3. Просторово-часова структура магнітного поля Землі території України: оцінка вкладу внутрішніх і зовнішніх джерел** оцінено вклад внутрішніх і зовнішніх джерел магнітного поля Землі в сумарне поле та його варіації з використанням насамперед результатів спостережень українських геомагнітних обсерваторій.

Внутрішнє магнітне поле Землі складається з головного й аномального магнітних полів. Головне магнітне поле Землі (поле ядра) складається з дипольної і недипольної частин і приймається за нормальне геомагнітне поле Землі  $V_{IGRF}$ . Воно переважно описується сферичним гармонічним рядом з певною кількістю гармонік, зазвичай 10–13. На це поле накладається аномальне магнітне поле, обумовлене магнітними джерелами в земній корі, а також індуковане магнітне поле за рахунок провідності і магнітної проникності порід літосфери.

Величину нормального поля  $V_{IGRF}$  було розраховано за моделлю IGRF 1945–2015 Model Coefficients 2015. Це поле в подальшому використано для оцінювання підмагнічуючого ефекту у віковій варіації магнітного поля Землі. За результатами спостережень і інтерпретації визначено, що найістотніше змінюється головне (нормальне) магнітне поле, а приріст для території України становить в середньому  $B_n = 1200$  нТл за останні 50 років. Згідно з даними KIV величина нормальної компоненти  $B_n$  за період з 1958 до 2008 р. має приріст 1256 нТл, для ODE – 1186 нТл, для LVV – 1343 нТл. Середньорічний приріст  $B_n$  відповідно має наступні величини: для KIV – 25,1 нТл/рік, для ODE – 23,8 нТл/рік, для LVV – 26,8 нТл/рік.

Для LVV, ODE та KIV розраховано індукційні аномалії (аномалії «підмагнічування»), інтенсивність яких визначається величиною намагнічуючого поля  $B_n$ . Розрахунки показали, що ця компонента поля за останні 50 років має величину: мінус 0,75 нТл для ODE, 2,25 нТл для KIV і 6,3 нТл для LVV.

В середніх широтах величину варіації від магнітосферних джерел  $\Delta_m$  можна обчислити в першому наближенні за формулою  $\Delta_m = D_{st} \cdot \cos\Phi$ , де  $\Phi$  – геомагнітна широта обсерваторії. Оскільки різниця геомагнітних широт українських обсерваторій становить близько  $3^\circ$ ,  $\Delta_m$  буде змінюватись у межах 0,003, що не виходить за похибку обчислень.

За даними українських геомагнітних обсерваторій вперше було проведено ідентифікацію зовнішніх джерел геомагнітних варіацій. Показано, що близько 80 % іррегулярних варіацій магнітного поля на території України під час магнітних бур генеруються магнітосферними джерелами і тільки їх п'ята частина має іоносферне походження.

У підрозділі **4.4. Оцінка вкладу індукційних струмів у вікову варіацію геомагнітного поля за даними українських геомагнітних обсерваторій** за даними геомагнітних обсерваторій України («Київ», «Львів», «Одеса») оцінено вклад магнітосферно-іоносферних та індукційних струмів у вікову варіацію магнітного поля Землі. Для цього було використано модель, в якій на внутрішнє «постійне» магнітне поле накладається зовнішнє «змінне» поле, а також враховано внесок зовнішніх джерел магнітосферно-іоносферної системи струмів.

Для виділення величини «змінного» поля від середньорічних величин компонент поля віднімалась величина поля, обчислена за моделлю IGRF. Середньорічні значення  $B_n$ -компоненти на обсерваторіях «Львів», «Київ», «Одеса» змінюються синфазно і амплітуди змін на обсерваторіях становлять: «Львів» - 112,6–199,3 нТл, «Київ» - 5,7–89,3 нТл, «Одеса» - 122,2–167,4 нТл. Відповідно, середньорічні значення  $B_z$ -компоненти змінюються синфазно також. Амплітуди змін  $B_z$ -компоненти на обсерваторії «Львів» становлять 140,6–224,6 нТл, «Київ» - 44,9–121,6 нТл, «Одеса» - 6,8–85,5 нТл. Ці зміни можна пояснити неоднорідним ходом нормального поля  $B_n$  та  $B_z$ , а також вкладом «змінних» полів від індукційних струмів у провідних шарах Землі, аномальним магнітним полем ( $\Delta B_a$ ) та «підмагнічуючим» ефектом, а також полем магнітосферно-іоносферної системи струмів.

Величина поля від магнітосферно-іоносферної системи струмів на обсерваторіях «Київ», «Львів», «Одеса» буде в першому наближенні однаковою, оскільки обсерваторії зміщені за широтою лише на  $\sim 3^\circ$ , а найближчі зовнішні джерела варіацій (іоносферні струми) розміщені на висотах більших 100 км. Величина індукційних струмів у струмопровідних шарах Землі для кожної обсерваторії буде різною і пропорційною провідності та магнітній проникності шарів земної кори в районі розташування обсерваторій, відповідно, різними будуть і варіації поля  $B$  та його компонент при тих же значеннях  $B_n$ .

Найбільший вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію спостерігається в магнітоактивні роки, найменший – в магнітоспокійні, тому для дослідження динаміки змін середньорічних значень поля від сонячної активності було використано середньомісячні  $BV^{mic}$  значення компонент магнітного поля Землі, порохований по всіх (A), збурених (D) та спокійних (Q) днях. Це дало можливість виключити сезонний вплив, вплив тривалості доби, розкид за широтою та ін. З отриманих значень було обчислено зміни за місяць  $\Delta BV^{mic}$ . Внесок у середньомісячне значення поля, поля індукційних струмів, буде залежати від кількості збурених та спокійних днів у цьому місяці, а отже, залежатиме від кількості енергії, що поступає в магнітосферу із сонячного вітру, тому  $BV^{mic}$  та  $\Delta BV^{mic}$  порівнювалась із зміною енергії, що поступила в магнітосферу із сонячного вітру. Для оцінки вкладу у вікову варіацію магнітного поля Землі індукційних

струмів, було використано  $V_z$ -компоненту поля  $V$  на обсерваторіях «Київ», «Львів», «Одеса», оскільки вона містить найбільше інформації про внутрішні джерела поля.

