

## АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ ІНДУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ

Передавальні функції, отримані узагальненим методом магнітоваріаційного зондування співставлено з такими ж передавальними функціями отриманими традиційним шляхом використовуючи одні і ті ж експериментальні дані.

**Ключові слова:** геомагнітні варіації, узагальнене магнітоваріаційне зондування, передавальні функції, індукційні стрілки.

### *Вступ*

Згідно з законом електромагнітної індукції варіації геомагнітного поля, викликані іоносферними та магнітосферними струмами, збуджують в провідній Землі змінне електромагнітне (ЕМ) поле, котре дифузійно в неї проникає та затухає з глибиною, і відповідно викликає струми, котрі залежать від електропровідності. За рахунок явища скін-ефекту височастотні струми швидко затухають з глибиною, а тому викликані ними вторинні поля несуть інформацію лише про верхню частину розрізу. Зі зниженням частоти, вклад більш глибоких шарів в поле на поверхні зростає, що дає можливість отримати інформацію про глибинну частину геоелектричного розрізу. На основі співвідношень між спектрами варіацій компонент природного електромагнітного поля розраховуються оцінки функцій відгуку середовища на електромагнітне збудження (передавальні функції середовища), інтерпретація котрих дозволяє отримати модель розподілу електропровідності в Землі.

Магнітоваріаційні (МВ) методи використовують варіації лише трьох ортогональних компонент магнітного поля. Якщо додатково проводиться реєстрація варіацій двох ортогональних компонент електричного поля, спричиненого індукованими в провідній Землі струмами (телуричними струмами), з'являються додаткові можливості для досліджень електропровідності завдяки застосуванню магнітотелуричного (МТ) метода. При МТ дослідженнях використовується діапазон періодів варіацій електромагнітного поля 1 — 10000 секунд. На практиці при проведенні МТ спостережень одночасно проводиться реєстрація варіацій вертикальної компоненти магнітного поля. Це дозволяє, у зазначеному діапазоні періодів, отримати МВ передавальні функції (індукційні стрілки), котрі чутливі до неоднорідностей електропровідності в середовищі, а їх спільна з МТ імпедансами інтерпретація підвищує надійність отриманих моделей геоелектричного розрізу.

Результати МТ зондувань, як правило, ненадійні на періодах довших за 3 години (10000 с). Невеликі значення імпедансу у цьому діапазоні є причиною малої амплітуди варіацій природного електричного поля, і відповідно, значного впливу поля сторонніх, штучних джерел. Як результат — низьке співвідношення сигнал-шум по електричних каналах не дозволяє отримати надійні оцінки МТ передавальних функцій. Джерелом варіацій природного ЕМ поля на періодах довших за 3 години

є сукупність різноманітних струмових систем у магнітосфері та іоносфері Землі, поле котрих не завжди може бути адекватно описане моделлю „плоскої хвилі”, котра використовується при МТ зондуваннях, що в свою чергу теж перешкоджає успішному застосуванню МТ методу для глибинних зондувань. Тому більш перспективним тут є застосування МВ методів котрі базуються на спостереженнях варіацій компонент лише магнітного поля.

В попередні роки було розвинуто декілька градієнтних МВ методів призначених в основному для дослідження горизонтально однорідної Землі. Однак на практиці було показано наявність значних латеральних неоднорідностей навіть в мантії. Тому останнім часом значний інтерес приділяється методу узагальненого МВ зондування, котрий дозволяє вивчати не лише розподіл провідності Землі з глибиною, а також виявляти латеральні неоднорідності провідності. Метод узагальненого МВ зондування, по своїй суті, об'єднує метод градієнтного зондування однорідного середовища з виявленням неоднорідностей провідності за допомогою індукційних стрілок [Kuckes et al., 1985; Schmucker, 2003].

