

Вікові варіації геомагнітного поля на літосферних плитах Землі

© П. В. Сумарук, Т. П. Сумарук, 2018

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

Надійшла 15 жовтня 2017 р.

Исследована зависимость величины знака вековых вариаций геомагнитного поля, очищенных от 3- и 11-летних составляющих, от положения обсерваторий на тектонических плитах. Для исследования были выбраны обсерватории, имеющие длинные ряды наблюдений. Показано, что вековые вариации содержат компоненты от внутренних и внешних источников, величина которых изменяется от плиты к плите и даже в пределах одной плиты. В регионах с интенсивными тектоническими процессами вековые вариации имеют большую амплитуду. Выделено 10 регионов, в которых эти вариации имеют особый характер изменений. Вариации могут быть противофазными на разных тектонических плитах, однако экстремумы кривых часовых изменений и смена знака вариаций в большинстве случаев совпадают с максимумами или минимумами солнечной и геомагнитной активностей. Сделано предположение что внутренние и внешние источники вековых вариаций геомагнитного поля взаимосвязаны. Внешние источники играют важную роль в генерации вариаций. Максимальные амплитуды вековых вариаций за весь период экспериментальных наблюдений установлены в двух регионах: первый — восточная часть Северо-Американской плиты, Карибская плита и северная часть Южно-Американской плиты, второй — западная часть Индийского океана. Величина компоненты вековых вариаций от внешних источников зависит от геомагнитной широты места наблюдения. Амплитуда этой компоненты увеличивается с увеличением широты обсерватории. Максимальные значения компонент вековых вариаций от внешних источников наблюдаются на магнитных и геомагнитных полюсах. Влияние внешних источников на величину вариаций наблюдается на обсерваториях, находящихся под экваториальной ионосферной электроструей. Основная закономерность общей картины вековых вариаций геомагнитного поля в данное время — уменьшение напряженности поля в большинстве регионов Земли. Во второй половине 20 в. регулярное небольшое увеличение поля наблюдалось только на европейской части Евразийской плиты.

Ключевые слова: геомагнитное поле, вековые вариации, внешние источники, литосферные плиты.

Вступ. Магнітне поле Землі неперервно змінюється як з часом, так і в просторі. Варіації геомагнітного поля мають і внутрішні, і зовнішні джерела. Одними з найінформативніших варіацій є вікові. Вікові варіації (ВВ) — важливий інструмент під час дослідження природи і динаміки головного магнітного поля Землі. Дуже важ-

ливо розділити ВВ на складові від окремих джерел. Вікові варіації від зовнішніх джерел мають короткоперіодні і довгоперіодні компоненти. Короткоперіодні компоненти можна виключити, згладжуючи часові ряди кривих змін ВВ біжними середніми з вікнами відповідного періоду. Довгоперіодні ВВ від зовнішніх джерел

таким методом відфільтрувати у певний час не можна, оскільки довжина рядів ВВ не перевищує 200 років.

Експериментальні дані показують наявність глобальних, регіональних та локальних джерел ВВ, активність яких змінюється з часом. Локальні джерела ВВ можна виділити, якщо сітка пунктів вікового ходу є густою, а положення регіональних джерел — якщо припустити, що вони генерують однакові в часі ВВ.

Аналітичне зображення ВВ на основі теорії потенціалу було виконано тільки в ХХ ст. Це пов'язано з тим, що ряди сферичних функцій, які представляють потенціал ВВ, повільно сходяться [Калінін, 1984]. Повільна збіжність сферичних функцій для потенціалу ВВ, тобто вплив вищих гармонік, зумовлена локальністю деякої частини внутрішніх джерел та впливом зовнішніх джерел. Для аналітичного зображення як внутрішні джерела вибирають диполі з різними за величиною моментами та орієнтацією в просторі. Диполі поміщають на різні глибини. Комбінацією таких диполів добиваються найліпшого збігу результуючого поля із спостережуваним [Касьяненко и др., 2002; Бондар и др., 2006; Демина и др., 2008а]. За таким самим методом можна представити і головне магнітне поле Землі [Демина, Феофанова, 2004; Демина и др., 2008б].

Вікові варіації зображують у вигляді карти ізоліній для певної епохи. Такі карти необхідно будувати для кожної епохи, оскільки локальні та регіональні змінні джерела ВВ неперервно змінюють світову картину ізоліній ВВ.

В ХХ ст. нагромаджено велику кількість даних щодо абсолютних значень елементів геомагнітного поля. Це дає змогу прослідкувати за конкретними експериментальними даними зміну ВВ у просторі і в часі. Просторовий розподіл ВВ за даними магнітних обсерваторій вивчати важко, оскільки магнітні обсерваторії розміщені нерівномірно на земній поверхні. Завдяки появі наприкінці ХХ ст. супутникових даних щодо зміни компонент геомагнітного поля у ближньому (в межах маг-

нітосфери) та далекому космосі (у сонячному вітрі) побудовано точнішу світову карту розподілу ізопор ВВ для цього проміжку часу та виключено з ВВ частину, генеровану зовнішніми джерелами [Langel, Estes, 1985; Golovkov et al., 1997; Olsen, 2002; Verbanac et al., 2007; Шевнин и др., 2009, Finlay et al., 2016].

Вікові варіації вираховують як різницю між послідовними середньорічними значеннями повної напруженості геомагнітного поля та його компонент. Припускають, що усереднення даних за рік повністю виключає частину іррегулярних варіацій, пов'язану із зовнішніми джерелами, оскільки ці варіації є різнознаковими. Однак, як показано у статтях [Sumaruk, 2000; Verbanac et al., 2007; Шевнин и др., 2009, Сумарук, Сумарук, 2013], в отриманих таким методом ВВ наявна компонента пов'язана із квазідворічними, 11-річними та іншими довгоперіодними варіаціями сонячної активності. Виключити її можна, як указано вище, згладжуванням біжними середніми відповідного періоду. Очищені таким методом ВВ містять компоненти від внутрішніх глобальних, регіональних джерел, а також складові від джерел зовнішнього походження, які змінюються з періодами більше як 11-річні. Точність спостережень варіацій поля в ХІХ і першій половині ХХ ст. була невеликою і абсолютні похибки вимірів поля були співмірними з величинами ВВ.

У другій половині ХХ ст., з появою протонних, феромагнітних та інших магнітометрів, стало можливим вимірювати значення поля до десятих часток нанотесла, і це дало змогу вичислити ВВ з такою самою точністю. Водночас розпочалися вимірювання магнітних полів і плазми на Сонці, у сонячному вітрі і всередині магнітосфери. Таким чином, були одержані перші експериментальні дані щодо зовнішніх джерел варіацій геомагнітного поля. Часові ряди таких даних (близько 50 років) ще коротші, ніж ряди ВВ, визначених за даними магнітних обсерваторій, однак за ними досить надійно ідентифікують зовнішні джерела варіацій геомаг-

нітного поля та їх зв'язок із сонячною активністю. Спостереження за сонячною активністю ведуть від 1749 р. [Витинский, 1973], тому оцінити геомагнітну активність також можна починаючи з цього року. Це дає змогу виділити ВВ від зовнішніх джерел на інтервалі часу в якому велись спостереження геомагнітних варіацій. Найскладнішою проблемою є розділення регіональної та глобальної компоненти ВВ. Немає сумніву щодо наявності регіональної компоненти, оскільки є факт існування аномалій ВВ [Калинин, 1984]. Як указано у публікаціях [Тяпкін, 1974, 1996] аномалії вікового ходу можна представити як

відображення блокових переміщень магнітоактивного шару тектоносфери в індукції геомагнітного поля.

Мета даної роботи: дослідити залежність вікових варіацій геомагнітного поля на магнітних обсерваторіях світової сітки від положення обсерваторії на різних тектонічних плитах і на межах між плитами.

