

Михайло ОРЛЮК¹, Андрій МАРЧЕНКО², Андрій РОМЕНЕЦЬ³,
Марія БАКАРЖІЄВА⁴, Іван ОРЛЮК⁵

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, пр-т Палладіна, 32, Київ, 03142, Україна e-mail:
¹orlyuk@igph.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6748-8766>; ²andrey_marchenko@ukr.net; ³romenets@ukr.net;
⁴bakarjieva@ukr.net; ⁵orliukim@gmail.com

<https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.074>

РОЗРОБКА ЦИФРОВИХ КАРТ МОДУЛЯ ІНДУКЦІЇ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Знання про геомагнітне поле території України ґрунтуються на результатах магнітних знімів модуля індукції геомагнітного поля $\mathbf{B}$ та його силових і кутових компонент, а також спостережень або розрахунку їх аномальних значень. У статті викладено методику та розроблено цифрову карту модуля індукції геомагнітного поля на епоху 1969,5 р., яка є базовою для розроблення карт модуля $\mathbf{B}$ та його аномалій $\Delta\mathbf{B}$ для довільної епохи. Для побудови карти модуля індукції геомагнітного поля $\mathbf{B}$ використано результати наземного абсолютного магнітного знімання 1969–1972 рр., аналітичну модель головного геомагнітного поля B_{IGRF} , а також карту аномального магнітного поля масштабу 1: 1 000 000. Цифрову карту модуля та аномалій модуля індукції геомагнітного поля $\mathbf{B}$ на епоху 1969,5 р. отримано у результаті розрахунку поправки за їх різницею значеннями в пунктах абсолютної опорної мережі, яку за допомогою інтерполяції було поширено за матрицею 1×1 км на увесь масив даних для території України. Модуль індукції геомагнітного поля $\mathbf{B}$ на епоху 2005,5 р. розраховано додаванням до його значень на епоху 1969,5 р. обчислених значень динаміки поля B_{IGRF} та “підмагнічувального” ефекту аномалій модуля індукції $\Delta\mathbf{B}$. Розроблена карта $\mathbf{B}_{i,p}$ є наближеним поданням модуля магнітного поля, оскільки під час розрахунку не взято до уваги залишкової намагніченості, що може зумовлювати незначні відхилення розрахованих та спостережених значень поля. Модуль індукції геомагнітного поля $\mathbf{B}$ на епоху 1969,5 р. змінюється в інтервалі $46500 \div 62000$ нТл, а на епоху 2005,5 р. – $47000 \div 63000$ нТл, зростаючи із південного заходу на північний схід території України. Максимальні його значення спостерігаються у районах регіональних та локальних магнітних аномалій, зокрема в районі Криворізько-Кременчуцької аномальної смуги та південно-східного краю Курської аномалії. Динаміка поля $\mathbf{B}_{IGRF}$ за період 1969,5–2005,5 рр. характеризується значеннями від 700 нТл на сході території України до 950 нТл на її заході, а величина підмагнічувального ефекту $\Delta\mathbf{B}$ змінюється у межах ± 10 нТл, досягаючи максимальних значень (до 100–190 нТл) в областях інтенсивних магнітних аномалій. Верифікація розробленої на епоху 2005,5 р. цифрової карти модуля індукції геомагнітного поля $\mathbf{B}$ вимірюваннями значень його модуля в магнітних обсерваторіях “Київ”, “Львів” та “Одеса”, а також у пунктах вікового ходу та опорних магнітних пунктах II класу засвідчила незначні ($-20 \div 40$ нТл) розходження розрахованих та виміряних значень модуля $\mathbf{B}$. Найзначніші їх відмінності просторово корелюють із областями сучасної активізації земної кори території України та аномаліями електропровідності.

Ключові слова: модуль індукції геомагнітного поля $\mathbf{B}$; магнітна зйомка; магнітні карти; аналітична модель поля IGRF-DGRF; пункти вікового ходу.

Вступ

Інформація про геомагнітне поле території України ґрунтується на результатах магнітних знімів модуля індукції геомагнітного поля $\mathbf{B}$ та його компонент B_z , B_x , B_y , B_H , D , I , а також спостережень або розрахунку їх аномальних значень.

Внутрішнє магнітне поле Землі є векторною сумою головного магнітного поля $\mathbf{B}_{IGRF}$ (поля ядра Землі) та аномального магнітного поля $\Delta\mathbf{B}$ (поля літосфери Землі). У практиці магнітометричних робіт сьогодні вимірюють модуль вектора індукції магнітного поля Землі $\mathbf{B}$ (раніше також вимірювали аномалії його вертикальної складової ΔB_z). Надалі із використанням цих даних розробляють карти аномального магнітного поля $\Delta\mathbf{B}$, які широко

використовують для вирішення багатьох геолого-геофізичних завдань. Розроблення карт аномального магнітного поля на певну епоху є доволі складним завданням щодо приведення до одного рівня наявних магнітних різночасових і різномасштабних знімів окремих ділянок. Окрім того, карти аномального магнітного поля недостатньо для вирішення доволі актуальних нині завдань навігації та оцінювання екології довкілля. Зважаючи на це, автори запропонували методику розроблення та побудували цифрову карту модуля індукції геомагнітного поля $\mathbf{B}$ для території України на епоху 1969,5 р., яка є базовою для розроблення карт аномального магнітного поля $\Delta\mathbf{B}$, розрахунку силових та кутових елементів геомагнітного поля тощо. Карта модуля індукції

геомагнітного поля $B_{1969,5}$ є вихідною для розроблення карт та аномалій модуля індукції геомагнітного поля для довільної епохи. Як приклад розроблено карту модуля індукції B та його аномалій ΔB на епоху 2005,5 р.

Мета

Метою наукового дослідження є розроблення цифрових карти модуля індукції геомагнітного поля B та його аномалій ΔB на епоху 1969,5 та їх використання як опорних (вихідних) для побудови відповідних карт для довільної епохи. Необхідно розробити технологію розрахунку та побудувати карту модуля індукції геомагнітного поля на епоху 2005,5 р. з урахуванням динаміки поля B_{IGRF} та значень підмагнічувального ефекту аномалій ΔB за 36 років.