Періоди варіацій в околі 10000 с, в певній мірі, можна вважати критичними, тому що глибина проникнення ЕМ поля в провідну Землю стає співмірною з геометричними розмірами самих струмових систем, котрі служать джерелами варіацій. Тому, при використанні для індукційних зондувань довших періодів, виникає необхідність врахування просторової структури джерела поля, що в свою чергу вимагає зміни методів зондувань. При стандартних МТ, МВ зондуваннях будують залежності передавальних функцій до 10000 – 21000 с. При застосуванні узагальненого МВ зондування часто вдається отримати надійні оцінки передавальних функцій починаючи від 6000 с. Таким чином, в згаданому діапазоні періодів можна отримати оцінки МВ передавальних функцій, а саме індукційних стрілок, різними методами. За таких обставин завжди виникає актуальна проблема порівняння та аналізу поведінки еквівалентних параметрів отриманих різними методами. В даній роботі розраховано МВ передавальні функції на мережі пунктів спостережень двома методами: традиційним, як лінійні співвідношення між спектрами компонент поля котрі виникають при збудженні середовища так званою плоскою хвилею, та за допомогою метода узагальненого МВ зондування, котрий допускає складнішу модель джерела. Виконано їх порівняння та аналіз.

**Методи розрахунку передавальних функцій**

За умови збудження середовища змінним в часі однорідним горизонтальним магнітним полем, або вертикально падаючою плоскою хвилею, що з теоретичних міркувань в даному випадку є еквівалентним, в спостережуваному полі на поверхні шарувато-однорідної Землі буде відсутня вертикальна компонента магнітного поля  $B_z$ . Ненульове значення  $B_z$  буде спостерігатись за наявності в середовищі неоднорідностей провідності (індукційних стрілок). В такому випадку спектри варіацій ортогональних компонент геомагнітного поля  $B_x, B_y, B_z$  будуть зв'язані лінійними коефіцієнтами  $W_{zx}, W_{zy}$  (МВ передавальними функціями) [Schmucker, 1970, Паркінсон, 1986]

$$B_z = W_{zx} B_x + W_{zy} B_y \quad (1)$$

Такі передавальні функції (1), надалі, будемо називати традиційними.

Метод узагальненого МВ зондування, по своїй суті, об'єднує два МВ методи в один (градієнтного зондування однорідного середовища та виявлення неоднорідностей провідності за допомогою індукційних стрілок). Як результат – рівняння багатомірної лінійної регресії за допомогою трьох передавальних функцій середовища зв'язує спектр варіацій вертикальної компоненти магнітного поля  $B_z$  зі спектрами просторових похідних горизонтальних компонент  $\frac{\partial B_x}{\partial x}, \frac{\partial B_y}{\partial y}$ , а також зі спектрами горизонтальних компонент  $B_x, B_y$ :

$$B_z = C \left( \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} \right) + W_{zx} B_x + W_{zy} B_y \quad (2)$$

Співвідношення схоже до (2) було емпірично одержане базуючись на різних засадах [Kuckes at al., 1985, Schmucker, 2003], виведене теоретично [Гульєльмо і Гохберг, 1987] та розвинуте [Shuman & Kulik, 2002]. Опис особливостей розрахунку передавальних функцій для випадку узагальненого методу МВ зондувань формула (2), а також застосування його як до обсерваторських так і до польових даних можна знайти у [Ладанівський і др., 2010, Semenov et al., 2011].

На практиці МВ передавальні функції зручно представляти у вигляді дійсних  $Cu$  та уявних  $Cv$  індукційних стрілок та їх азимутів у конвенції Візе [Schmucker, 1970]:

$$Cu = \sqrt{\Re(W_{zx})^2 + \Re(W_{zy})^2},$$

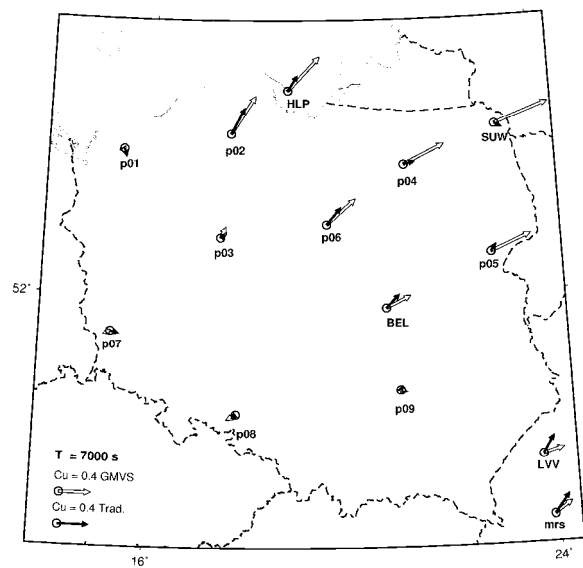
$$Cv = \sqrt{\Im(W_{zx})^2 + \Im(W_{zy})^2},$$

$$Az_{Cu} = \arctan\left(\frac{\Re(W_{zy})}{\Re(W_{zx})}\right),$$

$$Az_{Cv} = \arctan\left(\frac{\Im(-W_{zy})}{\Im(-W_{zx})}\right)$$

**Результати досліджень**

В рамках договору про співпрацю між Карпатським відділенням Інституту геофізики НАН України та Інститутом геофізики Польської академії наук в ході виконання проекту „Study of the Lithosphere Structure in the Marginal Zone of East European Craton by Means of Magnetovariational Sounding” у 2010 році проведено синхронні МВ спостереження у 12 пунктах на території Польщі та у двох пунктах на території України. Обробку отриманих даних виконано за традиційним методом (1) та з використанням метода узагальненого МВ зондування (2). Отримані МВ передавальні функції для всіх точок спостережень на періоді 7000 с у вигляді дійсних індукційних стрілок представлено на (рис. 1), а уявних (рис. 2).

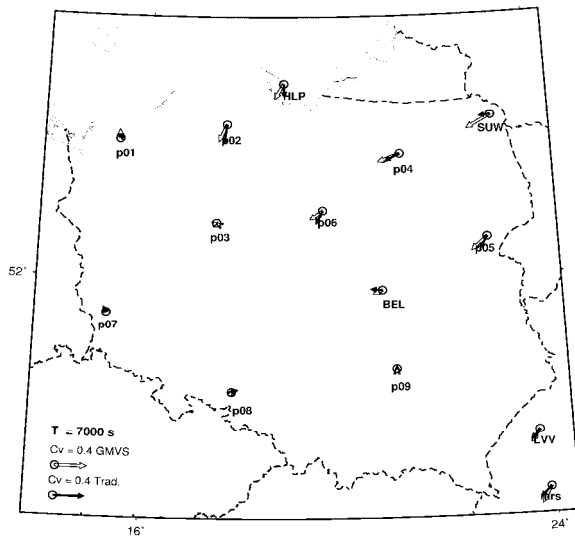


**Рис. 1.** Дійсні індукційні стрілки отримані двома методами на періоді 7000 с.

Суцільна стрілка – традиційний метод, формула (1); пустотіла стрілка – метод узагальненого МВ зондування, формула (2).

Як видно з рис. 2 уявні індукційні стрілки, отримані різними методами досить близькі за величиною та за напрямком. Уявні індукційні стрілки характеризують зв'язок між варіаціями вертикальної та горизонтальних компонент магнітного поля котрі знаходяться в квадратурі (зсунуті на 90°). Незначні розбіжності можна пояснити особливостями методик розрахунку та чутливістю їх до локальних шумів у точці спостережень. Розрахунок передавальних функцій у методі узагальненого МВ зондування ведеться з використанням синхронних даних одночасно з всього масиву точок [Ладанівський і др., 2010, Semenov et al., 2011], а локальні шуми в різних точках апріорно не корелюють. Тому можна допустити, що цей метод менш чутливий до впливу локальних шумів.

Ситуація більш складна та неоднозначна у випадку дійсних індукційних стрілок котрі характеризують зв'язок між синфазними варіаціями вертикальної та горизонтальних компонент магнітного поля. Для точок p1, p3, p7, p8 і p9 величина стрілки



**Рис. 2.** Уявні індукційні стрілки отримані двома методами на періоді 7000 с.

Суцільна стрілка – традиційний метод, формула (1); порожня стрілка – метод узагальненого МВ зондування, формула (2).