Використані дані. Для дослідження використано середньорічні значення повної напруженості геомагнітного поля на магнітних обсерваторіях світової сітки за 1890—2010 р. (www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/annual_means.shtml). Вікові варіації вираховано як різницю між послідовними се-

Кількість магнітних обсерваторій на тектонічних плитах

Назва плити	Кількість магнітних обсерваторій	Магнітні обсерваторії на межах плит
Євразійська (ЄА)	67 (4)	ASH з IP; KSA з IP; AQU з АФ; PEG з АФ
Північноамериканська (ПА)	29 (5)	LVR, YAK з ЄА; SIT, VIC з ТО; TEO з КА
Китайська (КИ)	19 (11)	CPA, CZH, SHL з ІА; ESA, НТҮ, КАК, KNZ з ТО; LSA з ІА; MMB, YSS з ОХ; KNY з ФІ
Африканська (АФ)	17 (0)	—
Антарктична (АН)	17 (1)	AMS з ІА
Індо-Австралійська (ІА)	15 (4)	AML, EYR, MCQ з ТО; SAB з КИ
Південноамериканська (ПіА)	7 (0)	—
Охотська (ОХ)	0 (2)	PET з ТО; MGA з ПА
Тихоокеанська (ТО)	2 (0)	—
Філіппінська (ФІ)	0 (2)	CBI, GUA з ТО
Наска (НА)	0 (2)	EIC з ТО; HUA з ПіА
Індокитайська (ІК)	1 (1)	TNG з ІА
Іранська (ІР)	0 (1)	QUE з ЄА і КИ
Карібська (КА)	0 (1)	SJA з ПА
Кокос (КО)	0 (1)	TEO з ПА і КА
Дрейка (ДП)	0 (1)	ORC з ПіА
Аравійська (АР)	0(1)	MLT з АФ
Хуан-де-Фука (ХДФ)	0 (0)	—

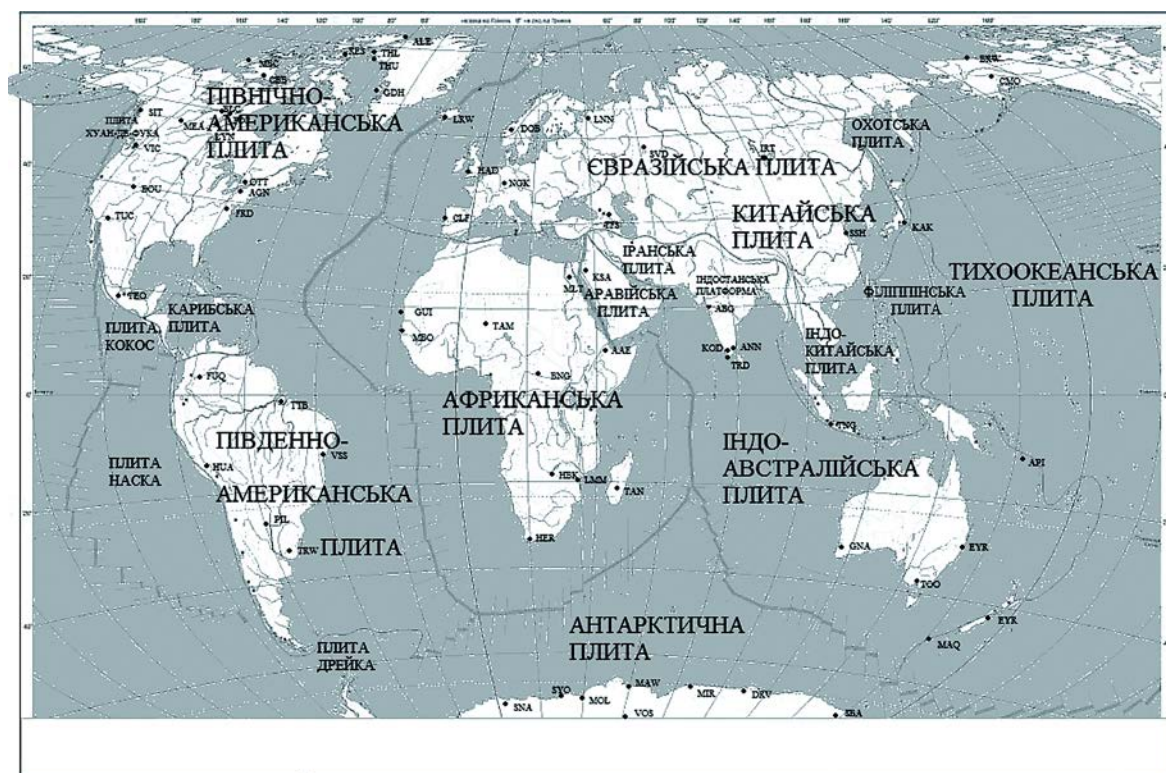


Рис. 1. Карта тектонічних плит і положення обсерваторій на плитах.

редньорічними значеннями. Одержані ряди ВВ згладжено біжними середніми значеннями з вікнами у 3 і 11 років для виключення короткоперіодних і циклічних варіацій, пов'язаних із зміною сонячної активності. Згладження середніми значен-

нями з біжним вікном 11 років веде до скорочення ряду середніх на 11 років. У таблиці скорочену назву тектонічних плит наведено у дужках прописними літерами [Жарков, 1983]. У дужках біля кількості обсерваторій на плиті вказано кількість обсерваторій, розміщених на межах плити.

На карті тектонічних плит (рис. 1) показано розміщення на них геомагнітних обсерваторій, дані яких використано у статті. На рис. 2 подано вікові варіації напруженості геомагнітного поля (ВВ(Т) — суцільна крива) на французькій магнітній обсерваторії Шамбон-ла-Форе (CLF). Слід звернути увагу на значний розкид значень, не згладжених ВВ(Т), наприкінці ХІХ та в першій половині ХХ ст. Великий розкид даних до 1940 р. можна пояснити або експериментальними помилками, або відображенням реального процесу зміни ВВ(Т). Ми вважаємо, що обидва припущення можливі. Припущення щодо розкиду даних у 1890—1940 рр. є результатом реального фізичного процесу можна

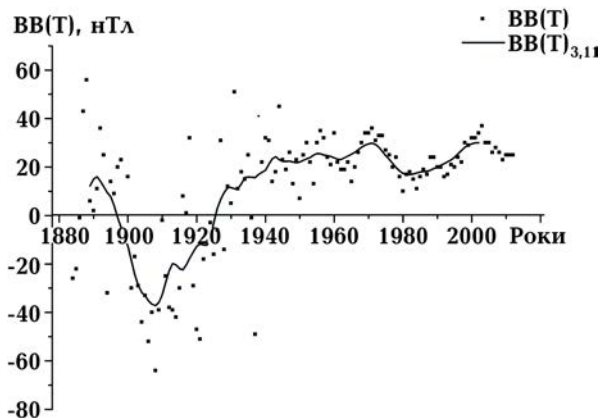


Рис. 2. Вікові варіації напруженості геомагнітного поля, згладжені 3- та 11-річними біжними вікнами ВВ(Т)_{3,11}, та незгладжені величини ВВ(Т) на французькій магнітній обсерваторії Шамбон-ла-Форе (CLF).

підтвердити наявність у ВВ квазидворічних змін [Сумарук, Сумарук, 2009], а також змінами короткоперіодних ВВ у фазі на багатьох обсерваторіях. Це твердження потребує спеціального дослідження.

Згладжені ВВ(Т) демонструють, що в інтервалі часу з 1897 до 1926 р. ВВ повної напруженості поля на обсерваторії CLF були від'ємними. В 1926 р. ВВ(Т) поміняла знак і зростала до 1947 р. У дальшому спостерігали коливання позитивних ВВ(Т) з амплітудою близько 18 нТл. Максимуми ВВ(Т) > 0 спостерігали у 1969, 2003 рр., а мінімуми — у 1960 і 1979 рр.

На рис. 3, а зображено зміни ВВ(Т) на магнітних обсерваторіях за 1890—1998 рр.; ці обсерваторії мають найдовші ряди спостережень. Як можна бачити, ВВ(Т) на обсерваторіях LNN та NGK змінюються

у фазі протягом усього інтервалу часу і величини їх збігаються до 1969 р. Після 1969 р. амплітуда змін ВВ(Т) на субавстралійській обсерваторії LNN більша, ніж на обсерваторії NGK, тобто із збільшенням широти обсерваторії амплітуда варіації зростає. Максимуми варіацій спостерігали у 1936, 1973 рр., а мінімуми — у 1946, 1965, 1986 рр. На обсерваторіях HAD та SVD ВВ(Т) суттєво відрізняється від ВВ(Т) на обсерваторіях LNN та NGK. По-перше, зміна знака ВВ(Т) на обсерваторії HAD відбулась у 1930 р., тобто значно пізніше ніж на обсерваторіях NGK та LNN, по-друге, квазисинусоїдальних змін ВВ(Т) на інтервалі часу 1936—1969 рр. не спостерігали. Максимальну величину ВВ(Т) > 0 зафіксовано на обсерваторії HAD у 1969 р., мінімальну — у 1979 р. Амплітуда квазиси-