Вихідні дані. Згідно із завданням для побудови карт модуля індукції геомагнітного поля на різні епохи необхідні результати вимірювання абсолютних його значень, вікових змін, карт аномального магнітного поля, оцінки величини підмагнічувального ефекту тощо, а саме:

- результати наземного абсолютного магнітного знімання 1969–1972 рр. Мережа опорних пунктів (1460 шт.) із середньою густотою 1 пункт на 400 км²; абсолютні значення модуля вектора B приведено до епохи 1969,5 р. Середньоквадратична похибка знімання для B становить $s = \pm 6,0 \pm 6,5$ нТл [Пашкевич, Соловьев, 1971; Крутиховська та ін., 1973];
- аналітична модель головного геомагнітного поля B_{IGRF} . [DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1945–2024 and Related Parameters.htm];
- результати замірів модуля B у магнітних обсерваторіях “Київ”, “Львів” та “Одеса” [Орлюк та ін., 2012], у пунктах вікового ходу (ПВХ) (58 точок) [Трегубенко та ін., 2008, 2013] та опорних магнітних пунктах (ОМП) II класу з розрахунку один пункт на аркуш масштабу 1:200 000 (114 точок) [Канюка та ін., 2012];

- карти аномального магнітного поля масштабу 1: 500 000 ÷ 1: 1 000 000 [Карта..., 1977; Нечаєва та ін., 2002; Orlyuk et al., 2018];
- карта рельєфу земної поверхні [Ентин и др., 2015].

Методика побудови карт модуля індукції геомагнітного поля B

Формулу розрахунку модуля індукції B для довільної точки $i(x, y, z)$ для довільного року p можна записати так:

$$B_{i,p} = B_{0,i,p} + \Delta B_{i,op} + \Delta \Delta B_{i,p}, \quad (1)$$

де i – точка з координатами (x, y, z) ; p – рік розрахунку поля; $B_{0,i,p}$ – значення індукції нормального магнітного поля Землі; $\Delta B_{i,op}$ – аномалія модуля індукції опорного року; $\Delta \Delta B_{i,p}$ – зміна аномалій модуля індукції за рахунок варіацій зовнішнього поля $B_{0,i,p}$ (підмагнічувальний ефект). Розрахунок підмагнічувального ефекту зумовлений тим, що у випадку обумовленості сумарної намагніченості породи індуктивною компонентою I_i значення аномалії залежить від намагнічувального поля $B_{0,i,p}$. Згідно із [Орлюк, Роменець, 2005] співвідношення $\Delta D = \Delta B_{i,p} / B_{0,i,p}$ є сталим для такого типу джерел і може бути використаним для розрахунку $\Delta \Delta B_{i,p}$.

Як нормальне магнітне поле Землі використано його аналітичну модель IGRF-DGRF. Актуальну сьогодні модель IGRF-13 отримано на основі геомагнітних даних, отриманих із супутників, магнітних обсерваторій та аеро-, наземних і морських магнітних знімаль.

IGRF-13 надає модель DGRF для епохи 2015,0, модель IGRF для епохи 2020,0 і прогнозу модель вікової варіації IGRF для п'ятирічного інтервалу часу з 2020,0 до 2025,0. Для епох від 1900,0 до 2010,0 коефіцієнти моделі IGRF-13 не змінюються порівняно з IGRF-12. На рис. 1, а наведено карти модуля індукції геомагнітного поля B_{IGRF} для території України на епоху 1969,5 р. і його динаміку $B_{IGRF2005.5-1969.5}$ за 36 років.



Рис. 1. Модуль індукції геомагнітного поля B_{IGRF} для території України на епоху 1969,5 р. і його динаміка $B_{IGRF2005.5-1969.5}$ за 36 років (а) та пункти замірів модуля індукції B 1969–1972 рр.

На території України поле B_{IGRF} 1969,5 р. змінюється від 47400 нТл на заході – південному заході до 50200 нТл на її сході. Схоже поле B_{IGRF} на епоху 2005,5 р., яке змінюється в інтервалі 48400–51000 нТл. За вказаний інтервал часу модуль індукції геомагнітного поля B_{IGRF} має нерівномірну динаміку в межах нашої країни. Зокрема, найбільших змін B_{IGRF} зазнав на заході України, де значення $B_{IGRF2005.5-1969.5}$ становить 960 нТл. Найменше змінився модуль індукції нормального геомагнітного поля Землі на сході її території та в східній частині Криму і дорівнює 660 нТл.

Для розрахунку модуля індукції геомагнітного поля $B_{i,p}$ використано модульні значення поля на епоху 1969,5 р. – 1460 точок, цифрову карту аномального магнітного поля масштабу 1 : 1 000 000 (висота знімання 200 м відносно рельєфу поверхні Землі) з дискретизацією вибірки поля 1×1 км (близько 602000 точок) (рис. 2, а, б). Через різні рівні висот точок спостережень розраховано значення $B_{0,i,p}$ з урахуванням рельєфу поверхні Землі (рис. 2, в).

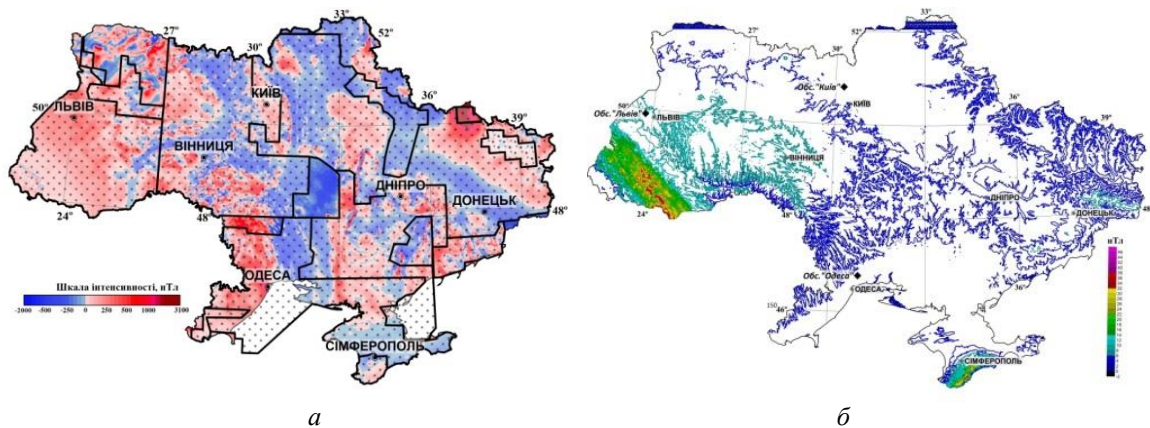


Рис. 2. Візуалізація цифрової карти аномального магнітного поля масштабу 1 : 1 000 000 (а) та значення поправки B_{IGRF} за рахунок рельєфу поверхні Землі (б). Чорними контурами та штрихуванням показано ділянки магнітних знімів. Інтенсивність аномалій в нанотеслах

Для значної частини території України ця величина не перевищує 5÷6 нТл. Трохи більші значення поправки за рельєф спостерігаються в районі центральної частини Донбасу та Подільської височини, досягаючи максимальних значень у межах Кримських (34 нТл) та Карпатських (46 нТл) гір.