Форма кривих  $VB_z^{\text{mic}}$  для кожної з обсерваторій є подібною. Максимальні зміни енергії у травні 1967 р., травні 1968 р. та листопаді 1968 р. призвели до екстремальних значень  $VB_z^{\text{mic}}$  на всіх обсерваторіях. Мінімальні зміни енергії  $\Delta E$  призводять до сповільнення ходу  $VB_z^{\text{mic}}$  на усіх обсерваторіях лише через деякий час. Наприклад, у листопаді 1967 р. зменшення енергії  $\Delta E = -205 \cdot 10^{14}$  Дж викликало зсув екстремуму кривих  $VB_z^{\text{mic}}$  лише в наступному місяці на обсерваторії «Львів», а на обсерваторіях «Київ» та «Одеса» – сповільнило хід  $VB_z^{\text{mic}}$ . Зсув за фазою між енергією  $\Delta E$ , що поступила в магнітосферу, та  $VB_z^{\text{mic}}$  на усіх обсерваторіях є мінімальним у збурені дні і максимальним в спокійні періоди. Це свідчить про те, що збільшення активності Сонця викликає збільшення величин  $VB_z^{\text{mic}}$  у цей час.

Пораховано максимальні та мінімальні середньомісячні величини  $VB_z^{\text{mic}}$  для обсерваторій «Львів», «Київ» та «Одеса» за 1967–1969 рр. Амплітуди  $VB_z^{\text{mic}}$  по всіх днях приймають максимальні значення 31–37 нТл, мінімальні – 8–16 нТл. Порівнявши їх з величинами  $VB^{\text{mic}}$ , обчисленими за моделлю IGRF (24–26 нТл), отримаємо, що магнітосферно-іоносферна система та індукційні струми вкладають у вікову варіацію  $\pm(7-12)$  нТл/рік, тобто вони впливають на швидкість росту поля  $VB$  шляхом збільшення або зменшення швидкості зміни головного магнітного поля і становлять  $\sim 1/3$  змін  $VB$  на досліджуваних обсерваторіях.

Проаналізувавши середньомісячні прирости  $V_z$ -компоненти поля ( $\Delta VB^{\text{mic}}$ ) та середньомісячні зміни енергії  $\Delta E$  на обсерваторіях «Одеса», «Львів», «Київ» за 1975–1980 рр. можна сказати, що зменшення величини енергії, яка поступила в магнітосферу, призводить до зменшення швидкості росту вікових варіацій в даному місяці на усіх обсерваторіях, збільшення енергії – до збільшення швидкості росту вікових варіацій із певною затримкою. Амплітуди змін  $\Delta VB^{\text{mic}}$  різні, оскільки різними є індукційні струми.

Амплітудні значення  $\Delta VB^{\text{mic}}$  для досліджуваних обсерваторій складають  $\pm(9-11)$  нТл/міс у спокійний період. Це свідчить про те, що за відсутності збурених періодів індукційні струми практично не впливають на швидкість змін вікових варіацій, тобто на вікові варіації має вплив лише головне магнітне поле Землі. У збурений період амплітуди  $\Delta VB^{\text{mic}}$  зростають у 1,5–2 рази порівняно із спокійним періодом, змінюючи при цьому знак, а отже і швидкість  $VB$  буде змінюватись в залежності від напрямку та величини поля магнітосферно-іоносферної системи струмів, що накладається на головне магнітне поле.

**У п'ятому розділі «Удосконалення методів спостережень на геомагнітних обсерваторіях і побудова регіональних моделей геомагнітного поля** розроблено метод виключення завад на геомагнітних обсерваторіях, а також як будувалась нова модель геомагнітного поля для європейського регіону.

У підрозділі **5.1. Метод виключення завад від промислових об'єктів** описано як розроблявся метод нівелювання завад, що створюються електрифікованими залізними дорогами. Апробацію цього методу проведено на геомагнітних обсерваторіях «Львів» (LVV) та «Бельск» (BEL).

Геомагнітні обсерваторії повинні представляти варіаційні дані, вільні від штучних збурень, оскільки вважається, що ці дані відображають тільки природні процеси. Тому обсерваторії розміщують переважно в місцях, далеких від населених пунктів, заводів і об'єктів, зв'язаних з генерацією електричного струму, транспортом та ін. Особливо слід уникати залізниць, електрифікованих постійним струмом.

З огляду на зазначене вище були споруджені геомагнітні обсерваторії «Львів» (LVV) (рік заснування 1932) та «Бельск» (BEL) (рік заснування 1965). Однак поблизу цих обсерваторій в 1971 і 1968 роках відповідно були проведені електрифіковані постійним струмом залізничні колії. Це призвело до появи завад в записах варіацій магнітного поля Землі на цих обсерваторіях. Через те, що електрифіковані залізниці генерують додаткові варіації, слід очікувати більшу магнітну активність, виражену К-індексом, особливо для його малих значень. Для того, щоб це виправити, було запропоновано новий метод.

Вважаючи, що зашумлені обсерваторські дані складаються з природного (nat) і штучного (art) сигналів

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^o(\omega) = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^{nat}(\omega) + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^{art}(\omega),$$

А природній сигнал можна відтворимо через дані певної(референтної) станції, на якій немає завад за допомогою передаточної функції, названою горизонтальним магнітним тензором НМТ

$$\mathbf{HMT} = \begin{pmatrix} HMT_{xx} & HMT_{xy} \\ HMT_{yx} & HMT_{yy} \end{pmatrix}(\omega),$$

Тоді можна записати

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^{nat}(\omega) = \begin{pmatrix} HMT_{xx} & HMT_{xy} \\ HMT_{yx} & HMT_{yy} \end{pmatrix}(\omega) \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^R(\omega).$$

Розв'язавши ці рівняння, знайдемо реконструйовані дані для обсерваторії із завадами.

Як референтну станцію було вибрано станцію «Сувалки» на північному сході Польщі. Вона розміщена на відстані 300 км від Бельська і 450 км від Львова. На станції не спостерігається завад.