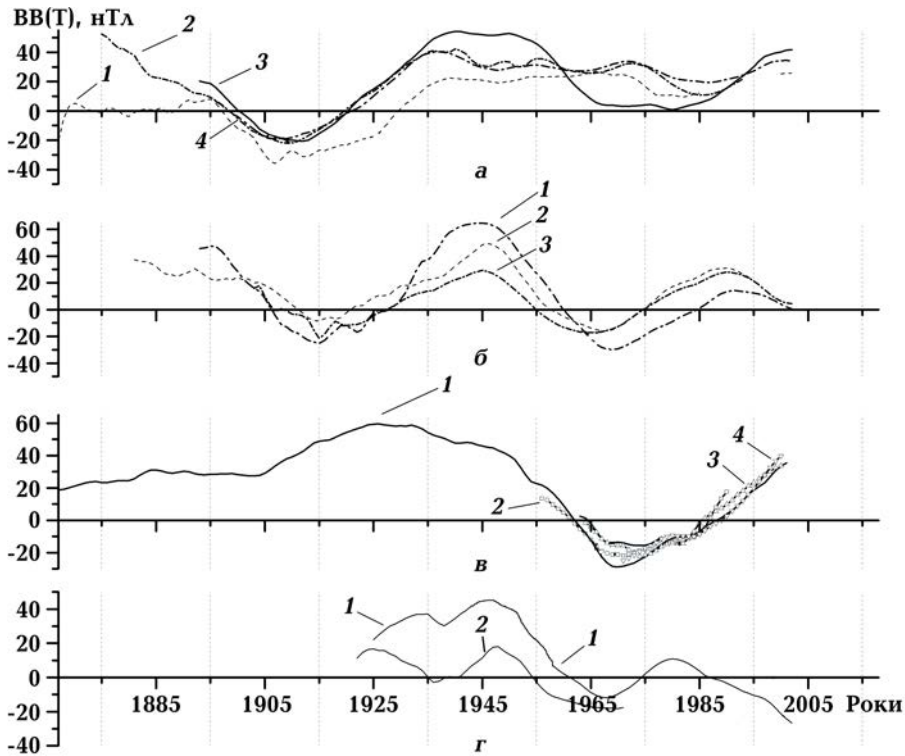


Рис. 3. Величини ВВ(Т) на різних магнітних обсерваторіях світу: а — західноєвропейські (1 — Хартланд (HAD), 2 — Німек (NGK)) та розміщені на Східноєвропейській платформі (4 — Воейково (LNN), 5 — Свердловськ (SVD)); б — азійські (1 — Іркутськ (IRT), 2 — Шешань (SSH), 3 — Какіока (KAK)); в — на Індостанській платформі, яка належить до Індо-Австралійської плити (1 — Алібаг (AVG), 2 — Кодайканал (KOD), 3 — Тривандрум (TRD), 4 — Аннамалайнагар (ANN)); г — на Австралійській платформі Індо-Австралійської плити (1 — Гнангара (GNA), Західна Австралія; 2 — Тулангі (TOO), Східна Австралія).

нусоїди на обсерваторії HAD значно менша, ніж на обсерваторіях NGK і LNN. На обсерваторії SVD до 1936 р. ВВ(Т) змінювались аналогічно змінам на обсерваторіях NGK і LNN. Однак після 1936 р. ВВ(Т) змінювались тут подібно до змін ВВ(Т) на обсерваторіях Східносибірської платформи. Іншими словами, на обсерваторії SVD ВВ(Т) мають форму, перехідну між ВВ(Т) на Східноєвропейській і Сибірській платформах. Отже, на європейських магнітних обсерваторіях нульові значення ВВ(Т) спостерігали у 1897—1903, 1920—1930 рр., а екстремальні — у 1907—1909, 1936, 1947, 1970—1973, 1986 рр.

На рис. 3, б показані графіки зміни ВВ(Т) на трьох азійських магнітних обсерваторіях. Обсерваторія IRT розміщена на границі між Євразійською (ЄА) і Китайською (КИ) тектонічними плитами, дві інші на КИ-плиті. Характерними особливостями графіків ВВ(Т) на обсерваторіях є наявність двох часових інтервалів, у яких ВВ(Т) < 0, та квазісинусоїдальні зміни ВВ(Т), причому після 1946 р. коливання мають затухаючий характер. Другий інтервал з ВВ(Т) < 0 на КИ-плиті спостерігали з 1960 ± 2 роки до 1979 ± 3 роки. На ЄА-плиті його не спостерігали, але з наближенням до КИ-плити він незначно проявляється на магнітних обсерваторіях SVD та NVS. Всі інші обсерваторії, які розміщені на КИ-плиті мають коротші ряди спостережень, але вони чітко зафіксували другий пік ВВ(Т) < 0. Так само, як на КИ-плиті, змінюється ВВ(Т) і на Охотській (ОХ) плиті (обсерваторія Петропавловськ-Камчатський — РЕТ), на рис. 3, б не показано. Амплітуди змін ВВ(Т) на КИ-плиті зростають із збільшенням широти обсерваторії. Основною відмінністю ВВ(Т) на ЄА- і КИ-плитах є відсутність змін знака ВВ на ЄА-плиті у другій половині ХХ ст., хоча спостерігали квазісинусоїду малої амплітуди ВВ(Т) > 0 після 1936 р., яка розвивається у протифазі до квазісинусоїди на КИ-плиті в цей час. Межею поділу різних типів ВВ(Т) на ЄА- та КИ-плитах є Уральські гори, які розділяють Східноєвропейську та Західносибірську платфор-

ми, що підтверджує результат, отриманий у публікації [Орлюк та ін., 2016].

На рис. 3, в зображено зміни ВВ(Т) на обсерваторіях Індостанської платформи. Найдовший ряд спостережень має магнітна обсерваторія АВГ (веде спостереження з 1846 р.). Характерною особливістю ВВ(Т) на Індостанській платформі є додатні значення з 1847 до 1962 р., які досягли максимуму в 1932 р. З 1962 до 1987 ± 2 роки ВВ(Т) < 0. Максимальні абсолютні значення ВВ(Т) < 0 у цей проміжок часу спостерігали в 1969 р., зміну знака — в 1986 р. Такий самий екскурс у бік від'ємних значень ВВ(Т) спостерігали на КИ-плиті, що засвідчує спряженість джерел варіацій. Таким чином, якщо на ЄА-плиті ВВ(Т) змінювали знак до 1920-х років і в подальшому були позитивним, то на Індостанській платформі знак ВВ(Т) > 0 до початку 1960-х років і надалі змінювався. Від 1920-х до 1960-х років на КИ-плиті спостерігаємо ріст ВВ(Т) > 0 (1946 р. — максимум) і спад ВВ(Т) > 0 до нуля наприкінці 1960-х років.

На рис. 3, г показано зміни ВВ(Т) на Австралійській платформі Індо-Австралійської (ІА) плити. На західноавстралійській обсерваторії GNA ВВ(Т) подібні до ВВ(Т) на КИ-плиті та Індійській платформі до 1979 р. Зміни ВВ(Т) у Східній Австралії, яка має складну тектонічну будову, після 1979 р., відповідають змінам ВВ(Т) на Тихоокеанській (ТО) плиті і краще корелюють з варіаціями на Новозеландській обсерваторії Амберлі-Ейрвейл (AML-EYR) (див. рис. 4, а). Обсерваторія EYR розміщена на межі ІА- і ТО-плит. Амплітуди ВВ(Т) на обсерваторії GNA значно більші, ніж на обсерваторії ТОО. Спостерігається процес зменшення амплітуд ВВ(Т) з часом. Якщо змістити криву ВВ(Т) обсерваторії GNA по осі ординат паралельно самій собі на -36 нТл, то час зміни знака на обсерваторіях буде однаковий і максимальні ВВ(Т) в 1947 р. збігуться. Після 1954 р. на обсерваторії GNA значення будуть від'ємними і в 1969 р. — найменшими за абсолютною величиною. Формальна процедура зміщення кривої ВВ(Т) по осі ординат фізично

означає, що ВВ в цьому регіоні генеруються двома джерелами — перше змінне джерело генерує однакові ВВ(Т) на обсерваторіях GNA і TOO, друге джерело дає постійну в часі складову, яку спостерігають тільки у Західній Австралії (GNA). Таким чином, Австралія поділена на дві частини: на західній спостерігають ВВ(Т) такі самі як на КИ-плиті і на Індійській платформі, на східній — подібні до ВВ(Т) на ТО-плиті.

На рис. 4, а показано зміни ВВ(Т) на обсерваторіях, розміщених на ТО-плиті та на межі ТО-плити з ІА-плитою. Найдовший ряд спостережень мають новозеландська обсерваторія AML, яка вела їх до 1978 р.