Перший етап розроблення карти модуля індукції геомагнітного поля – приведення карти $\Delta B_{i,p}$ до одного рівня на епоху 1969,5 р. Насамперед на вихідну карту із мережею вибірки 1×1 км було нанесено пункти абсолютної опорної мережі, в яких отримано абсолютні значення вектора індукції геомагнітного поля B . Карту аномального магнітного поля [Нечаєва та ін., 2002] розроблено на основі різномасштабних (від 1 : 10000 до 1 : 200000) аеромагнітних, наземних та гідромагнітних знімів, виконаних упродовж тривалого часу. На жаль, не вказано технологію приведення карти до одного рівня, але відомо, що здебільшого використовували стандартні методики побудови карт аномального магнітного поля окремих ділянок із використанням нормального магнітного поля Землі ЛО ІЗМІРАН [Почтарев, 1980] на час їх знімання. Зважаючи на наведене вище, можна порівняти спостережені значення модуля індукції B з відповідними розрахованими їх значеннями. Для цього обчислено значення модуля індукції геомагнітного поля на епоху 1969,5 р. як суму нормального та ано-

мального магнітних полів $B_{L1969.5} = B_{0,1969.5} + \Delta B_a$, які кількісно порівнювали із абсолютними значеннями у точках спостереження 1969,5 р. Як нормальне магнітне поле Землі використано його аналітичну модель IGRF-DGRF [[https://ccmc.gsfc.nasa.gov/...](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/)]. У результаті отримано значення поправки для приведення карти модуля індукції B на епоху 1969,5 р. Водночас враховано, що в деяких точках, розміщених в областях із високоградієнтними аномаліями, були істотні розбіжності між спостереженими та розрахованими значеннями B_{1969} ($\sigma = B_{1969,сност} - B_{1969,розн}$) і їх не враховано під час введення поправки. За результатами аналізу розраховано значення σ у 1200 точках, які за допомогою інтерполяції поширено за мережею 1×1 км на територію України. Отриману поправку введено в карту модуля індукції $B_{1969,розн}$ на епоху 1969,5 р. Ця цифрова карта є базовою для розроблення карт модуля індукції геомагнітного поля $B_{i,p}$ для довільної епохи.

Розроблення карт модуля індукції геомагнітного поля для довільного року потребує насамперед урахування динаміки модуля його нормальної компоненти та “підмагнічувального” ефекту його аномалій $B_{i,op} = B_{0,i,p} + \Delta \Delta B_{i,p}$. Віковий хід геомагнітного поля оцінювали за динамікою поля B_{IGRF} , яка найближча до вікового ходу, розрахованого за обсерваторськими даними. Зокрема, для

обсерваторії “Київ” значення вікового ходу B за даними розрахованих середньорічних значень за період з 1969,5 р. до 2005,5 р. становить 884 нТл, за полем B_{IGRF} – 870 нТл, а для обсерваторії “Львів” – 952 нТл та 951,5 нТл, відповідно.

Згідно із [Орлюк, Роменец 2005], співвідношення $\Delta D = \frac{\Delta B_{i,p}}{B_{0,i,p}}$ є сталим і його можна використати для розрахунку $\Delta \Delta B_{i,p}$. Зважаючи на це, можна розрахувати значення підмагнічувального ефекту на будь-яку епоху. Для прикладу подано вираз оцінки цього параметра для часового інтервалу 1969,5÷2005,5 рр.

$$\Delta D = \frac{\Delta B_{i,1969}}{B_{0,i,1969}} = \frac{\Delta B_{i,2005}}{B_{0,i,2005}} = const \quad (2)$$

У цьому випадку невідома величина $\Delta B_{i,2005}$, яку можна отримати із співвідношення

$$\Delta B_{i,2005} = \frac{\Delta B_{i,1969}}{B_{0,i,1969}} * B_{0,i,2005} \quad (3)$$

Значення підмагнічувального ефекту $\Delta \Delta B_{i,p}$ визначається як різниця між аномаліями модуля індукції $\Delta B_{i,p}$ на епохи 1969,5 та 2005,5 рр.

$$\Delta \Delta B_{i,2005} = \Delta B_{i,2005} - \Delta B_{i,1969} \quad (4)$$

Зауважимо, що з використанням спостережень модуля індукції B у обсерваторіях та ПВХ параметр ΔD може бути використано для корекції рівня нормального магнітного поля Землі, що розглянемо в наступній публікації.

Результати дослідження та обговорення

Запропонована методика побудови карт модуля індукції геомагнітного поля, а також можливість

розроблення карти аномалій модуля індукції для 1969,5 р. дають змогу створити карту аномального магнітного поля [Нечаєва та ін., 2002; Orlyuk et.al., 2018] на цю епоху. Насамперед проаналізовано відмінність карти аномального магнітного поля $\Delta B_{1969,5} = B_{1969,5} - B_{IGRF1969,5}$ від вихідної карти [Нечаєва та ін., 2002]. На рис. 3 нанесено профілі, вздовж яких виконано порівняння значень аномального поля цих двох карт.

Аналізування аномального магнітного поля вздовж чотирьох профілів свідчить про значні відмінності в рівні полів розробленої нами карти та вихідної карти аномального магнітного поля. Різницею аномалії “регіональні” й змінюються у межах від перших десятків до 100–250 нТл. Це може бути зумовлено тим, що вихідну магнітну карту складено на основі різночасових магнітних знімків і з використанням нормального магнітного поля альтернативних моделей.

Профіль 1 простягається у північно-східному напрямку (див. рис. 5). Різницева крива добре апроксимується поліномом третього ступеня і змінюється від 60 нТл на сході до 140 нТл на заході (рис. 5). Щодо трендової складової виділяються “регіонально-локальні” відхилення інтенсивністю до $\pm (20 \div 60)$ нТл. У південно-західній та північно-східній частинах профілю спостерігаються мінімальні відмінності (до ± 20 нТл), а в центральній частині – максимальні до ± 60 нТл.

Для трендової кривої вздовж профілю 2, яка апроксимується поліномом 2 ступеня, характерні значення поля від 0–30 нТл на краях до 80–90 нТл у центральній частині. На цьому фоні характерні відхилення поля ± 20 нТл/