Порівняння К-індексу, визначеного за оригінальними та реконструйованими даними, покращує результат на 29% на обсерваторії «Львів» і на 14 % на обсерваторії «Бельськ».

У підрозділі **5.2. Моделювання регіонального магнітного поля з використанням сферичних функцій** апробовано метод побудови регіонального магнітного поля запропонованого в роботах (Dzuman, 2018; Сумарук та ін., 2019).

Для побудови регіональної моделі геомагнітного поля можна використовувати сферичні функції Лежандра цілого степеня, але дійсного порядку. Існує багато методів, застосування яких ґрунтується на використанні такої системи функцій, наприклад SCHA.

В роботах (Dzhuman, 2018; Сумарук та ін., 2019) запропоновано для моделювання регіонального геомагнітного поля використовувати таку базову систему функцій, якій властива ортогональність на довільній сферичній трапеції, що є значною перевагою порівняно зі всіма існуючими методами. Для апробації методу було використано дані геомагнітних обсерваторій Центральної Європи.

В якості глобальної моделі геомагнітного поля використано модель International Geomagnetic Reference Field (IGRF) на епоху 2010. Рівняння цієї моделі має вигляд:

$$V(r, \theta, \lambda, t) = R \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^{n+1} \left\{ \bar{g}_{nm}(t) \cos(m\lambda) + \bar{h}_{nm}(t) \sin(m\lambda) \right\} \bar{P}_{nm}(\cos \theta),$$

де  $R = 6371,2$  км,  $n_{\max} = 13$ .

Для моделювання аномальних значень компонент геомагнітного потенціалу  $\Delta B_{xm}, \Delta B_{ym}, \Delta B_{zm}$  використано формули (Dzhuman, 2018; Сумарук та ін., 2019):

$$\begin{aligned} \Delta B_{xm} &= \sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{m=0}^k \left( \frac{R}{r} \right)^{n_k+2} \left\{ C_{km} \cos\left(2\pi n \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}\right) + S_{km} \sin\left(2\pi n \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}\right) \right\} P'_{km}(\theta), \\ \Delta B_{ym} &= -\frac{2\pi}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{m=0}^k \left( \frac{R}{r} \right)^{n_k+2} m \left\{ -C_{km} \sin\left(2\pi n \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}\right) + S_{km} \cos\left(2\pi n \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}\right) \right\} \frac{P_{km}(\theta)}{\sin(\theta)}, \\ \Delta B_{zm} &= -\sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{m=0}^k \left( \frac{R}{r} \right)^{n_k+2} (n_k + 1) \left\{ C_{km} \cos\left(2\pi n \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}\right) + S_{km} \sin\left(2\pi n \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}\right) \right\} P_{km}(\theta), \end{aligned}$$

де  $\lambda$  – довгота,  $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$  – мінімальне і максимальне значення довгот вершин трапеції.

Базові функції для трапеції з координатами вершин  $\theta_{\min}, \theta_{\max}, \lambda_{\min}, \lambda_{\max}$  мають вигляд (Dzhuman, 2018)

$$\begin{aligned} C_{km}(\theta, \lambda) &= P_{km}(\theta) \cos\left(2\pi n \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}\right), \\ S_{km}(\theta, \lambda) &= P_{km}(\theta) \sin\left(2\pi n \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}\right), \end{aligned}$$

тоді як  $P_{km}(\theta)$  можна знайти з наступних співвідношень

$$\left. \begin{aligned} P_{km}(\theta) &= \sin^m(\theta - \theta_{\min}) \cdot F\left(m - n_k, n_k + m + 1, 1 + m, \frac{1 - \cos(\theta - \theta_{\min})}{2}\right), \text{ if } \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{mean} \\ P_{km}(\theta) &= (-1)^{k+m} \sin^m(\theta_{\max} - \theta) \cdot F\left(m - n_k, n_k + m + 1, 1 + m, \frac{1 - \cos(\theta_{\max} - \theta)}{2}\right), \text{ if } \theta_{mean} \leq \theta \leq \theta_{\max} \end{aligned} \right\}$$

$F$  – це позначення гіпергеометричного ряду [Смирнов, 1953]:

$$F(a, b, c, z) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \prod_{l=0}^{k-1} \frac{(a+l)(b+l)}{(1+l)(c+l)} \right] z^k = 1 + \frac{ab}{c} \frac{z}{1!} + \frac{a(a+1)b(b+1)}{c(c+1)} \frac{z^2}{2!} + \dots$$

Вирази для похідних  $\frac{dP_{km}(\theta)}{d\theta}$  мають наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_{km}(\theta)}{d\theta} &= m \cdot \operatorname{ctg}(\theta - \theta_{\min}) P_{km}(\theta) + \frac{1}{2} \frac{(m - n_k)(n_k + m + 1)}{1 + m} \sin^{m+1}(\theta - \theta_{\min}) \cdot \\ &\quad \cdot F\left(m - n_k + 1, n_k + m + 2, 2 + m, \frac{1 - \cos(\theta - \theta_{\min})}{2}\right), \text{ if } \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\text{mean}} \\ \frac{dP_{km}(\theta)}{d\theta} &= -m \cdot \operatorname{ctg}(\theta_{\max} - \theta) P_{km}(\theta) + (-1)^{k+m+1} \cdot \frac{1}{2} \frac{(m - n_k)(n_k + m + 1)}{1 + m} \sin^{m+1}(\theta_{\max} - \theta) \cdot \\ &\quad \cdot F\left(m - n_k + 1, n_k + m + 2, 2 + m, \frac{1 - \cos(\theta_{\max} - \theta)}{2}\right), \text{ if } \theta_{\text{mean}} \leq \theta \leq \theta_{\max} \end{aligned} \right\}$$

Використавши метод найменших квадратів і ввівши параметр регуляризації Тихонова для стабілізації розв'язку ( $\alpha = 0,01$ ), були отримані невідомі коефіцієнти моделі  $\bar{c}_{km}$  і  $\bar{s}_{km}$ . За коефіцієнтами  $\bar{c}_{km}$  і  $\bar{s}_{km}$  обчислено модельні значення  $\Delta B_{xm}, \Delta B_{ym}, \Delta B_{zm}$

Обчислено дисперсію визначених коефіцієнтів моделі. Стандартне відхилення аномальних значень компонент геомагнітного поля і їх модельних значень різняться в межах 20 %, тоді як стандартне відхилення їх різниць не перевищує 30%.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота виконана з метою дослідження просторово-часового розподілу вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх та внутрішніх джерел і оцінки внеску цих джерел залежно від параметрів сонячної та геомагнітної активності на основі даних геомагнітних обсерваторій світу, а також даних міжнародних центрів по сонячно-земних зв'язках.