(в 1979 р. перенесена в Ейрвейл (EYR)), та API, яка знаходиться на островах Самоа. На всіх обсерваторіях спостерігають малозмінні за знаками ВВ(Т). Тільки обсерваторія AML до 1928 р. фіксувала невеликі ВВ(Т) > 0 та обсерваторія HON — ВВ(Т), що добре корелюють з варіаціями на ПА-плиті. Малозмінні ВВ(Т) на ТО-плиті показують стабільність тектонічних процесів на плиті, малий вплив зовнішніх джерел та, можливо, демпфірувальну дію океанських течій на ВВ.

На рис. 4, б показано зміни ВВ(Т) на Африканській тектонічній плиті. Найдовші ряди спостережень мають обсерваторії TAN на Мадагаскарі та HER у Південно-

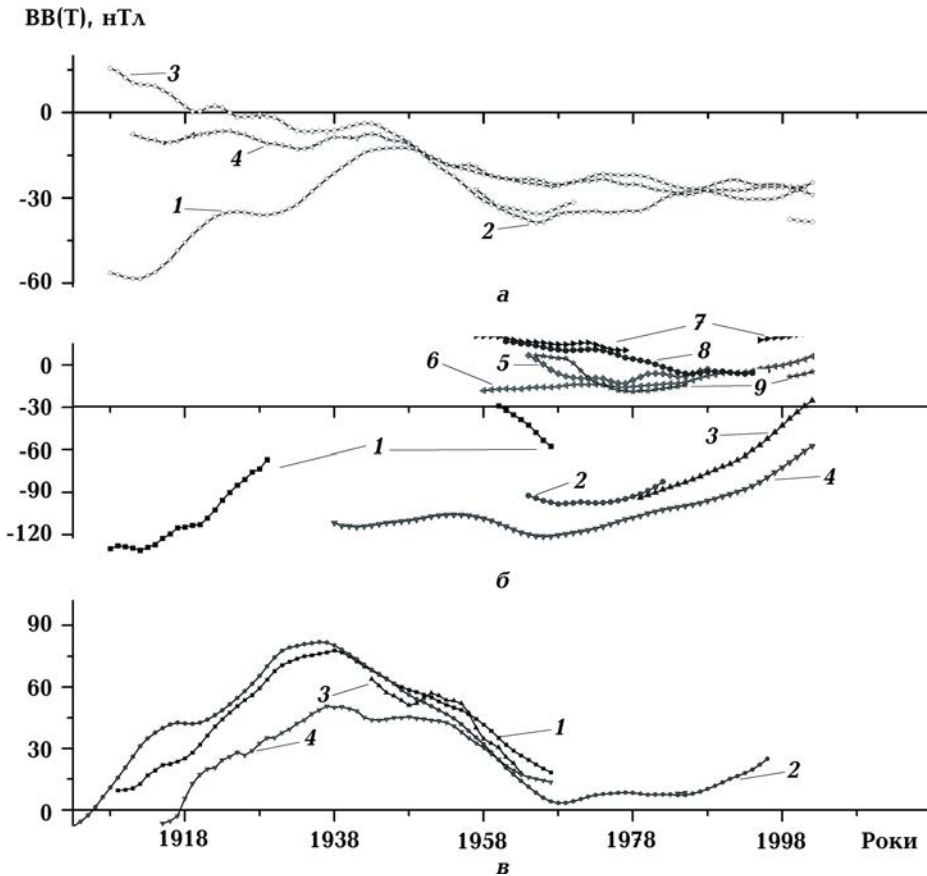


Рис. 4. Величини ВВ(Т) на обсерваторіях: а — на ТО-плиті (1 — Гонолулу (HON)) і на межі ТО-плити з ІА-плитою (2 — Макурі (MCQ), 3 — Амберлі (AML), 4 — Апія (API)); б — на Африканській тектонічній плиті на обсерваторіях Східної Африки (1 — Тананаріве (TAN), 2 — Мапуту (LMM), 3 — Хартебесток (HBK), 4 — Херманус (HER), 5 — Адіс-Абеба (AAE)) та Західної Африки (6 — М'Бур (MBO), 7 — Таманрассет (TAM), 8 — Бангуї (BNG), 9 — Гуйнар (GUI)); в — єгипетський (1 — Хелвен-Міссалат (HLW-MLT)), грузинський (2 — Тбілісі (TFS)), ліванський (3 — Ксара (KSA)), російський (4 — Казань (KZN)).

Африканській республіці. Першою особливістю ВВ(Т) є те, що значення їх у Східній Африці, яка тектонічно активніша, значно більші, ніж у Західній. У Східній Африці $ВВ(Т) < 0$ і зменшується за абсолютною величиною з часом та із зменшенням широти обсерваторії. На острівній обсерваторії TAN, яка розміщена близько до екватора, на лінійний тренд накладається квазисинусоїда з екстремумами в 1947 та 1969 рр. Абсолютні величини ВВ(Т) < 0 зменшуються і на обсерваторіях TAN, LMM, AAE в інтервалі часу 1989—2005 рр. змінюють знак.

На обсерваторіях MBO, TAM, BNG, GUI величини ВВ(Т) малі. Характерною особливістю ВВ на Африканській плиті є зменшенням їх абсолютних величин, яке розпочалося наприкінці 1970-х років. Це засвідчує релаксацію джерел геомагнітного поля та зменшення геомагнітної активності.

На рис. 4, в показано зміни ВВ(Т) на єгипетській, грузинській, ліванській і російській обсерваторіях. Обсерваторія HLW-MLT знаходиться в зоні землетрусів і сучасного гороутворення на межі Африканської (АФ) і Аравійської (АР) тектонічних плит, обсерваторія KZN — на східній межі Східноєвропейської платформи. ВВ(Т) на обсерваторіях змінюються у фазі. Найдовший ряд спостережень має обсерваторія TFS, на якій у 1907 р. ВВ(Т) змінила знак з від'ємного на додатний. Додатні значення ВВ(Т) зростали до 1936 р. (як і на європейських середньоширотних обсерваторіях (див. рис. 3, а)), пізніше розпочався їх спад. Максимум у 1936 р. на обсерваторіях MLT, TFS випереджує такий самий максимум на азіатських обсерваторіях IRT, SSH, KAK на один сонячний цикл.

На рис. 5, а показано зміни ВВ(Т) на магнітних обсерваторіях, розміщених на Північноамериканській (ПА) плиті. Обсерваторії східного Атлантичного узбережжя Фредеріксбург (FRD) та Аженкурт (AGN) мають найдовші ряди спостережень і зафіксували ВВ(Т) найбільшої амплітуди, більшу амплітуду ВВ(Т) спостерігали тільки на обсерваторії Тананаріве. Екстремальні значення зафіксовано у 1920, 1947 рр.

У 1968 р. обсерваторію AGN було перенесено в Оттаву (OTT). ВВ(Т) на обсерваторіях західного (Тихоокеанського узбережжя) ПА-плити Сітка (SIT), Таксон (TUC), Вікторія (VIC) мають меншу амплітуду змін ВВ(Т). Найменші величини ВВ(Т) спостерігали на авроральній обсерваторії SIT. На цій обсерваторії чітко зафіксовано пік 1969 р.

Форми кривих ВВ(Т) на Атлантичному та Тихоокеанському узбережжях однакові, однак фази змін різні.

На рис. 5, б показано ВВ(Т) на обсерваторіях ПА-плити, розміщених далеко від океанів, але на різних широтах. Як видно, середньоширотні обсерваторії фіксують зміни ВВ(Т) подібні до змін на Тихоокеанському узбережжі. Зі збільшенням широти на ВВ(Т) виділено додатний пік у 1969 р., особливо добре — на полярних обсерваторіях VLC, CBV, MBC.

На рис. 6 показано ВВ(Т) на обсерваторіях, розміщених на Південноамериканській (ПіА) плиті: Фукуена (FUQ, $\varphi = 16^\circ$), Татока (ТТК, $\varphi = 8^\circ$), Вассоурас (VSS, $\varphi = -13^\circ$), Пілар (PIL, $\varphi = -21^\circ$), Трелев (TRW, $\varphi = -33^\circ$) та Хуанкайо (HUA, $\varphi = -2^\circ$). У дужках указано геомагнітні широти обсерваторій. На всіх обсерваторіях ВВ(Т) < 0 . Максимальні абсолютні значення ВВ(Т) < 0 спостерігали на приекваторіальних обсерваторіях FUQ, ТТВ, HUA у 1969 р., що відображає вплив атлантичного від'ємного фокуса ВВ. ВВ(Т) на обсерваторіях TRW, PIL і VSS найімовірніше відображають вплив антарктичного фокуса ВВ. Обсерваторія HUA зазнає впливу екваторіального іоносферного електроструменя, тому ВВ(Т) на обсерваторії добре корелюють з ВВ на обсерваторіях, розміщених біля південного магнітного полюсу.

