

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу **Терешина Артема Валерійовича** «Електромагнітні дослідження Землі та Місяця», подану на здобуття ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.02.22 – геофізика.

Магнітотелуричні методи в геофізичній науці є одним із дієвих інструментів вивчення будови земних надр, зокрема структури її глибинної електричної провідності. В останній час все більше зростає також науковий інтерес до вивчення будови космічного земного супутника, яким є Місяць. Поряд із сейсмічними й гравітаційними спостереженнями, що виконуються на місячних орбітах зі супутників та на місячній поверхні, чільне місце в розв'язанні цієї задачі повинні відіграти й електромагнітні дослідження по вивченню електричної провідності Місяця.

Дисертація Терешина Артема Валерійовича присвячена аналізу проблемних питань застосування магнітотелуричних методів для дослідження глибинної електричної провідності земних надр, отриманню нових результатів вивчення відомої Кіровоградської аномалії електропровідності та її зв'язку з відомими глибинними аномаліями електропровідності Балтійського щита і Східно-Європейської платформи, а також аналізу умов і можливостей електромагнітного зондування Місяця. Розглянуті в роботі питання мають як наукову, методичну так і практичну значимість, тому є важливими й безперечно актуальними.

Дисертаційна робота Терешина А. В. складається із вступу, п'яти розділів та висновків, ілюстрована 32 рисунками, має 1 таблицю. При підготовці роботи автором використані загалом 99 джерел, списки яких фігурують після кожного розділу. Загальний об'єм роботи складає 132 сторінки комп'ютерного тексту.

У першому розділі автором дисертаційної роботи розглянуті і висвітлені основні принципи засади теорії електромагнітних полів щодо їх застосування при глибинних електромагнітних зондуваннях Землі та Місяця шляхом спостереження змінних у часі природних електромагнітних полів космічного походження. Зокрема, розглянуті електромагнітні поля на сферично-симетричній і горизонтально-шаровій Землі та встановлені умови частотного зондування, за яких спектральні імпеданси магнітної та електричної мод електромагнітних полів не залежать від структури джерела та визначаються лише провідністю Землі. У разі виконання цих умов можливе застосування теорії вертикально набіжних плоских електромагнітних полів. Акцентується, що невиконання умов частотного зондування може бути джерелом похибок, окреслюються умови, за яких ця похибка може збільшуватися.

Другий розділ дисертаційної роботи дисертант присвятив короткому опису методів електромагнітних досліджень, заснованих на реєстрації варіацій магнітотелуричних полів – магнітоваріаційному зондуванню й профілюванню та магнітотелуричному зондуванню. У вступній частині даного розділу дисертантом стверджується, що задача дослідження електропровідності всередині твердої Землі відноситься до особливо складних, тому прийнято її розділяти на два етапи - обробка даних, тобто перехід від вимірних параметрів поля до функцій відгуку, й

інтерпретація даних - перехід від функцій відгуку до моделей розподілу електропровідності в районі досліджень. Із цими положеннями безперечно необхідно погодитися, оскільки вони є класичними методологічними етапами будь-яких геофізичних досліджень. У зв'язку із громіздкістю множини можливих конкретних моделей, що відповідають даним вимірювань, автор пропонує відмовитися від пошуку однієї конкретної моделі електропровідності, а перейти до пошуку інваріантів - параметрів, притаманних всім моделям, які задовольняють даним спостереження. З позицій опонента цей крок видається слушним. Водночас обмежуватися лише інваріантами не є продуктивним. На погляд опонента варто визначені інваріанти із залученням як комплексних даних інших геофізичних методів, так і геологічних даних, використати для конкретизації моделей розподілу електропровідності.

У подальшому в цьому розділі розглянута суть зазначених вище МТ- методів в рамках класичної моделі МТ-поля, представленого лише магнітною модою, а також використовувані в цих методах інформаційні параметри - відношення вертикальної компоненти сферичної гармоніки вектора магнітної індукції до горизонтальної (МВЗ), типпер (вектори індукції) та горизонтальний магнітний тензор, амплітудні й фазові частотні характеристики аномальних полів (МВП), імпеданс та його вираження у вигляді фазових кривих і кривих уявного опору (МТЗ). Охарактеризовані основні положення методики інтерпретації даних МВП із залученням даних МВЗ й МТЗ та особливості кривих МТЗ і їх види спотворень впливом приповерхневих неоднорідностей.

В останньому підрозділі 2-го розділу дисертант аналізує фактори, що призводять до певних похибок у визначенні інформаційних характеристик, а відтак і результатів інтерпретації МТ-даних. До них відноситься, перш за все, невідповідність у більшості випадків реальних умов ідеалізованим як моделі поля, так і геоелектричній будові Землі, наприклад, невідповідність моделі Тихонова-Каньяра (плоске поле й горизонтально-шарова структура розрізу), чи спектральності імпедансу.