Запропонована нова методика розділення впливу зовнішніх і внутрішніх джерел на вікові варіації геомагнітного поля дасть можливість покращити вже існуючі моделі магнітосфери та іоносфери. Це, в свою чергу, дасть змогу науковцям покращити моделі джерел головного магнітного поля Землі.

Основними результатами, отриманими автором в дисертацію, є:

1. Досліджено зміну вікових варіацій в північній та південній полярних шапках Землі. Показано, що у високих широтах вікові варіації більше відображаються у вертикальній складовій, а в низьких широтах – у горизонтальній складовій повного вектора напруженості геомагнітного поля. Вікові варіації на всіх широтах мають дві компоненти: одна пов'язана з внутрішніми джерелами, інша - із зовнішніми. Внутрішніми джерелами є струми на границі ядро - мантія, а також струми в тектоносфері. Зовнішніми джерелами є струми в магнітосфері та іоносфері.

2. Розроблено методику розділення вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх та внутрішніх джерел за допомогою довгих рядів спостережень на геомагнітних обсерваторіях, розміщених на різних широтах. Суть методики полягає в знаходженні різниці між згладженими та оригінальними даними вікових варіацій. Згладжування проводиться усередненням оригінальних даних за допомогою 3 - та 11 - річних біжучих фільтрів.

3. Оцінено внесок зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля. Вперше показано, що величина внеску залежить від збуреності геомагнітного поля.

У збурені дні величина вкладу у вікову варіацію геомагнітного поля співрозмірна з величиною вікової варіації.

4. За даними геомагнітних обсерваторій Північної та Південної півкуль було проаналізовано вікові варіації  $BB(T)$ , згладжені 3- і 11-річним біжучим вікном. Визначено роки змін  $BB(T)$  та їх перших похідних. Ці роки було названо опорними. Такими роками є 1907, 1920, 1936, 1947, 1960, 1969, 1986 і 2003. Показано, що опорні роки співпадають з екстремумами сонячної активності.

5. За даними геомагнітних обсерваторій Європи визначено часові зміни вікових варіацій напруженості геомагнітного поля і його компонент та встановлено, що вікові варіації складаються з двох компонент: квазіпостійної від внутрішніх джерел і змінної, яка пов'язана з зовнішніми джерелами. Величина і знак компоненти від зовнішніх джерел добре корелює з величиною і знаком великомасштабного магнітного поля Сонця і, відповідно, з величиною і знаком середньорічної південної компоненти міжпланетного магнітного поля.

6. Аналіз даних геомагнітних обсерваторій, що розміщені на Африканській тектонічній плиті показав, що вікові варіації на Африканській тектонічній плиті мають квазіпостійну ( $BB_1$ ) та змінну ( $BB-BB_1$ ) складові.  $BB_1$  відображають дію джерел на границі ядро-мантія та джерел, пов'язаних з тектонікою регіону. В тектонічно більш активній східній частині АФ-плити  $BB$  більш динамічні. Складова  $BB-BB_1$  відображає поле, пов'язане із зовнішніми джерелами.

7. За даними світових магнітних обсерваторій в 2003 році встановлено, що величина вкладу в горизонтальну та вертикальну компоненти залежить від широти місця спостереження. В низьких широтах та на екваторі вклад у горизонтальну компоненту вікових варіацій дорівнює приблизно «-»20 нТл. На полюсах вклад в вертикальну складову також приблизно рівний «±»20 нТл.

8. За даними геомагнітних обсерваторій INTERMAGNET і МЦД по сонячно-земній фізиці детально проаналізовані зміни сонячної і геомагнітної активності в 19-24 циклах сонячної активності. Показано, що різке зменшення геомагнітної активності викликане зменшенням величини великомасштабного магнітного поля Сонця та наближенням до мінімуму 200-річного циклу сонячної активності в 2050–2060 рр.

9. Пораховано внесок зовнішніх джерел у варіацію під час надзвичайно великих магнітних бур 29–31 жовтня 2003 р. і 20–21 листопада 2003 р. Кільцевий магнітосферний струм DR разом зі струмом в хвості магнітосфери DP та струмом на магнітопаузі DCF під час магнітної бурі дають найбільший внесок у варіацію поля ~80 % (в середньому DR 55–74 %, DCF 11–23 %). Внесок авроральних струмів та їх зворотних струмів у варіації поля середніх широт складають 12–27 %.

10. Вперше пораховано внесок зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля за даними геомагнітних обсерваторій України. Показано, що величина вкладу залежить від геомагнітної активності. У збурені роки амплітуда змін вікових варіацій зростає в 1,5–2 рази.

11. Розроблено новий метод усунення завад при реєстрації складових геомагнітного поля на обсерваторії, що створюються електрифікованими постійним струмом залізницями, який базується на знаходженні частотно-передаточної функції



між співвідношеннями горизонтальних компонент на обсерваторії, записи якої зашумлені завадами, та обсерваторії, яка не знає впливу таких завад.