На рис. 7 показано графіки ВВ(Т) на низькоширотних обсерваторіях Тангеранг (TNG), на Філіппінській (ФІ) плиті, Теолоюкан на межах ПА, Карибської плити (КА) та плити Кокос (КО) і субавроральній обсерваторії Домбас на ЄА- плиті. Характерною рисою цієї групи обсерваторій є наявність чітких піків у 1936 та 1969 рр. Пік 1936 р. зафіксовано на обсерваторіях

TFS, HLW-MLT, KZN (див. рис. 4, в) і на багатьох європейських обсерваторіях, причому амплітуда його на європейських обсерваторіях збільшується із збільшенням широти. Пік 1969 р. — ВВ(Т) зафіксовано

на всіх магнітних обсерваторіях світу, але різного знака. На низькоширотних обсерваторіях TNG та ТЕО, які знаходяться на протилежних за довготою частинах Землі, величини ВВ(Т) антикорелюють.

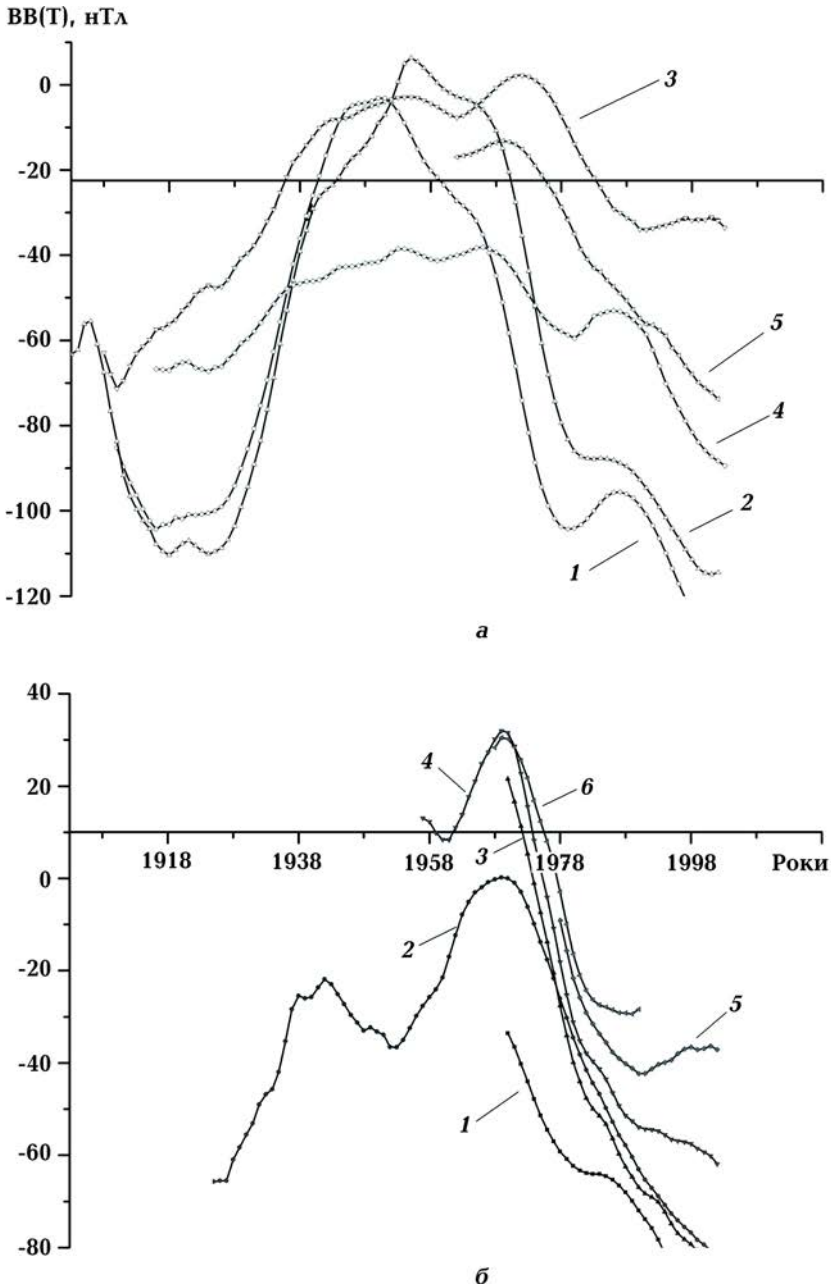


Рис. 5. Зміни ВВ(Т) на магнітних обсерваторіях, розміщених на ПА-плиті: а — східне Американське узбережжя (1 — Фредеріксбург (FRD), 2 — Аженкурт (AGN), 3 — Сітка (SIT), 4 — Таксон (TUC), 5 — Вікторія (VIC)); б — різні широти (1 — Боулдер (BOU, $\varphi = 40^\circ$), 2 — Мінук (MEA, $\varphi = 54^\circ$), 3 — Форт Черчилл (FCC, $\varphi = 59^\circ$), 4 — Бейкер Лейк (BLC, $\varphi = 40^\circ$), 5 — Кермідж Бей (CBV, $\varphi = 69^\circ$), 6 — Моулд Бей (MBC, $\varphi = 76^\circ$)).

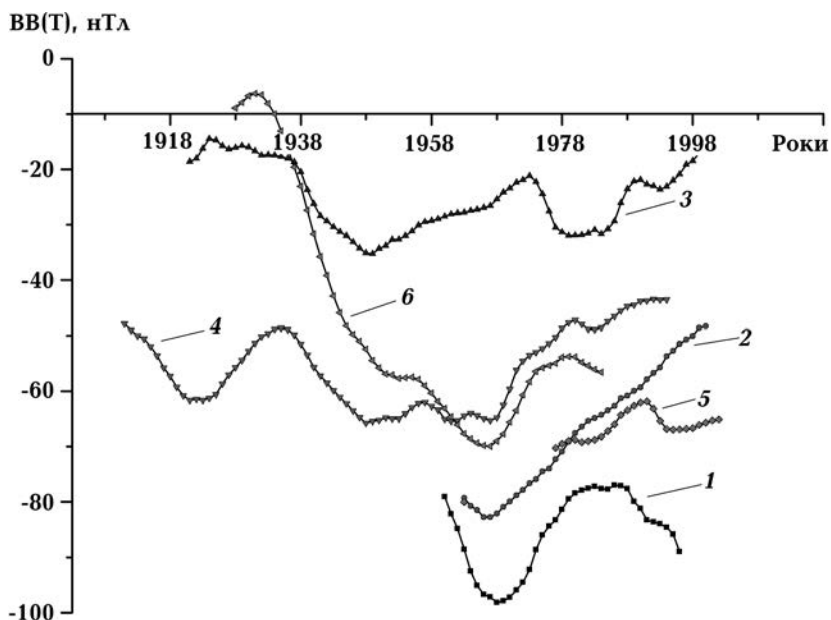


Рис. 6. Зміни ВВ (Т) на обсерваторіях, розміщених на Південноамериканській плиті: 1 — Фукуена (FUQ, $\varphi = 16^\circ$), 2 — Татока (ТТК, $\varphi = 8^\circ$), 3 — Вассоурас (VSS, $\varphi = -13^\circ$), 4 — Пілар (PIL, $\varphi = -21^\circ$), 5 — Трелев (TRW, $\varphi = -33^\circ$), 6 — Хуанкайо (HUA, $\varphi = -2^\circ$).