практично нульова тому напрямком визначається не надійно. Для точок p2, p6, BEL, LVV та mrs можна вважати, що співпадіння результатів задовільне, а розбіжності можна пояснити як у випадку уявних індукційних стрілок. В обох згаданих вище випадках можна вважати, що обидва методи дали досить близький результат. Найбільші розбіжності спостерігаються в точках HLP, SUW, p4, p5. Серед причин котрі могли викликати згадані розбіжності можна перерахувати: вплив джерел варіацій поля, особливості геологічної будови регіону, особливості кожного методу розрахунку. З'ясування причин розбіжностей результату в окремих точках, отриманого різними методами вимагає додаткових досліджень.

**Висновки**

Розраховано МВ передавальні функції для 14 точок експериментальних спостережень за допомогою двох методів – класичного та узагальненого МВ зондування. Виконано аналіз поведінки МВ передавальних функцій, представлених у вигляді дійсних (Сu)

**АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ**

**Б.Т. Ладановский**

Передаточные функции, полученные обобщенным методом магнитовариационного зондирования сопоставлены с такими же передаточными функциями полученными традиционным путем используя одни и те экспериментальные данные.

**Ключевые слова:** геомагнитные вариации, обобщенное магнитовариационное зондирование, передаточные функции, индукционные стрелки.

**ANALYSIS OF INDUCTION PARAMETERS OBTAINED WITH DIFFERENT METHODS**

**B.T. Ladanivskyi**

Based on the same experimental data, transfer functions were calculated with two different magneto-variational methods. The behavior of the functions is analyzed.

**Key words:** geomagnetic variations, generalized magneto-variational sounding, transfer functions, induction arrows.

та уявних (Cv) індукційних стрілок на періоді 7000 с. Для пояснення розбіжностей результату в окремих точках необхідно провести додаткові дослідження.

**Подяки**

Роботу виконано в рамках договору про співпрацю між Карпатським відділенням Інституту геофізики НАН України та Інститутом геофізики Польської академії наук та за часткової підтримки з гранта N N307 097437 Міністерства Науки і Вищої Освіти Польщі.

**Література**

Гульельми А. В., Гохберг М. Б. О магнитотеллурическом зондировании в сейсмоактивных районах // Физика Земли. – 1987. – **33**, – № 11. – С. 122-123.  
 Ладановский Б.Т. Семёнов В.Ю. Логвинов И.М., Методика магнитовариационного зондирования мантии Земли в диапазоне периодов  $10^4 - 10^5$  с // Геофизический журнал. – 2010. – **32**, – № 3. – С. 50-59.  
 Паркинсон У. Введение в геомагнетизм: Перевод с английского. – М.: Мир, 1986, – 528 с.  
 Fujii I., Schultz A. The 3D electromagnetic response of the Earth to ring current and auroral oval excitation // Geophys. J. Int. – 2002. – 151. – P. 689-709.  
 Kuckes, A.F., Nekut A.G., Thompson B.G. A geomagnetic scattering theory for evaluation of the Earth structure // Geophys. J. R. Astron. Soc. – 1985. – **8**. – P. 319-330.  
 Schmucker U. Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States. – Bull. Scripps Institution of Oceanography vol.13, University of California, – 1970. – 165p.  
 Schmucker U. Horizontal spatial gradient sounding and geomagnetic depth sounding in the period range of daily variation. In: Protokoll über das Kolloquium elektromagnetische Tiefenforschung ISSN 0946-7467, **20**. Kolloquium: Königstein: 29.09–3.10, 2003. – P. 228-237.  
 Semenov V.Yu., Ladanivskyi B.T., Nowozynski K. New induction sounding tested in Central Europe // Acta Geophysica. – 2011. – Vol. 59, no. 5. – P. 815-832.  
 Shuman V., Kulik S. The fundamental relations of impedance type in general theories of the electromagnetic induction studies // Acta Geophys. Polonica. – 2002. – **50**, – № 4. – p. 607-618.