12. Побудован модель регіонального геомагнітного поля на території Центральної Європи, з використанням даних геомагнітних обсерваторій новим методом, суть якого полягає в тому, що для моделювання регіонального геомагнітного поля запропоновано використовувати таку базову систему функцій, якій властива ортогональність на довільній сферичній трапеції.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті в наукових виданнях

1. **Sumaruk, Yu.** (2001). On external sources of secular variations of the Earth's magnetic field. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 31(1), 353–354.
2. **Сумарук, Ю.П.** (2001). Кільцевий струм в магнітосфері та його асиметрія в час великої магнітної бурі. *Геофиз. журн.*, 23(2), 101–105.
3. Semenov, V.Y., Jozwiak, W., Pek, J. & CEMES Organizing Committee: Adam A., ..., **Sumaruk Yu.** et al. (2003). Deep Electromagnetic Soundings Conducted in Trans-European Suture Zone. *Eos, Transaction, American Geophysical Union*, 84(52), 581–584.
4. Сумарук, Т.П., & **Сумарук, Ю.П.** (2004). Про рівень відліку поля нерегулярних магнітних варіацій в середніх широтах. *Геофиз. журн.*, 26(6), 139–146.
5. Сумарук, Т.П., & **Сумарук, Ю.П.** (2005). Про джерела  $S_q$ -варіацій геомагнітного поля в середніх широтах. *Геофиз. журн.*, 27(2), 299–303.
6. Сумарук, Т.П., & **Сумарук, Ю.П.** (2006). До питання енергетики магнітосфери на різних рівнях сонячної та магнітної активності. *Геофиз. журн.*, 28(3), 116–121.
7. **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, Т.П. (2007). Геомагнітна активність та динаміка змін клімату в регіоні Західної України у фазу спаду 22-го та фазу росту 23-го циклів сонячної активності. *Геофиз. журн.*, 29(2), 157–166.
8. **Sumaruk, Yu.** (2007). On separation of the secular variations of different origins. In *Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences* (Monographic volume C-99(398), pp. 252–259).
9. **Сумарук, Ю.П.** (2008). Геомагнітна активність та динаміка секторної структури ММП. *Космічна наука і технологія*, 14(2), 84–91.
10. **Сумарук, Ю.П.** (2007/2008). Діагностика азимутальної компоненти міжпланетного магнітного поля за даними антарктичної магнітної обсерваторії. *Укр. антаркт. журн.*, (6/7), 43–48.
11. **Сумарук, Ю.П.** (2008). Варіації геомагнітного поля від магнітосферних та іоносферних джерел під час дуже великої магнітної бурі 20–21 листопада 2003 року. *Геофиз. журн.*, 30(6), 127–130.
12. Сумарук, П.В., **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, Т.П. (2009). Геомагнітна обсерваторія «Львів»: минуле і сучасність. *Геофиз. журн.*, 31(5), 146–151.
13. **Sumaruk, Yu.** (2010). Secular variations at Ukrainian magnetic observatories. *Геофиз. журн.*, 32(4), 177–179.

14. Лаба, І.С., Підстригач, І.Я., **Сумарук, Ю.П.**, Сумарук, Т.П., Сумарук, П.В., & Баран, О.А. (2010). Надзвичайна сонячна і геомагнітна активність в жовтні–листопаді 2003 року. *Журн. фіз. досліджень*, 4(3), 3902–3913.
15. **Сумарук, Ю.П.** (2011). Залежність величини варіації геомагнітного поля від початкового стану магнітосферно-іоносферної системи. *Космічна наука і технологія*, 17(17), 39–42.
16. **Sumaruk, Yu.**, & Reda, J. (2011). Secular variation of the geomagnetic field and solar activity. *Геофиз. журн.*, 33(4), 134–141. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v33i4.2011.116902.
17. **Sumaruk, Yu.**, Starostenko, V.I., & Legostaeva, O.V. (2011). Geomagnetic observatories of Ukraine in the global Network INTERMAGNET. *Russian Journal of Earth Sciences*, 12, ES2002. doi:10.2205/2011ES000506.
18. **Сумарук, Ю.П.** (2011). Довготривалі зміни геомагнітного поля за даними спостережень на магнітних обсерваторіях України. *Геофиз. журн.*, 33(5), 120–127. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v33i5.2011.116873.
19. Семенов, В.Ю., Возар, Я., **Сумарук, Ю.П.**, & Ладанивский Б.Т. (2011). Изменчивость положения оси симметрии кольцевого магнитосферного тока. *Геодинаміка*, (2), 284–286.
20. Orliuk, M.I., Romenets, A.A., Sumaruk, T.P., & **Sumaruk, Yu.P.** (2012). Geomagnetic field of Ukraine: estimation of internal and external sources contribution. *Odessa Astronomical Publications*, 25(2), 102–108.
21. Орлюк, М.И., Роменец, А.О., Сумарук, П.В., **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, Т.П. (2012). Пространственно-временная структура магнитного поля Земли территории Украины. Оценка вклада внутренних и внешних источников. *Геофиз. журн.*, 34(3), 137–144. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v34i3.2012.116651.
22. Сумарук, Т.П., Сумарук, П.В., & **Сумарук, Ю.П.** (2012). Геомагнітна активність та енергетика магнітосфери у 19–24 циклах сонячної активності. *Космічна наука і технологія*, 18(3), 84–91.
23. Neska, A., Reda, J., Neska, M., & **Sumaruk, Yu.** (2013). On the influence of DC railway noise on variation data from Belsk and Lviv magnetic observatories. *Acta Geophysica*, 61(2), 385–403. doi:10.2478/s11600-012-0058-0.
24. **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, П.В. (2013а). Особливості вікових варіацій геомагнітного поля у північній полярній частині Землі. *Геофиз. журн.*, 35(2), 137–145. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111357.
25. **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, Т.П. (2013б). Динаміка вікових варіацій геомагнітного поля в полярних шапках Землі. *Геодинаміка*, (2), 335–337.
26. **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, Т.П. (2013в). Про вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля. *Доп. НАН України*, (12), 107–113.
27. Орлюк, М.И., Сумарук, Т.П., **Сумарук, Ю.П.**, & Роменец, А.О. (2014). Оцінка вклада індукційних струмів у вікову варіацію геомагнітного поля за даними українських магнітних обсерваторій. *Геофиз. журн.*, 36(2), 111–119. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v36i2.2014.116124.