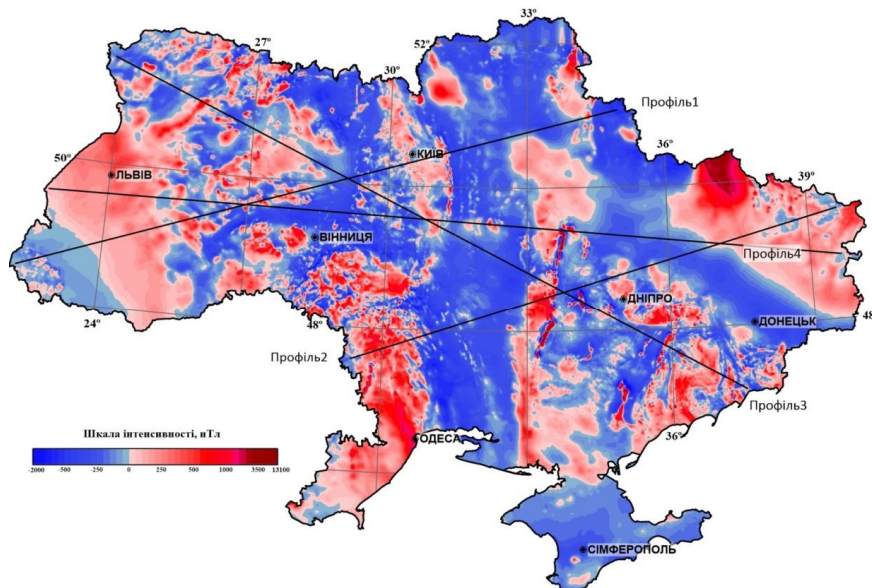


Рис. 3. Карта аномального магнітного поля на епоху 1969,5 р. $\Delta B = B_{1969,5} - B_{IGRF1969,5}$ з нанесеними профілями, вздовж яких виконано порівняння значень аномального поля з вихідною картою аномального магнітного поля [Нечаєва та ін., 2002]

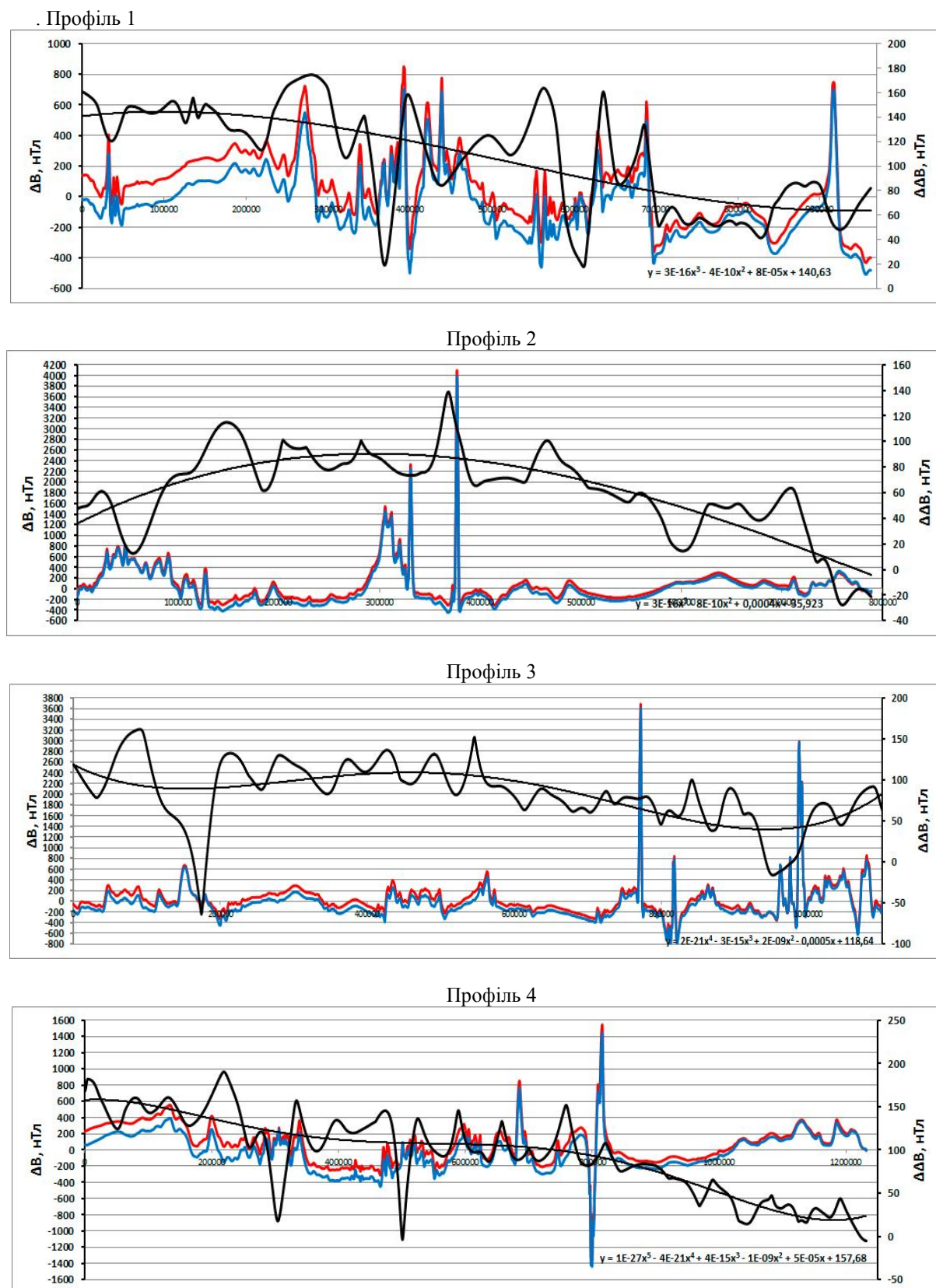


Рис. 4. Графіки аномального магнітного поля вздовж профілів: вихідної карти [Нечаєва та ін., 2002] (ліва шкала, червоний колір), розробленої карти $\Delta B_{1969,5}$ (ліва шкала, синій колір) та різницева крива (чорний колір, жирною лінією – тренд, права шкала)

Близькими значеннями трендової та регіонально-локальної складових характеризується різницева крива для профілю 3. У районі профілю 4 трендова складова змінюється від 150 нТл на заході профілю до 25 нТл на сході. Локальні відхилення характерні для західної частини профілю, сягаючи $\pm 40\text{--}80$ нТл. Зважаючи на аналіз різницевого графіків вихідної карти аномального магнітного поля та карти аномального магнітного поля, приведеної до епохи 1969,5 р. з використанням поля B_{IGRF} , можна стверджувати про їх істотні відмінності як у регіональному, так і в локальному проявах. Водночас розраховане середнє значення аномального магнітного поля ΔB розробленої карти – близько 0 нТл, що свідчить про правильність рівня нормального магнітного поля Землі. До введення поправки середнє значення ΔB дорівнювало 85 нТл.

На рис. 5 наведено результати побудови карти модуля індукції геомагнітного поля для території України. Як бачимо на рис. 5, а, поправка щодо приведення модульних значень до рівня 1969,5 р. змінюється від $\sigma = -200$ нТл на заході території до $\sigma = 150$ нТл на сході, але для більшої частини вона міститься у межах $-100\text{--}0$ нТл. Зазвичай σ має регіональну складову, але в певних місцях є локальною. Модуль індукції геомагнітного поля $B_{i,1969,5}$ змінюється у межах 46500–62000 нТл, зростаючи з південного заходу на північний схід (рис. 5, б). На регіональному фоні 48000–50000 нТл виділяються регіональні та локальні магнітні аномалії, найінтенсивніші з яких відповідають Криворізько-Кременчуцькій та Курській аномаліям.