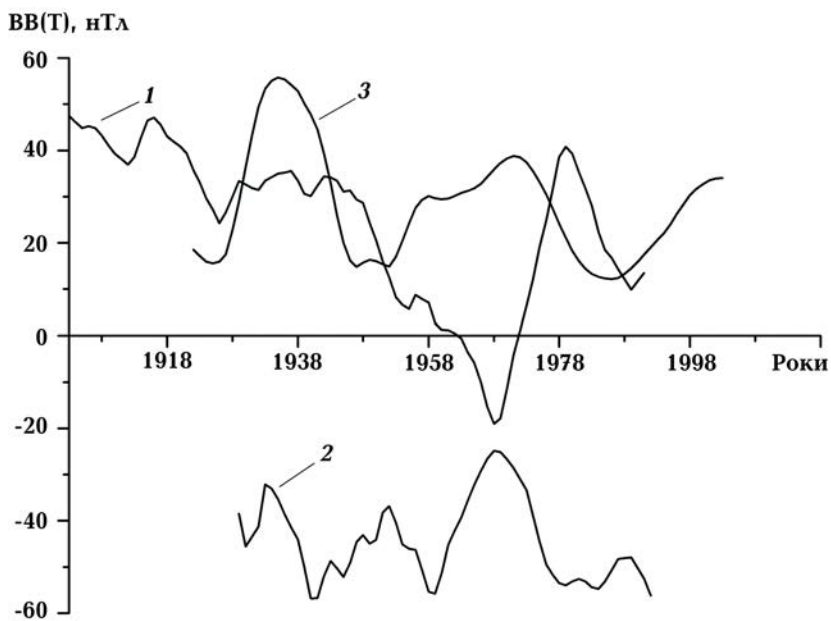


Рис. 7. Зміни ВВ (Т) на низькоширотних обсерваторіях: 1 — Тангеранг (TNG, $\varphi = -6^\circ$, $\lambda = 107^\circ$) на ФІ-плиті; 2 — Теолоюкан (ТЕО, $\varphi = 20^\circ$, $\lambda = 260^\circ$) на межі ПА-, КА- та КО-плит; 3 — на субавроральній обсерваторії Домбас (DOV, $\varphi = 62^\circ$, $\lambda = 9^\circ$) на ЄА-плиті.

На рис. 8, а наведено ВВ(Т) у високих широтах Північної та Південної півкуль. За даними обсерваторії GDH ($\varphi = 69^\circ$, $\lambda = 306^\circ\text{E}$), яка розміщена у Гренландії, спостерігали зміну знака ВВ(Т) з від'ємного

на додатний, тобто напруженість магнітного поля почала зростати, в 1946 р. Величина ВВ(Т) майже лінійно зростала до 1969 р. Це підтверджується даними обсерваторій Туле (THU), Алерт (ALE), Ре-

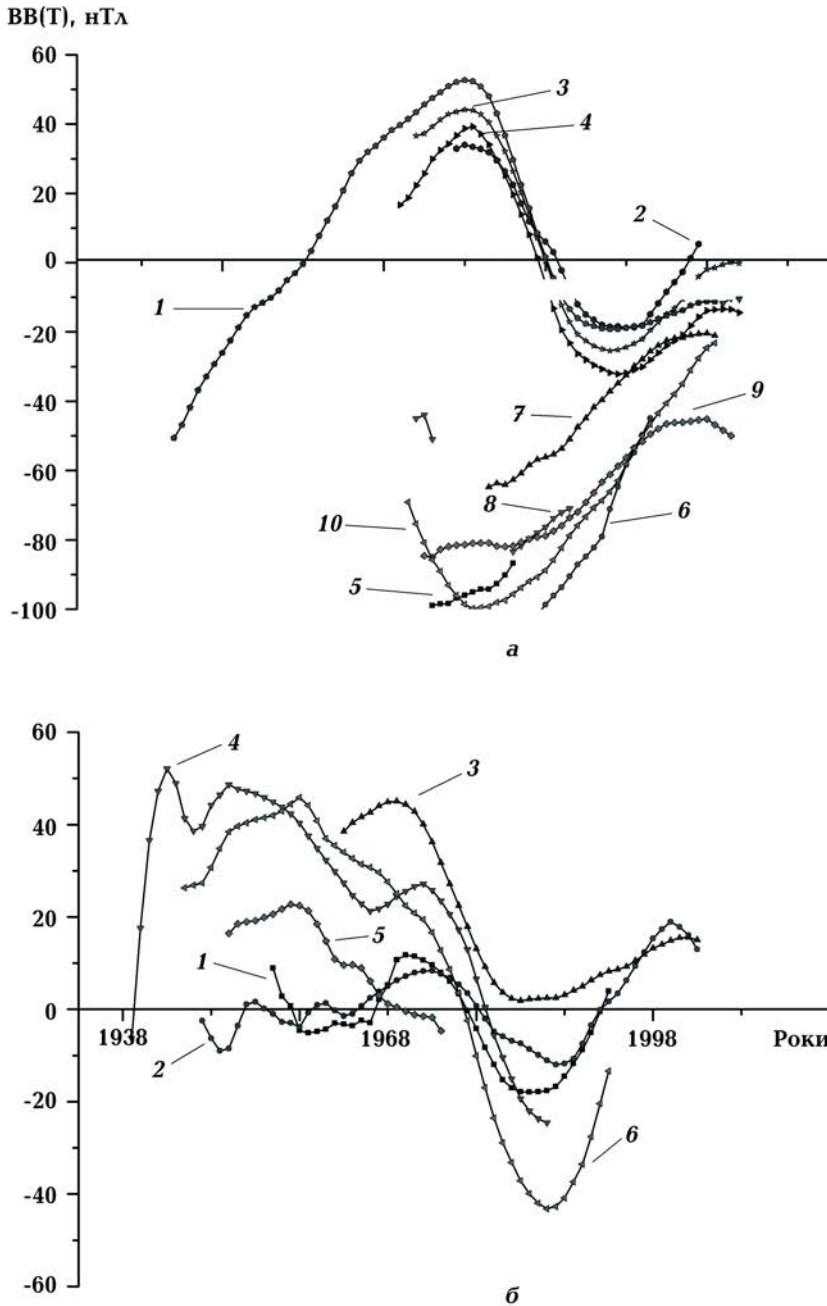


Рис. 8. Зміни ВВ(Т) у високих широтах Північної та Південної півкуль: а — полярна шапка Північної півкулі (обсерваторії: 1 — Годхавн (GDH) ($\varphi = 69^\circ$, $\lambda = 306^\circ\text{E}$), 2 — Туле (THU), 3 — Алерт (ALE), 4 — Резольют Бей (RES); високі широти Південної півкулі (5 — Восток (VOS), 6 — Молодьюжная (MOL), 7 — Дьомон-д-Юр-віль (DRV), 8 — Мирний (MIR), 9 — Скот Бейс (SBA), 10 — Маусон (MAW)); б — авроральна зона Північної півкулі (обсерваторії: канадські (1 — Барров (BRW), 2 — Коледж (СМО)), ірландська (3 — Лейрвокур (LVR)); російські (4 — ДІК, 5 — ТІК, 6 — ССС)).

зольот Бей (RES), які розміщені на широтах понад 70° . У високих широтах Південної півкулі на антарктичних обсерваторіях Восток (VOS), Молодьюжная (MOL), Сьова (SYO), Дьюмон-д-Юрвіл (DRV), Мирний (MIR), Скот Бейс (SBA) та Маусон (MAW), які розпочали працювати із початком Міжнародного геофізичного року, в 1957—1958 рр. спостерігали різке збільшення від'ємних значень $BB(T)$, тобто прискорене зменшення напруженості геомагнітного поля ($BB(T) < 0$). Найінтенсивніший процес зменшення напруженості поля зафіксовано на обсерваторіях Новолазаревська і Санає (сектор африканських довгот). Процес збільшення $BB(T)$ у північній полярній шапці, та зменшення — у південній тривав до 1969 р. Від 1969 р. ріст абсолютних величин $BB(T)$ на обох полярних шапках змінився зменшенням і близько 1979 р. у північній полярній шапці $BB(T) = 0$, а у південній продовжує зменшуватись.

На рис. 8, б показано $BB(T)$ розміщені у північній зоні полярних сьйв. Канадські обсерваторії BRW, СМО та ірландська LVR, які розміщені близько полюса, фіксують зміни $BB(T)$ подібні до змін у полярній шапці меншої амплітуди, а російські обсерваторії DIK, TIK та CCS за інтервал часу з 1947 до 1979 р. реєструють зменшення $BB(T) > 0$ і навіть зміну знака. Такий характер змін $BB(T)$ у зоні полярних сьйв не дає змогу пояснити $BB(T)$ у високих широтах зсувом центрального диполя до півночі. Крім того, перехід через нуль $BB(T)$ відбувається в авроральній зоні в різні роки. Це означає, що $BB(T)$ у цій зоні генерується двома джерелами: інтенсивність одного джерела змінюється у фазі зі змінами у полярній шапці; другого — постійна, але змінюється просторово. Величину цієї постійної для певної обсерваторії $BB(T)$ можна знайти, зсунувши по осі ординат криві $BB(T)$ паралельно самим собі так, щоб перехід через нуль відбувся у 1979 р. на кожній авроральній обсерваторії. Те, що $BB(T)$ у високих широтах не можна пояснити зміщенням на північ центрального геодиполя, засвідчують і зміни $BB(T)$ у полярних шапках обох півкуль

після 1979 р. У північних високих широтах зміни $BB(T)$ відбувалися за квазісинусоїдами різної амплітуди, а у південних — зменшувалися за абсолютною величиною майже лінійно (див. обсерваторії MAW, MOL, SYO, VOS, MIR). Тільки на обсерваторіях DRV та SBA, найближчих до південного геомагнітного полюса, процес лінійного зменшення абсолютних величин BB був перерваний у 1991 р. і $BB(T) < 0$ почали тут зростати по абсолютній величині.