28. Гвишиани, А.Д., Старостенко, В.И., **Сумарук, Ю.П.**, Соловьев, А.А., & Легостаева, О.В.(2015). Уменьшение солнечной и геомагнитной активности с 19-го по 24-й цикл. *Геомагнетизм и аэрономия*, 55(3), 314–322.
29. **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, П.В. (2016а). Часові зміни вікових варіацій геомагнітного поля в Європі. *Космічна наука і технологія*, 22(3), 32–40.
30. **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, Т.П. (2016б). Вікові варіації геомагнітного поля в Антарктиді. *Геофиз. журн.*, 38(2), 120–128. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v38i2.2016.107771.
31. **Сумарук, Ю.П.**, Сумарук, Т.П., & Реда, Я. (2016). Динаміка вікових варіацій з часом. *Геофиз. журн.*, 38(6), 152–159. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91884.
32. **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, Т.П. (2017). Вікові варіації геомагнітного поля на Африканській тектонічній плиті. *Геофиз. журн.*, 39(2), 96–80. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v39i2.2017.97375.
33. Neska, A., Reda, J., Neska, M., & **Sumaruk, Yu.** (2018). On the relevance of source effects in geomagnetic pulsations for induction soundings. *Annals of Geophysics*, 36(2), 337—347. doi:10.5194/angeo-36-337-2018.
34. Orliuk, M., **Sumaruk, Yu.**, & Neska, A. (2018). Geomagnetic field secular variation changes at European magnetic observatories. *Conrad Observatory Journal (a special issue)*, (X), P. 28.
35. Sobitnyak, L.I., Ryabov, M.I., Sukharev, A.L., Orlyuk, M.I., Romenets, A.O., & **Sumaruk, Yu.P.** (2018). The catalog of magnetic storms for Odessa magnetic anomaly zone. *Odessa astronomical publication*, 31(6), 163–166.
36. **Сумарук, Ю.П.**, Янків-Вітковська, Л.М., & Джуман, Б.Б. (2019). Моделювання регіонального магнітного поля з використанням сферичних функцій: теоретичний аспект. *Геофиз. журн.*, 41(1), 180–191. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158872.
37. **Сумарук, Ю.П.**, Янків-Вітковська, Л.М., & Джуман, Б.Б. (2019). Моделювання регіонального магнітного поля з використанням сферичних функцій: практичний аспект. *Геофиз. журн.*, 41(6), 165–172. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190073.

### Тези доповідей

1. **Sumaruk, Yu.P.** (2003). Methodology of magnetic observations at “Lviv” magnetic observatory: *Program and abstracts for Workshop on repeat magnetic stations at magnetic observatory Niemegek.* <http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/eurepstat.html>.
2. **Sumaruk, Yu.**, & Sumaruk, P. (2006). On separation of the secular variations from different origin: *XIIIth IAGA Workshop on geomagnetic observatory instruments, data Acquisition and Processing. Belsk, Poland.* Abstract vol. P. 106.

3. **Сумарук, Ю.П.** (2008). Вариации геомагнитного поля от магнитосферных и ионосферных источников во время очень большой бури 20 ноября 2003 года: *Сб. тез. 8-й Укр. конф. по космическим исследованиям, Евпатория, 1–7 сентября 2008г.* С. 28.
4. Orlyuk, M.I., Sumaruk, T.P., Sumaruk, P.V., & **Sumaruk, Yu.P.** (2008). Geomagnetic observatories of the Ukraine: regular observations and scientific investigation of the Earth's magnetic field: *The 3<sup>rd</sup> anniversary Symposium GeObMag 2008 "Surlary national geomagnetic observatory "Liviu Constantinescu" 65 years of continuous work", Program and Abstracts, Bucharest, Romania, October 16–18, 2008.* P. 49.
5. **Sumaruk, Yu.**, & Reda, J. (2009). Secular variations of the geomagnetic field and solar activity: *IAGA 11<sup>th</sup> Scientific Assembly. Program and Abstracts. Sopron, Hungary.*
6. **Сумарук, Ю.П.** (2010). Залежність величини варіацій геомагнітного поля від початкового стану магнітосферно-іоносферної системи: *10<sup>th</sup> Ukrainian conference on space research. August 30 – September 3 2010, Yevpatoria, Crimea, Ukraine.* P. 106.
7. Старостенко, В.И., Легостаева, О.В, & **Сумарук, Ю.П.** (2011). INTERMAGNET в Україні: *Международ. конф. «Искусственный интеллект в изучении магнитного поля Земли. Российский сегмент INTERMAGNET» 26–28 января 2011 г., Углич, Россия.*
8. Orliuk, M.I., Romenets, A.O., **Sumaruk, Yu.P.**, & Sumaruk, T.P. (2011). Space-temporal characteristic of the magnetic field of the Ukraine: *5<sup>th</sup> MagNetE Workshop on European geomagnetic repeat station survey 2009–2010. Rome 9–11 May 2011* (pp. 16–17). Program and abstract.
9. Сумарук, Т.П., & **Сумарук, Ю.П.** (2011). Геомагнітна активність в кінці 23-го та на початку 24-го циклу сонячної активності: *11<sup>th</sup> Ukrainian conference on space research. August 29 – September 2 2011, Yevpatoria, Crimea, Ukraine.* P. 57.
10. Semenov, V.Yu., Vozar, J., & **Sumaruk, Yu.P.** (2012). Diurnal precession of the pole of the effective magnetosphere currents: *XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, June 4–14, 2012, Royal Institute and Observatory of the Navy San Fernando, Cádiz, Spain.* Abstract vol. P. 81.
11. Орлюк, М.И., Роменец, А.А., Сумарук, Т.П., & **Сумарук, Ю.П.** (2012). Геомагнитное поле Украины: оценка вклада внутренних и внешних источников: *12<sup>th</sup> Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmophysics, Radio-Astronomy and Astrobiology", August 20–26, 2012, Odessa, Ukraine* (pp. 19–20). Program and Abstracts.
12. Старостенко, В.И., Орлюк, М.И., Роменец, А.А., & **Сумарук, Ю.П.** (2012). Пространственно-временная структура магнитного поля Земли на ее поверхности и в ближнем космосе: *12-та Укр. конф. з космічних досліджень 3–7 вересня 2012 р., Євпаторія, Крим, Україна.* С. 47.
13. Soloviev, A., Gvishiani, A., **Sumaruk, Y.**, & Starostenko, V. (2012). Russian-Ukrainian Geomagnetic Data Center: *23<sup>rd</sup> International CODATA Conference "Open Data & Information for A Changing Planet" 28–31 October 2012, Taipei, Taiwan.* Overview Program. P. 23.