Модуль індукції геомагнітного поля $B_{i,2005,5}$ такий самий, але змінюється в межах 47000–63000 нТл. Динаміку поля B_{IGRF} та значення “підмагнічувального” ефекту наведено на рис. 5, в. $B_{IGRF,2005,5-1969,5}$ характеризується значеннями від 700 нТл на сході території України до 950 нТл на заході.

За 1969,5–2005,5 рр. значення “підмагнічувального” ефекту $\Delta AB_{i,2005,5-1969,5}$ змінювалося в межах ± 10 нТл, досягаючи максимуму (до $100\div 190$ нТл) в областях інтенсивних аномалій. Різниця між розрахованими та виміряними на ПВХ значеннями модуля індукції геомагнітного поля на епоху 2005,5 р. та 2010,5 р. не перевищує перших десятків нанотесла.

Запропонована методика та розраховані цифрові карти модуля індукції геомагнітного поля та його аномалій для довільної епохи повністю відповідають сучасним тенденціям щодо розроблення карт аномального магнітного поля різних масштабів та детальності [Korhonen, 2007; Maus, 2010; Maus et al., 2009; Meyer et al., 2017; Olsen et al., 2017; Liu et al., 2023] та модульних значень компонент геомагнітного поля [Chulliat et al., 2015; Enhansed ..., 2015; Enhansed..., 2017] для планети загалом.

Для оцінювання точності розрахованих значень $B_{i,2005}$ ми зіставили отримані значення із результатами знімання на ПВХ I та II класу (114 точок) [Канюка та ін., 2012; Трегубенко та ін., 2008, 2013; Maksymchuk et al., 2015, 2013]. Як бачимо з рис. 4, а, точки ПВХ, винесені на розроблену карту аномального магнітного поля на епоху 1969,5 р. ($\Delta B_{1969,5} = B_{1969,5} - B_{IGRF,1969,5}$), розташовані переважно у місцях зі слабкими магнітними аномаліями, але деякі із них розміщені в районах із сильно диференційованим магнітним полем, що спричиняє істотні розходження виміряних та розрахованих значень поля. Зважаючи на це, виконано оцінку середньоквадратичного відхилення із “вибраковуванням” пунктів зі значними розходженнями розрахованих та виміряних значень модуля B . Згідно із розрахунками, для 114 ПВХ різниці значення містяться у межах $(-150 \div 1073)$ нТл, а середньоквадратичне відхилення становить $\sigma = 15,1$ нТл, для 98 ПВХ $(-50 \div 112)$ нТл, $\sigma = 5,2$ нТл, а для 54 ПВХ $(-45 \div 41)$ нТл, $\sigma = 3,0$ нТл, відповідно. З урахуванням абсолютних значень поля B_{IGRF} (49000–50500 нТл) та його вікових змін (700–900 нТл) досягнуто точність розрахунку модуля B можна вважати більш ніж задовільною. На рис. 4, б показано карту різниці виміряних $B_{i,2005,вим}$ та розрахованих $B_{i,2005,розра}$ значень модуля індукції геомагнітного поля на ПВХ.

На рис. 6 показано карту різниці виміряних $B_{i,2005,вим}$ та розрахованих $B_{i,2005,розра}$ значень модуля індукції геомагнітного поля на ПВХ.

Згідно із аналізом для переважної частини території України це значення починає змінюватися від -20 до $+40$ нТл. Поширення похибки розрахованих значень відносно виміряних величин регіональне. Для центральної та східної частин території України аномалії різниці $B_{i,2005,вим} - B_{i,2005,розра}$ становлять $20\div 60$ нТл, на заході для більшої частини території характерні аномалії від -20 до $+40$ нТл. Такий розподіл $B_{i,2005,вим} - B_{i,2005,розра}$ може свідчити про недоврахування цієї величини у віковому ході нормального поля моделі IGRF. Але варто звернути увагу, що зміна регіонального фону чітко поділяє Україну на західну та східну частини, які відрізняються також за низкою геолого-геофізичних параметрів літосфери, зокрема швидкістю поздовжніх хвиль у верхній мантії, різним структурним планом лінеamentів та розломних зон. Звичайно, хоча і незначні, але закономірні відмінності розрахованих та спостережених значень B потребують пояснення. З нашого погляду, можливі причини варто пов'язувати із сучасними геодинамічними та флюїдними процесами, які можуть відбуватися у верхній мантії та зонах глибинних розломів, активованих на теперішньому етапі розвитку літосфери України. Насамперед варто звернути увагу на те, що західна частина території України характеризується зниженими швидкостями поздовжніх хвиль, а східна – підвищеними Гейко и др., 1998], що може свідчити про різний склад мантії стосовно флюїдної складової, можливо, зумовленої розвитком і формуванням Західноєвропейської платформи [Кутас и др., 2018].