Обговорення. Як показано вище, вікові варіації геомагнітного поля, очищені від складових, генерованих зовнішніми джерелами, інтенсивність яких змінюється із короткими періодами, на різних тектонічних плитах мають різні графіки залежності від часу. Очевидно, часові зміни від різних джерел мають давати складові, величина яких залежить від зміни з часом інтенсивності кожного джерела. Якщо допустити, що складові $BB(T)$ від різних джерел змінюються синхронно зі зміною геомагнітної активності, то можна їх виділити, знаючи основні періоди змін цієї активності. Внутрішні джерела $BB(T)$ можуть бути планетарними та регіональними. Згідно із сучасними уявленнями, планетарним джерелом BB є струми на межі ядро—мантія, які можуть змінювати інтенсивність і положення. Зі збільшенням інтенсивності внутрішніх струмів $BB(T) > 0$ і, навпаки, зі зменшенням інтенсивності струмів $BB(T) < 0$ по всій Землі. Із зміною положення струмів знак $BB(T)$ залежить від напрямку зміщення. Зміна регіональних внутрішніх джерел веде до таких самих змін $BB(T)$ в окремих регіонах. Аналітичне зображення таких варіацій подано у багатьох публікаціях [Калинин, 1984; Деміна и др., 2008 а, б], виконано пошук фізичних механізмів таких джерел [Рузмайкин и др., 1989]. Порівняння графіків $BB(T)$ на різних тектонічних плитах указує на значний вплив тектонічних процесів на $BB(T)$, оскільки їх часові зміни різні на плитах і навіть на платформах однієї плити. Так, різними є $BB(T)$ на СА- і КИ-плитах, на східній і західній частинах Австралійської платформи, на Північноамерикан-

ській та Африканській тектонічних плитах. На кожній тектонічній плиті графіки змін ВВ(Т) суттєво різняться. Виділено два регіони на Землі, на яких амплітуди змін ВВ(Т) максимальні. Перший регіон — це східна частина ПА-плити, КА-плита та північна частина ПіА-плити; другий — західна частина Індійського океану (обсерваторії TAN і PLS). Обсерваторії на ТО-плиті та на межах її з іншими плитами спостерігають дуже малі та малозмінні ВВ(Т). На ВВ(Т), що мають внутрішні джерела, тобто залежать від тектонічних процесів, накладається складова, що пов'язана із зовнішніми джерелами, тобто залежить від сонячної та геомагнітної активності.

Особливої уваги заслуговують ВВ(Т) у полярних шапках Землі та на широтах зони полярних сьйв. Ряди спостережень тут короткі (найдовший ряд у цьому регіоні має обсерваторія GDH, усі інші почали вести спостереження у Міжнародний геофізичний рік), тим не менш характерні зміни ВВ(Т) дають змогу припустити, що вони тісно пов'язані із геомагнітною та сонячною активністю. Екстремуми кривих і зміна знака ВВ(Т) збігаються із максимумами чи мінімумами сонячної активності. Такі самі зміни спостерігаються і на графіках зміни ВВ(Т) у середніх широтах обох півкуль Землі, хоча амплітуда їх менша.

Висновки. Вікові варіації напруженості геомагнітного поля на обсерваторіях, розміщених на різних тектонічних плитах, суттєво різняться як за амплітудами, так і за характером часових змін. За час інструментальних спостережень абсолютних значень поля максимальні значення ВВ(Т) спостерігали на ПА-, КА-плитах і на шельфі АФ-плити. Обсерваторії, графіки часових змін ВВ(Т) яких очищені від короткоперіодних варіацій, генерованих зовнішніми джерелами, за характером змін можна поділити на 10 груп, що наведені нижче:

- 1) високоширотні обсерваторії Північної та Південної півкуль Землі, які охоплюють полярні шапки та авроральні зони ЄА-, ПА- та АН-плит;
- 2) низькоширотні приекваторіальні обсер-

ваторії, які розміщені на ПА-, АФ-, ІК-плитах;

- 3) Західноєвропейські обсерваторії (NGK, HAD) та обсерваторії на Східноєвропейській платформі у середніх широтах ЄА-плити (LNN, SVD);
- 4) обсерваторії, що розміщені на Західносибірській, Сибірській платформах, ЄА-та КИ-плиті;
- 5) обсерваторії Індостанської платформи ІА-плити;
- 6) середньоширотні обсерваторії ПА-плити;
- 7) окрема група обсерваторій: MLT — в Єгипті, KSA — в Лівані, TFS — в Грузії та KZN — на Волзі;
- 8) група обсерваторій, розміщених на ПіА-та КА-плитах;
- 9) обсерваторії на Австралійській платформі;
- 10) обсерваторії на ТО-плиті та на її межах.

Графіки ВВ(Т) на кожній з вищеперелічених груп обсерваторій змінюються особливим чином тільки для певної групи способом. Знакозмінні ВВ(Т) спостерігають тільки на ЄА-, КИ- та ІА-плитах і високоширотних обсерваторіях Канади (FCC, VLC, СВВ, МВС). На обсерваторіях, які розміщені на межі між Східноєвропейською та Західносибірською платформами (SVD, NVS), спостерігаємо графіки ВВ(Т) перехідного типу. Знакозмінні коливання ВВ(Т) на Сибірській платформі, ЄА-та КИ-плиті — антикорелюють з ВВ(Т) < 0 коливаннями на ПА-плиті. Значний вплив на вікові варіації має інтенсивність тектонічних процесів. Це добре підтверджується ВВ(Т) у Східній і Західній Африці, Східній і Західній Австралії, на Атлантичному і Тихоокеанському узбережжях ПА-плити. У полярних шапках і зонах полярних сьйв, на європейській та азіатській частинах ЄА-плити ВВ(Т) містять значну за величиною компоненту, пов'язану із сонячною та геомагнітною активностями. Такого самого впливу, але меншого за величиною зазнає ВВ(Т) на середньоширотних обсерваторіях. Це питання потребує окремого дослідження.

Основною закономірністю загальної кар-

тини вікової варіації геомагнітного поля є — подальше зменшення напруженості поля на всій Землі. Регулярне невелике збільшення поля спостерігаємо тільки на європейській частині ЄА-плити, причому процес збільшення тут відбувається у коливному режимі у фазі зі зміною геомагнітної активності.

Підсилюється негативний фокус ВВ(Т) в Атлантичному океані: на обсерваторії FRD ВВ(Т) досягла -130 , на обсерваторії SJG -140 нТл/рік, що підтверджує результат, отриманий у 1960-ті роки [Орлов и др., 1968].

Автори виражають щире подяку професору М. І. Орлюку за цінні поради та допомогу під час написання статті.

Список літератури

- Бондарь Т. Н., Головков В. П., Яковлева С. В. Магнитное поле Земли в XX веке. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. Т. 46. № 3. С. 409—412.
- Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Москва: Наука, 1973. 240 с.
- Демина И. М., Королева Т. Ю., Фарафонова Ю. Г. Аномалии векового хода главного геомагнитного поля в рамках иерархической дипольной модели. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008а. Т. 48. № 6. С. 849—858.
- Демина И. М., Никитина Л. В., Фарафонова Ю. Г. Вековые вариации главного магнитного поля Земли в рамках динамической модели его источников. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008б. Т. 48. № 4. С. 567—575.
- Демина И. М., Фарафонова Ю. Г. Дипольная модель главного магнитного поля Земли в XX веке. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004. Т. 44. №4. С. 565—570.
- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли. Москва: Наука, 1983. 416 с.
- Калинин Ю. Д. Вековые геомагнитные вариации. Новосибирск: Наука, 1984. 160 с.
- Касьяненко Л. Г., Демина И. М., Сос-Ухриновский А. Представление главного магнитного поля Земли системой оптимальных по ориентации и местоположению диполей. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002. Т. 42. № 6. С. 838—844.
- Орлов В. П., Ивченко М. И., Базаржапов А. Д., Коломийцева Г. И. Вековой ход геомагнитного поля для периода 1960—1965 годов. Москва: Изд-во ИЗМИРАН, 1968. 68 с.
- Орлюк М., Марченко А., Роменець А. Зв'язок сейсмічності Землі та вікових змін її магнітного поля. *Вісник Київського національного університету. Геологія*. 2016. № 4 (75). С. 50—54.
- Рузмайкин А. А., Соколов Д. Д., Шукуров А. М. О природе вековых вариаций главного магнитного поля Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1989. Т. 29. № 6. С. 1001—1006.
- Сумарук Т. П., Сумарук П. В. Квазидворічні варіації магнітного поля Землі. *Доп. НАН України*. 2009. № 1. С. 114—116.
- Сумарук Ю. П., Сумарук Т. П. Про вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля. *Доп. НАН України*. 2013. № 12. С. 107—113.
- Тяпкин К. Ф. Новая ротационная гипотеза формирования тектонических структур в земной коре. *Геол. журн*. 1974. № 4. С. 3—16.
- Тяпкин К. Ф. Новая ротационная модель магнитного поля Земли. *Геол. журн*. 1996. Т. 18. № 1. С. 30—37.
- Шевнин А. Д., Левитин А. Е., Громова Л. И., Дремухина Л. А., Кайнара Л. Н. Солнечная циклическая вариация в магнитных элементах обсерватории "Москва". *Геомагнетизм и аэрономия*. 2009. Т. 49. № 3. С. 315—320.
- Data catalogue. WDC, Kyoto, 2005. 183 p.
- Finlay C. C., Olsen N., Kotriaros S., Gillet N.,