14. Starostenko, V.I., **Sumaruk, Yu.P.**, & Legostaeva, O.V. (2013). Investigation of magnetic Field of the Earth and Russian-Ukrainian Segment of Intermagnet: *Partnership conference "Geophysical observatories, multifunctional GIS and data mining"*, 30 September – 3 October 2013, Kaluga, Russia. CD-ROM.
15. **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, Т.П. (2013). Динаміка вікових варіацій магнітного поля в полярних шапках Землі: *V Міжнар. наук. конф. «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища» 1–4 жовтня 2013 р. Львів, Україна.*
16. Сумарук, Т.П., & **Сумарук, Ю.П.** (2014). Особливості сонячної та геомагнітної активності у 19–24 сонячних циклах: *Тез. доп. 14-ї укр. конф. з космічних досліджень, 8–12 вересня 2014 р., Ужгород.* С. 30.
17. Сумарук, Т.П., & **Сумарук, Ю.П.** (2015). Часові зміни вікових варіацій геомагнітного поля в Європі: *Тез. доп. 15-ї укр. конф. з космічних досліджень, 24–28 серпня 2015 р., Одеса.* С. 25.
18. Орлюк, М.І., **Сумарук, Ю.П.**, Сумарук, Т.П., & Реда, Я. (2016). Динаміка фокусів вікових варіацій в Європі в другій половині ХХ століття: *Тез. доп. 16-ї Укр. конф. з космічних досліджень, 22–27 серпня 2016 р., Одеса.* С. 36.
19. **Sumaruk, Yu.**, & Sumaruk, T. (2016). Dynamics of the time changes of the geomagnetic secular variations: *XVIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data acquisition and Processing September 4–10, 2016, Dourbes, Belgium.* Abstracts. P. 86.
20. Сумарук, Т., & **Сумарук, Ю.** (2016). Вікові варіації геомагнітного поля на Африканській тектонічній плиті: *Матер. VI Міжнар. наук. конф. «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища», 20–23 вересня, 2016 р., Львів* (С. 263–265).
21. **Сумарук, Ю.П.**, & Сумарук, П.В. (2017). 22-річні хейлівські цикли сонячної активності та вікові варіації геомагнітного поля: *Міжнар. наук. конф. «Астрономічна обсерваторія Львівської політехніки: історія і сучасність», 16–17 листопада, 2017 р., Львів, Україна.* Програма конференції.
22. Orlyuk, M., **Sumaruk, Yu.**, & Neska, A. (2018). Geomagnetic field secular variation changes at the European magnetic observatories: *XVIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, June 24–29, 2018, Conrad Observatory of the Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Austria.* <https://cobs.zamg.ac.at/iaga2018/index.php/program/scientific-program>.
23. **Sumaruk, Yu.**, & Sumaruk, P. (2018). Solar and geomagnetic activity at 19–24 cycles: *XVIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, June 24–29, 2018, Conrad Observatory of the Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Austria.* <https://cobs.zamg.ac.at/iaga2018/index.php/program/scientific-program>.
24. Джуман, Б.Б., **Сумарук, Ю.П.**, & Янків-Вітковська, Л.М. (2018). Побудова регіонального магнітного поля з використанням сферичних функцій: *Тез. доп. 18-ї Укр. конф. з космічних досліджень, 17–20 вересня 2018 р., Київ.* С. 55.
25. Ryabov, M.I., Sobitnyak, L.I., Sukharev, A.L. Orlyuk, M.I., Romenets, A.O., **Sumaruk, Yu.P.**, & Pilipenko, A.A. (2020). Application of the catalog of magnetic storms

for the analysis of monitoring data for radio source fluxes at RT URAN-4 in the magnetic anomaly zone: 20<sup>th</sup> Gamow Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology” 9–20 August, 2020, Odessa, Ukraine. Abstracts. P. 25.

## АНОТАЦІЯ

*Сумарук Ю.П.* Просторово-часовий розподіл вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх та внутрішніх джерел. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика (103 – Науки про Землю). – Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота виконана з метою дослідження просторово-часового розподілу вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх та внутрішніх джерел та оцінки вкладу цих джерел в залежності від параметрів сонячної та геомагнітної активності на основі даних геомагнітних обсерваторій світу, а також даних міжнародних центрів по сонячно-земних зв'язках.

Дослідження вікових варіацій геомагнітного поля в різних регіонах земної поверхні, показали наявність короткоперіодних, циклічних і довгоперіодних змін. Джерелом короткоперіодних і циклічних змін є іоносферні та магнітосферні струми, пов'язані із сонячною активністю. Довгоперіодні вікові варіації мають джерела як зовні, так і всередині Землі. Довгоперіодна варіація від внутрішніх джерел мало змінюється з часом. Величина ж її від зовнішніх джерел змінюється за квазісинусоїдальним законом зі зміною сонячної активності.

Вперше розроблено методику розділення вікових варіацій геомагнітного поля від зовнішніх і внутрішніх джерел. Завдяки цьому пораховано вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію, що залежить від сонячної і геомагнітної активності. В збурені періоди цей вклад є співрозмірний величині вікової варіації.

**Ключові слова:** магнітне поле Землі, вікові варіації, сонячна й геомагнітна активність, геомагнітні обсерваторії, магнітні бурі.

## ANNOTATION

*Sumaruk Yu.P.* Spatial-temporal distribution of secular variations of the geomagnetic field from external and internal sources. - Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Thesis for a doctor's degree in physical and mathematical sciences, specialty 04.00.22 – geophysics (103 – Earth' Sciences). – S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is designed to study the spatial-temporal distribution of secular variations of the geomagnetic field from external and internal sources and to evaluate the

contribution of these sources depending on the parameters of solar and geomagnetic activity based on data from geomagnetic observatories around the world as well as on those from international centers investigating solar-terrestrial communications.

Studies of secular variations of the geomagnetic field in different regions of the Earth's surface have shown the presence of short-term, cyclic and long-term changes. The sources of short-term and cyclical changes are ionospheric and magnetospheric currents associated with solar activity. Long-term secular variations have sources both outside and inside the Earth. Long-term variation from internal sources changes little over time. Its magnitude from external sources varies according to the quasi-sinusoidal law with a change in solar activity.