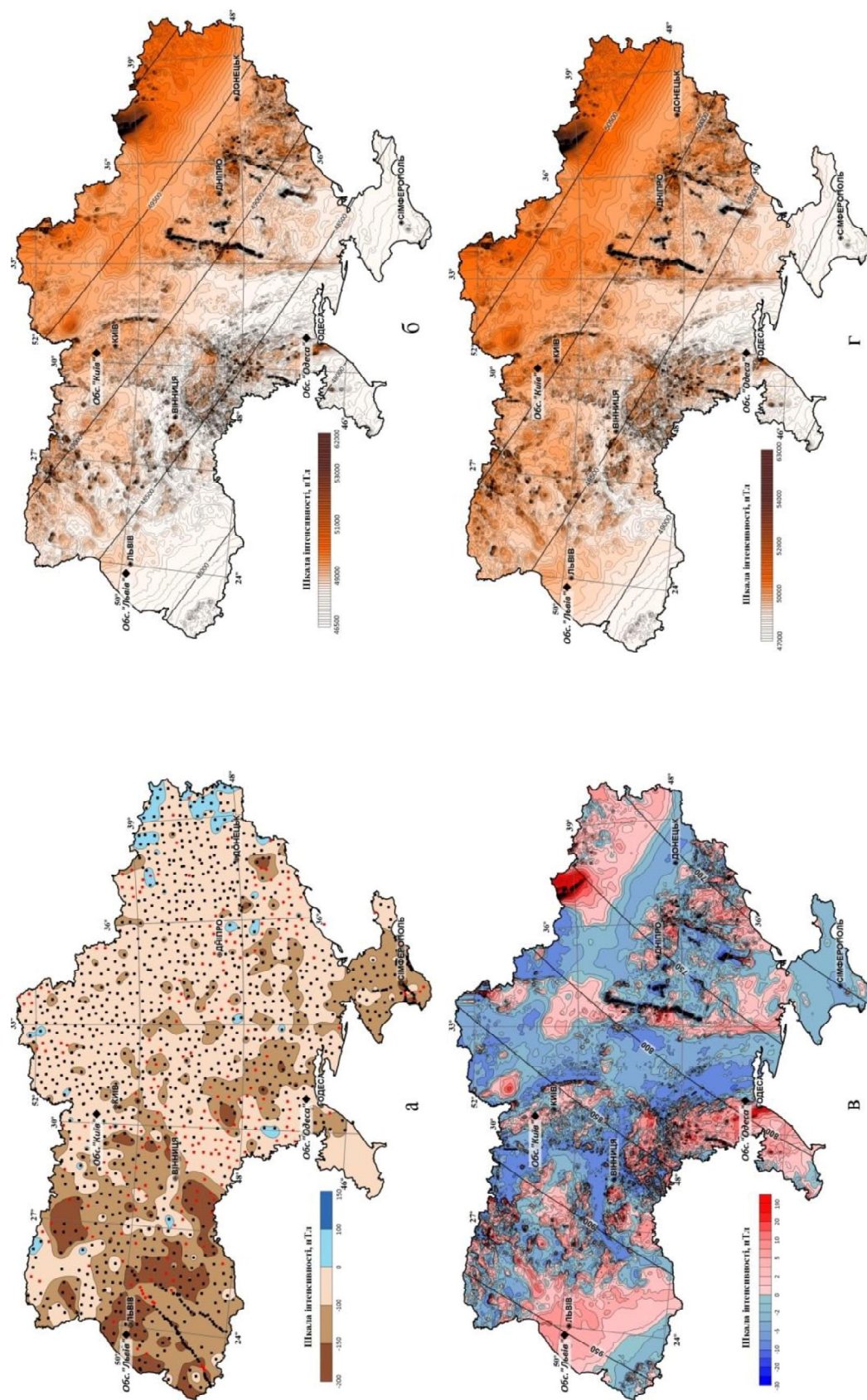


Рис. 5. Цифрова карта модуля індукції геомагнітного поля для території України: схема розташування пунктів (чорні та червоні крапки) заміру модульних значень поля на епоху 1969,5 р. та значення поправки для приведення даних до одного рівня (а); карта розрахованих значень модуля індукції $B_{1969,розр}$ (б); динаміка поля $B_{IGRF2005,5-1969,5}$ для інтервалу 1969–2005 рр. та значення підмагнітчуального ефекту $\delta AB_{1,2005,5-1969,5}$ (в); карта модуля $B_{1,2005,5}$ на епоху 2005,5 р. (г)

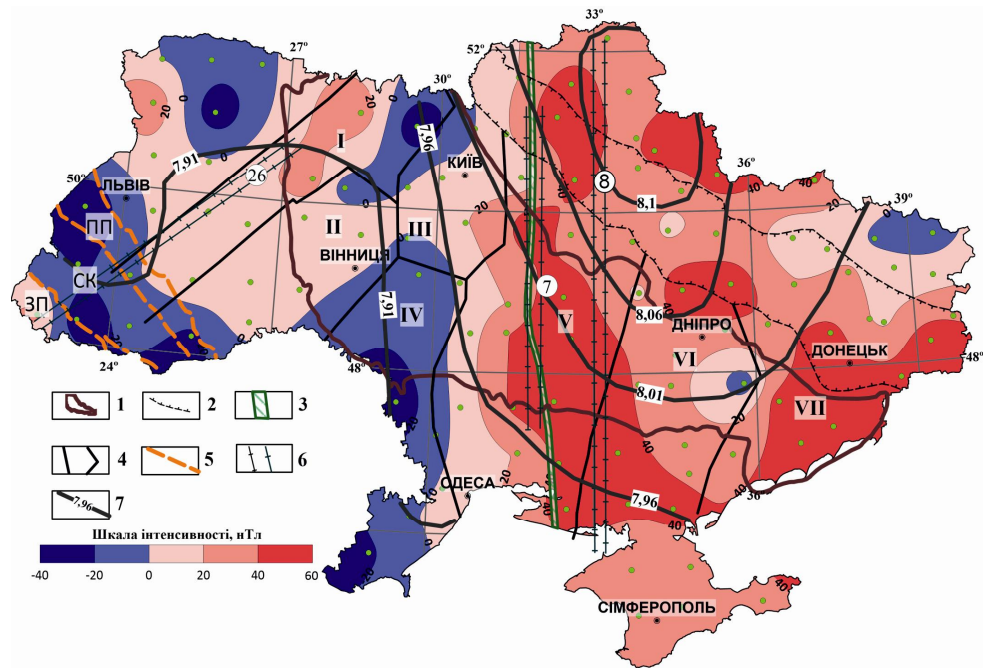


Рис. 6. Карта різницевих величин спостережених $B_{i,2005,c}$ та розрахованих $B_{i,2005,p}$ значень модуля індукції геомагнітного поля на ПВХ (точки зеленим кольором).

1 – границя Українського щита; 2 – границя Дніпровсько-Донецького авлакогену; 3 – трансрегіональний тектонічний шов Херсон – Смоленськ; 4 – зони міжмегаблокових розломів; 5 – границі тектонічних одиниць Українських Карпат: ПП – Передкарпатський прогин, СК – Складчасті Карпати, ЗП – Закарпатський прогин; 6 – лінеаментні зони (збережена авторська нумерація [Верховцев, 2008]); 7 – Щорсівсько-Миколаївська, 23 – Баштансько-Тельманівська, 26 – Хустсько-Корецька; 7 – швидкість поздовжніх хвиль на глибині 50 км [Гейко и др., 1998]. Мегаблоки Українського щита: I – Волинський; II – Подільський; III – Росинський; IV – Бузький; V – Інгульський; VI – Середньопридніпровський; VII – Приазовський; Шовні зони: ГШЗ – Голованівська; ІКШЗ – Інгулецько-Криворізька; ОПШЗ – Оріхово-Павлоградська

Найістотніші відмінності розрахованих і вимірних значень модуля B збігаються із областями сучасної активізації території України, які часто успадковують древні та новітні розломи та розломні зони, зокрема Карпатського регіону, південно-західного та південного краю Східноєвропейської платформи, трансрегіонального тектонічного шва Херсон – Смоленськ і близьких до нього Щорсівсько-Миколаївської та Баштансько-Тельманівської лінеаментних зон новітньої активізації земної кори [Кутас и др., 2018; Верховцев, 2008; Третьак та ін., 2015]. Насамкінець варто звернути увагу на певну узгодженість максимальних різницевих значень B з аномаліями електропровідності в земній корі та верхній мантії, найважливішими із яких є Карпатська та Кіровоградська зони [Третьак та ін., 2015; Бурахович, Кулик, 2007; Бурахович, Кушнір, 2023]. Із урахуванням наведеного вище можна констатувати, що запропонована технологія розрахунку значень модуля індукції геомагнітного поля B дає змогу не тільки отримати більш-менш достовірні їх значення на довільну епоху, але і виконати аналіз різницевих значень, які надзвичайно інформативні стосовно характеристики сучасних геодинамічних процесів.