- Toffner-Clausen L.*, 2016. Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth Planets Space* 68 (112). doi: 10.1186/s40623-016-0486-1.
- Golovkov V. P., Bondar T. N., Burdelnaya I. A., Yakovleva S. U.*, 1997. Using satellite magnetic survey for Spatial — temporal modeling of the geomagnetic secular variation. *J. Geomag. Geoelectr.* 49, 207—227.
- Langel R. A., Estes R. H.*, 1985. The near-earth magnetic field at 1980 determined from MAGSAT data. *J. Geophys. Res.* 90, 2495—2509.
- Olsen N.*, 2002. A model of the geomagnetic field and its secular variations for epoch 2000 estimated from Orsted data. *Geophys. J. Int.* 149, 454—462. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01657.x>.
- Sumaruk Yu.*, 2000. Sources of secular variations of the Earth's magnetic field. *Contrib. Geophys. Geod.* 30 (2), P. 158.
- Verbanac G., Luhr H., Rother M., Korte M., Mandea M.*, 2007. Contributions of the external field to the observatory annual means and a proposal for their corrections. *Earth Planets Space* 59, 251—257.

Secular variations of the geomagnetic field on lithosphere plates of the Earth

© P. V. Sumaruk, T. P. Sumaruk, 2018

The dependence of the value and sign of the geomagnetic secular variations (SV) refined of 3- and 11-year components on the position of observatories at different tectonic plates is investigated. The observatories of the long row observations were used for the studies. It is shown, that SV contain the components from internal and external sources. The values of the components change from plate to plate and even on the same plate. The secular variations have greater amplitudes in the regions with the intensive tectonic processes. Ten regions, having peculiar character of the SV, are distinguished. Secular variation may be of opposite phases in different tectonic plates, but extremes of their curves of hourly changes and the change of SV sign in most cases coincide with maximums and minimums of solar and geomagnetic activities. The assumption is made that internal and external sources of SV of the geomagnetic field are mutually connected. External sources play an important role in generation of SV. The maximal amplitudes of SV during all observational period were observed in two regions: the first region — the eastern part of the North-American plate, Caribbean plate and the northern part of the South-American plate, the second region — the western part of the Indian ocean. The value of SV component from the external sources depends on the geomagnetic latitudes of the observation places. Its amplitude increases with the increase of latitude of the observatories. The maximal values of SV components from external sources are observed at the magnetic and geomagnetic poles. The influence of the external sources on SV value is observed at the observatories placed under equatorial ionospheric electrojet. The main peculiarity of the nowadays geomagnetic field secular variations is decreasing the field intensity in the most regions of the Earth. In the second half of the twentieth century the regular small increasing of the field is observed only in the European part of Eurasian plate.

Key words: geomagnetic field, secular variation, external sources, lithospheric plates.

References

- Bondar T.N., Golovkov V.P., Yakovleva S.V., 2006. The geomagnetic field in the XX century. *Geomagnetizm i aeronomiya* 46(3), 409—412 (in Russian).
- Vitinskiy Yu. I., 1973. Cyclicity and solar activity prediction. Moscow: Nauka, 183 p. (in Russian).
- Demina I.M., Koroleva T. Yu., Farafonova Yu. G., 2008a. Anomalies in the secular variations in the main geomagnetic field in the context of the hierarchic dipole model. *Geomagnetizm i aeronomiya* 48(6), 849—858 (in Russian).
- Demina I.M., Nikitina L. V., Farafonova Yu. G., 2008b. Secular variation in the main geomagnetic field within the scope of the dynamic model of field sources. *Geomagnetizm i aeronomiya* 48(4), 567—575 (in Russian).
- Demina I.M., Farafonova Yu. G., 2004. Dipole model of the main geomagnetic field in the XX century. *Geomagnetizm i aeronomiya* 44(4), 565—570 (in Russian).
- Zharkov V.N., 1963. The internal building of the Earth. Moscow: Nauka, 416 p. (in Russian).
- Kalinin Yu. D., 1984. Secular geomagnetic variation. Novosibirsk: Nauka, 160 p. (in Russian).
- Kasyanenko L. G., Demina I. M., Sos-Ukhrinovskiy A., 2002. Presentation of the main field of the Earth by the system of optimal on orientation and positions dipoles. *Geomagnetizm i aeronomiya* 42(6), 838—844 (in Russian).
- Orlov V.P., Ivchenko M.I., Bazarzhapov A.D., Kolomyitseva G.I., 1968. Secular changes of the geomagnetic field for 1960—1965. Moscow: IZMIRAN, 68 p. (in Russian).
- Orlyuk M., Marchenko A., Romanets A., 2016. Earth's seismicity and secular changes of its magnetic field. *Visnyk Kyyivskoho natsionalnoho universytetu. Heolohiya* (4), 50—54 (in Ukrainian).
- Ruzmaykin A.A., Sokolov D.D., Shukurov A.M., 1989. On the nature of the main geomagnetic field secular variations. *Geomagnetizm i aeronomiya* 29(6), 1001—1006 (in Russian).
- Sumaruk T.P., Sumaruk P.V., 2009. Quasi two year variations of the Earth's magnetic field. *Dopovidi NAN Ukrayiny* (1), 114—116 (in Ukrainian).
- Sumaruk Yu. P., Sumaruk T.P., 2013. About the contribution of external sources in the age variation of the geomagnetic field. *Dopovidi NAN Ukrayiny* (12), 107—113 (in Ukrainian).
- Tyapkin K.F., 1974. The new rotation hypothesis of the tectonic structures formation in the Earth's crust. *Geologicheskij zhurnal* (4), 3—16 (in Russian).
- Tyapkin K.F., 1996. The new rotation model of the Earth's magnetic field. *Geologicheskij zhurnal* (4), 3—16 (in Russian).
- Shevnin A. D., Levitin A. E., Gromova L. I., Dremukhina L. A., Kaynara L. N., 2009. Solar cyclic variation in magnetic elements of Moscow observatory. *Geomagnetizm i aeronomiya* 49(3), 315—320 (in Russian).
- Data catalogue. WDC, Kyoto, 2005. 183 p.
- Finlay C. C., Olsen N., Kotriaros S., Gillet N., Toffner-Clausen L., 2016. Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth Planets Space* 68(112). doi: 10.1186/s40623-016-0486-1.
- Golovkov V.P., Bondar T.N., Burdelnaya I.A., Yakovleva S.U., 1997. Using satellite magnetic survey for Spatial — temporal modeling of the geomagnetic secular variation. *J. Geomag. Geoelectr.* 49, 207—227.
- Langel R. A., Estes R. H., 1985. The near-earth magnetic field at 1980 determined from MAGSAT data. *J. Geophys. Res.* 90, 2495—2509.
- Olsen N., 2002. A model of the geomagnetic field and its secular variations for epoch 2000 estimated from Orsted data. *Geophys. J. Int.* 149, 454—462. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01657.x>.
- Sumaruk Yu., 2000. Sources of secular variations of the Earth's magnetic field. *Contrib. Geophys. Geod.* 30(2), P. 158.
- Verbanac G., Luhr H., Rother M., Korte M., Mandea M., 2007. Contributions of the external field to the observatory annual means and a proposal for their corrections. *Earth Planets Space* 59, 251—257.