For the first time a method of separating a secular variations of the geomagnetic field from external and internal sources was developed. Due to that, the contribution of external sources to the secular variation, which depends on solar and geomagnetic activity, is calculated. In turbulent periods, this contribution is proportional to secular variation value.

**Key words:** magnetic field of the Earth, secular variations, solar and geomagnetic activity, geomagnetic observatories, magnetic storms.

## АННОТАЦИЯ

*Сумарук Ю.П.* Пространственно-временное распределение вековых вариаций геомагнитного поля от внешних и внутренних источников. – Квалификационный научный труд на правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика (103 – Науки о Земле). – Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа выполнена с целью исследования пространственно-временного распределения вековых вариаций геомагнитного поля от внешних и внутренних источников и оценки вклада этих источников в зависимости от параметров солнечной и геомагнитной активности на основе данных геомагнитных обсерваторий мира и международных центров по солнечно-земным связям.

По данным высокоширотных обсерваторий исследованы вековые вариации геомагнитного поля в северной полярной шапке Земли со сложной пространственной и временной структурой и с источниками, находящимися как снаружи, так и внутри Земли. Выделены вековые вариации от внешних и внутренних источников. Источником короткопериодных и циклических вариаций являются ионосферные и магнитосферные токи, связанные с солнечной активностью. Длиннопериодные вековые вариации имеют и внутренние источники, мало изменяющиеся со временем, и внешние, изменяющиеся по квазисинусоидальному закону с изменением солнечной активности.

Впервые разработана методика разделения вековых вариаций геомагнитного поля от внешних и внутренних источников. Благодаря этому подсчитан вклад внешних источников в вековую вариацию, зависящую от солнечной и геомагнитной

активности. В возмущенные периоды этот вклад соразмерен величине вековой вариации.

По данным геомагнитных обсерваторий Европы исследованы временные изменения вековых вариаций напряженности геомагнитного поля, состоящие из двух компонент: квазипостоянной от внутренних источников и переменной, которая связана с внешними источниками. Величина и знак компоненты вековых вариаций от внешних источников хорошо коррелирует с величиной и знаком крупномасштабного магнитного поля Солнца и, соответственно, с величиной и знаком среднегодовых значений южной компоненты межпланетного магнитного поля.

Исследованы пространственно-временные изменения вековых вариаций на Африканской тектонической плите и выявлено влияние тектонических процессов на природу вековых вариаций. Вековые вариации здесь имеют короткопериодную (квазипериодическую и циклическую) и длиннопериодную составляющие. Короткопериодные вековые вариации зависят от солнечной активности. Длиннопериодные выделить уверенно нельзя, поскольку ряды среднегодовых значений составляющих геомагнитного поля короткие. На прибрежных и островных обсерваториях величина как короткопериодных, так и длиннопериодных вековых вариаций увеличивается, что подтверждает гипотезу о влиянии на вековые вариации электропроводящих океанических течений.

По среднегодовым данным обсерваторий Северного и Южного полушарий найдены года изменений знака (опорные года), сглаженные 3- и 11-летними бегущими средними вековых вариаций напряженности геомагнитного поля, и их первых производных по времени. Опорными годами являются 1907, 1920, 1936, 1947, 1960, 1969, 1979, 1986 и 2003. Опорные года изменения вековых вариаций полного вектора совпадают с годами экстремумов солнечной активности. Экспериментальные данные четко указывают, что внешние источники играют большую роль в изменении величины и знака вековых вариаций геомагнитного поля.

По данным астрономической и магнитной обсерваторий, данным космических аппаратов и космической солнечной и гелиосферной обсерватории SOHO исследована чрезвычайная солнечная и геомагнитная активность в октябре–ноябре 2003 г. Экстрабури 29–31 октября и 20–21 ноября 2003 г. значительно повлияли на среднегодовые значения геомагнитного поля на всех магнитных обсерваториях мировой сети.

Исследованы изменения солнечной и геомагнитной активности в 19–24-м циклах. Наблюдается их скачкообразное уменьшение. Резкое уменьшение геомагнитной активности в 24-м цикле можно объяснить: а) уменьшением крупномасштабного магнитного поля Солнца; б) приближением к минимуму 200-летнего цикла солнечной активности, который ожидается в 2050–2060 гг.; в) развитием активности при отрицательном значении крупномасштабного магнитного поля Солнца.

Исследована зависимость геомагнитной активности от изменения секторной структуры межпланетного магнитного поля. Анализ его структуры показал, что



изменение знака сектора межпланетного магнитного поля, а также кратковременные нарушения секторной структуры, то есть отклонение от направления по спирали Архимеда, ведут к генерации его вертикальной составляющей. Увеличение солнечной активности ведет к преобразованию двухсекторной структуры в многосекторную, появлению  $B_z$ -составляющей межпланетного магнитного поля значительной величины и увеличению геомагнитной активности, что отражается в вековых вариациях геомагнитного поля.

По данным геомагнитных обсерваторий Украины проведен анализ долговременных изменений геомагнитного поля. Вариации компонент геомагнитного поля синхронны, но различаются в деталях, поскольку подстилающие поверхности под обсерваториями неодинаковы.

Исследована динамика месячных изменений вековых вариаций в зависимости от величины индукционных токов в подстилающих поверхностях обсерваторий. Обнаружена корреляция изменений вековых вариаций и солнечной активности.

Разработан метод устранения помех при регистрации составляющих геомагнитного поля на обсерваториях, создаваемых электрифицированным постоянным током железных дорог. Метод основан на нахождении частотно-передаточной функции между соотношениями горизонтальных компонент на обсерватории, записи которой зашумлены помехами, и обсерватории, которая не подвержена воздействию помех. Сравнение К-индекса, определенного по оригинальным и реконструированным данным, улучшает результат.

Построена модель регионального геомагнитного поля на территории Центральной Европы с помощью метода, предложенного в работах (Dzuman, 2018; Сумарук и др., 2019). Метод можно использовать для построения модели регионального геомагнитного поля высокого разрешения.

**Ключевые слова:** магнитное поле Земли, вековые вариации, солнечная и геомагнитная активность, геомагнитные обсерватории, магнитные бури.