Зауважимо, що розроблену технологію розрахунку модуля індукції геомагнітного поля можна застосувати не тільки для прогнозування його значень на майбутні епохи, але і для отримання інформації стосовно відповідних карт у минулі часи. З цієї метою ми розраховували B_z компоненту геомагнітного поля та аномалій ΔB_z на епоху 1935 р., для якої побудовано карту аномалій вертикальної складової геомагнітного поля для центральної та східної частин території України [Розе, 1937]. Зважаючи на точність побудови цієї карти (± 120 нТл) і відповідно проведення ізоліній поля через 500 нТл, зауважимо надзвичайно точну верифікацію розрахованих значень геомагнітного поля, як мінімум ізолініями поля 0 нТл, -500 нТл та 500 нТл.

Висновки

Вперше для території України розроблено цифрову карту модуля індукції геомагнітного поля B і його аномалій ΔB масштабу 1: 1 000 000 на епоху 1969,5 р. із використанням як нормального поля Землі IGRF-13 та запропоновано побудову відповідних карт для довільної епохи, зокрема для епохи 2005,5 р.

Для побудови карти модуля індукції геомагнітного поля B використано результати наземного абсо-

лютного магнітного знімання 1969–1972 рр., аналітичну модель головного геомагнітного поля B_{IGRF} , а також карту аномального магнітного поля масштабу 1:1 000 000.

Цифрову карту модуля та аномалій модуля індукції геомагнітного поля B на епоху 1969,5 р. отримано у результаті розрахунку поправки за їх різницеви значеннями в пунктах абсолютної опорної мережі, яку за допомогою інтерполяції поширено за мережею 1×1 км на весь масив даних для території України.

Модуль індукції геомагнітного поля B для довільної епохи розраховано додаванням до його значень на епоху 1969,5 р. розрахованих значень динаміки поля B_{IGRF} та “підмагнічувального” ефекту аномалій модуля індукції ΔB . Розроблена карта B_{ip} є наближеним поданням модуля магнітного поля, оскільки під час обчислень не враховано значення залишкової намагніченості, що може спричинити незначні відхилення розрахованих та спостережених значень поля.

Верифікація розробленої на епоху 2005,5 р. цифрової карти модуля індукції геомагнітного поля B замірами значень його модуля у магнітних обсерваторіях “Київ”, “Львів” та “Одеса”, а також у пунктах вікового ходу та опорних магнітних пунктах II класу показала їх розходження у межах -20 – 40 нТл.

Найістотніші відмінності розрахованих і виміряних значення модуля B збігаються із областями сучасної активізації території України, які часто успадковують древні та новітні розломи й розломні зони, а також із аномаліями електропровідності в земній корі та верхній мантії, найзначущішими з яких є Карпатська та Кіровоградська зони.

Список літератури

- Бурахович Т. К., Кулик С. Н. Квазитрехмерная геоэлектрическая модель Кировоградской аномалии электропроводимости. *Геофизический журнал*. 2007. Т. 29, № 1. С. 45–55. <http://www.igph.kiev.ua/ukr/journal.html#>
- Бурахович Т. К., Кушнір А. М. Історія, сучасний стан та напрями розвитку геоелектромагнітних досліджень в Україні. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2023. Вип. 1(100). С. 58–66. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.100.07>
- Верховцев В. Г. Новітні платформні геоструктури України та динаміка їх розвитку: автореф. ... дис. д-ра геол. наук. 2008. 36 с.
- Гейко В. С., Цветкова Т. А., Санникова Н. Г., Ливанова Л. П., Гейко К. В. Региональная 3-D P-скоростная структура мантии северо-западной Евразии. *Геофизический журнал*. 1998. Т. 2, № 3. С. 67–91.
- Ентін В. А., Гуськов С. И., Орлюк М. И., Гинтов О. Б., Осьмак Р. В. Карта абсолютных значений поля силы тяжести Украины и некоторые аспекты ее возможной интерпретации. *Геофизический журнал*. 2015. Т. 37, № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111323>
- Канюка А., Чуйко Л., Лозовий А., Мендрій Я. Створення мережі опорних геомагнітних (Т) пунктів території України: звіт про геофізичне вивчення надр. Фонди ДГЕ “Дніпрогеофізика”, ДГП “Укр геофізика”. 2012.
- Карта аномального магнітного поля Украинского шита м-ба 1:500 000. (1977). Пояснительная записка (под ред. Ю. Б. Кравченко, З. А. Крутиховской). Киев: Киевгеология. 100 с.
- Крутиховська З. О., Пашкевич І. К., Русаков О. М., & Соловйов В. Д. Наземна абсолютна магнітна зйомка території Української РСР. *Вісник АН УРСР*. 1973. № 9. С. 101–102.
- Кутас Р. И., Орлюк М. И., Пашкевич И. К., Бурахович Т. К., Макаренко И. Б., Бугаенко И. В. Глубинное строение территории Украины по современным геофизическим данным. Общие сведения. Киев: ВІ ЕНЕЙ, 2018. С. 17–24.
- Нечасва Т. С., Шимків Л. М., Горкавко В. М., Єнтін В. А. Карта аномального магнітного поля $(\Delta T)_a$ України м-бу 1:1 000 000. Київ. 2002. 1 лист.
- Орлюк М. И., Роменец А. А. Новый критерий оценки пространственно-временной возмущенности магнитного поля Земли и некоторые аспекты его использования. *Геофизический журнал*. 2005. Т. 27, № 6. С. 1012–1023. <http://www.igph.kiev.ua/ukr/journal.html#>
- Орлюк М. И., Роменец А. А., Сумарук П. В., Сумарук Ю. П., Сумарук Т. П. Пространственно-временная структура магнитного поля Земли территории Украины: оценка вклада внутренних и внешних источников. *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34, № 3. С. 137–145. <https://journals.uran.ua/geofizicheskiy/article/view/116651/110688>
- Пашкевич И. К., Соловьев В. Д. Результаты работ по созданию наземной опорной магнитной сети на территории УССР. Отчет о работе геофизической партии 93/68-71 за период 1968–1971 гг. “Часть I. Текст. Фонды ИГФ НАН Украины. 1971г.
- Почтарев В. И. Нормальное магнитное поле Земли. М.: Наука, 1980. 268 с.
- Розе Т. Н. Региональные магнитные аномалии Украины и их связь с геотектоникой. *Учен. зап. Ленингр. ун-та, Сер. Физ. наук*. 1937. № 3. С. 123–133.
- Трегубенко В. І., Максимчук В. Ю., Орлюк М. І., Марченко Д. О., Мясоєдов В. П., Роменец А. О. Проведення компонентної магнітної зйомки на опорній мережі та побудова карт нормального геомагнітного поля і вікового ходу епохи 2005 р. для території України. Фонди УТГФ, УкрДГРІ. 2008.
- Трегубенко В. І., Максимчук В. Ю., Орлюк М. І., Марченко Д. О., Мясоєдов В. П., Роменец А. О. Компоненти магнітного поля Зелі на території

- України для епохи 2010 р. за результатами вимірювання у пунктах вікового ходу. *Мінеральні ресурси України*. 2013. № 3. С. 37–40.
- Третяк К. Р., Максимчук В. Ю., Кутас Р. І. Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2015. 420 с.
- DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1945–2024 and Related Parameters.htm). https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/model_s/igrf_vitmo.php.
- Chulliat, A., S. Macmillan, P. Alken, C. Beggan, M. Nair, B. Hamilton, A. Woods, V. Ridley, S. Maus and A. Thomson (2015). The US/UK World Magnetic Model for 2015–2020: Technical Report, National Geophysical Data Center, NOAA. <http://doi.org/10.7289/V5TB14V7>
- Enhanced Magnetic Model (EMM) 2015. <https://www.ncei.noaa.gov/products/enhanced-magnetic-model>
- Enhanced Magnetic Model (EMM) 2017. <https://www.ncei.noaa.gov/products/enhanced-magnetic-model>.
- Korhonen, J. V., Fairhead, J. D., Hamoudi, M., Hemant, K., Lesur, V., Mande, M., Maus, S., Purucker, M., ... Thébaud, E. (2007). Magnetic Anomaly Map of the World, 1st edition. GTK, Helsinki. Map published by Commission for Geological Map of the World, supported by UNESCO.
- Liu, P. F., Jiang, Y., Yan, Q., and Hirt, A. M. (2023). The behavior of a lithospheric magnetization and magnetic field model. *Earth Planet. Phys.*, 7(1), 66–73. <http://doi.org/10.26464/epp2023025>
- Maksymchuk V., Orlyuk M., Tregubenko V. (2015). Repeat stations measurements in Ukraine 2014–2015. In *MagNetE 2015*, Budapest 16–18 september: abstracts. Budapest: Geological and Geophysical Institute of Hungary, p. 24.
- Maksymchuk V., Orlyuk M., Tregubenko V., Horodysky Y., Marchenko D. (2013). Ukrainian geomagnetic repeat station network and results of the field work reduced to the epoch 2005.5. *Ann. Geophys* [Internet]. 2013 Mar. 7; 55(6). Available from: <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/5406>
- Maus, S. (2010). An ellipsoidal harmonic representation of Earth's lithospheric magnetic field to degree and order 720. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11(6), Q06015. <https://doi.org/10.1029/2010GC003026>
- Maus, S., Barckhausen, U., Berkenbosch, H., Bournas, N., Brozena, ... C., Tontini, F. C. (2009). EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10(8), Q08005. <https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Meyer, B., Saltus, R., and Chulliat, A. (2017). EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>.
- Olsen, O., Ravat, D., Finlay, Ch. C., & Kother, L. K. (2017). LCS-1: a high-resolution global model of the lithospheric magnetic field derived from CHAMP and Swarm satellite observations. *Geophysical Journal International*, 211(3), 1461–1477. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx381>.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., & Bakarjjeva, M. (2018). Ukrainian Regional Magnetic Map: the results of calculations of the geomagnetic field components for the Epoch 2015. *COBS Journal*, 5, 40.

Mykhailo Orlyuk¹, Andriy Marchenko², Andriy Romenets³, Mariya Bakarzhieva⁴, Ivan Orliuk⁵

Institute of Geophysics by S. I. Subbotin, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, ¹orlyuk@igph.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6748-8766>, ²andrey_marchenko@ukr.net, ³romenets@ukr.net, ⁴bakarjjeva@ukr.net, ⁵orliukim@gmail.com

DEVELOPMENT OF GEOMAGNETIC FIELD INDUCTION MODULE MAPS FOR THE TERRITORY OF UKRAINE

Knowledge of Ukraine's geomagnetic field is based on magnetic surveys of the geomagnetic field induction module B and its power and angular components, as well as on observations or calculations of their anomalous values. The article describes the methods for constructing a digital map of the induction module of the geomagnetic field B . The map of module B for the epoch of 1969.5 is developed, which is the ground to create the maps of module B and its anomalies ΔB for an arbitrary epoch. The results of the ground absolute magnetic survey of 1969–1972, the analytical model of the main geomagnetic field B_{IGRF} , as well as the map of the anomalous magnetic field on a scale of 1:1,000,000 were used to construct the map of the geomagnetic field induction module B . The digital map of the module and anomalies of the geomagnetic field induction module B for the 1969.5 epoch was obtained by calculating the correction based on their difference values at the points of the absolute reference network. It was spread by interpolation according to the 1×1 km matrix to the entire data array for the territory of Ukraine. The geomagnetic field induction module B for the 2005.5 epoch was calculated by adding to its values in the 1969.5 epoch the calculated values of the field dynamics B_{IGRF} and the “magnetizing” effect of anomalies of the induction module $\Delta \Delta B$. The developed map is an approximate representation of the magnetic field modulus, since the amount of remanent magnetization was not taken into

account during the calculation, which may cause minor deviations of the calculated and observed field values. The induction module of the geomagnetic field $\mathbf{B}$ in the epoch of 1969.5 varies in the range of 46.500–62.000 nT, and in the epoch of 2005.5–47/000–63000 nT, increasing from the southwest to the northeast of the territory of Ukraine. Its maximum values are observed in the areas of regional and local magnetic anomalies, in particular in the area of the Kryvyi Rih – Kremenchuk anomalous strip and the southeastern edge of the Kursk anomaly. The dynamics of the $\mathbf{B}_{IGRF}$ field for the period of 1969.5–2005.5 is characterized by values from 700 nT in the east of the territory of Ukraine to 950 nT in the west, and the magnitude of the magnetizing effect $\Delta\Delta\mathbf{B}$ varies within ± 10 nT, reaching maximum values (up to 100–190 nT) in the regions of intense magnetic anomalies. The digital map of the geomagnetic field induction module $\mathbf{B}$, developed in 2005.5, has been verified. This was done by measuring the values of module $\mathbf{B}$ in the magnetic observatories of Kyiv, Lviv, and Odesa, as well as in the Repeat Stations of the Ist and IInd classes. The results showed that there was only a small difference (–20–40 nT) between the calculated and measured values of modulus $\mathbf{B}$. Their most significant differences are spatially correlated with areas of modern activation of the Earth's crust on the territory of Ukraine and electrical conductivity anomalies.

Key words: geomagnetic field induction module $\mathbf{B}$; magnetic survey; magnetic maps; analytical model of the IGRF-DGRF field; repeat station.

Надійшла 28.03.2024 р.