На основі виконаного у другому розділі аналізу дисертант приходить до висновку, що в разі досліджень глибинних провідників підвищеної провідності пріоритет доцільно надавати даним методу МВП (з використанням даних МВЗ й МТЗ) як таким, що з високою достовірністю визначають сам факт існування аномалії підвищеної провідності, положення її осі, максимально можливу глибину й ширину та інтегральну поздовжню провідність витягнутого тіла. Дані МВЗ й МТЗ використовуються для визначення нормального імпедансу в районі досліджень та глибини до поверхні аномального об'єкта.

Третій розділ дисертаційної роботи здобувач присвятив аналізу джерел природного змінного електромагнітного поля. У ньому наведено сучасне уявлення про формування природних електромагнітних полів, пов'язане із взаємодією сонячного вітру з магнітосферою Землі. Проаналізовані здобувачем наукові дані свідчать, що в природному електромагнітному полі космічного походження присутня електрична мода, яка зіставна з магнітною. Показано, що в земній системі існує так зване Глобальне електричне коло (ГЕК) у вигляді природного сферичного

конденсатора, що складається із двох провідників, розділених погано провідними шарами тропосфери й стратосфери, а саме – нижнього, яким є земна поверхня, заряджена негативно, і верхнього – електросфери на висоті 40-70 км, зарядженої позитивно. У роботі автором виконана оцінка параметрів густини вертикальних струмів, що втікають у землю ($\approx 2 \cdot 10^{-12}$ А/м²), сумарного струму через земну поверхню (≈ 1000 А) та параметрів глобального конденсатора - його ємності ($\approx 0,1$ Ф), повного електричного опору (≈ 1000 Ом) й сталої часу саморозряду (≈ 100 с). Наочно показано на конкретних прикладах виверження вулканів високу чутливість іоносфери до літосферних впливів. За висновком автора дисертаційної роботи електрична мода на сферичній Землі присутня, і в даний час не існує методики її виділення із повного спостережуваного поля.

У підрозділі 3.2 здобувачем наведений короткий опис і аналіз основних класів змінних електромагнітних полів – добових варіацій, збурень і пульсацій.

Четвертий розділ дисертаційної роботи є достатньо творчим і присвячений він аналізу робіт, виконаних у межах Кіровоградської та Карпатської аномалій електропровідності, а також власним дослідженням Кіровоградської аномалії. Автором у цьому розділі виконаний також співставний аналіз Кіровоградської та Ладозької аномалій.

Аналіз раніше виконаних магнітотелуричних досліджень КіРАЕ привів автора дисертації до виявлення певних протиріч у результатах інтерпретації, що на його думку пов'язано зі складністю самого об'єкта досліджень, значним впливом на структуру телуричних компонент МТ-поля приповерхневих неоднорідностей і певною мірою перебільшенням можливостей отримання коректних результатів двота тривимірного моделювання МТ-поля. В рамках раніше висловленої концепції, стосовно пріоритету методу МВП при глибинних МТ дослідженнях, автором дисертації були виконані магнітотелуричні дослідження на південному закінченні КіРАЕ, у результаті яких отримані нові важливі дані, що свідчать про продовження Кіровоградської аномалії електропровідності на південь з подальшим прямуванням під води Чорного моря. Результат новий і певною мірою суперечливий, адже до цих пір вважалося, що КіРАЕ закінчувалася поблизу південної границі Українського щита. Таке протиріччя автором пояснюється тим, що на криві МТЗ, на основі яких виконувалося моделювання, в умовах западини суттєво впливав ефект екранування, що значно утруднювало виділення на кривих МТЗ ефект присутності глибинного об'єкта з підвищеною провідністю. В роботі виконане співставлення КіРАЕ з постійним магнітним полем, у результаті чого встановлений їх взаємозв'язок.

В даному розділі виконано порівняльний аналіз Кіровоградської й Ладозької аномалій електропровідності (остання розташована в межах Балтійського щита), охарактеризовані їх загальні риси та відмінності. Здобувачем проаналізовані також й інші аномалії Східно-Європейської платформи, у результаті чого виявлений ланцюг аномалій, що в певних місцях перекриваються екрануючими осадовими басейнами, обмежений з півночі і півдня відповідно Ладозькою і Кіровоградською протяжними

аномаліями. Це дало автору ґрунтовні аргументи для припущення про існування єдиної Транс-Європейської аномалії електропровідності.

Четвертий достатньо об'ємний розділ закінчується аналізом магнітотелуричних досліджень Карпатської аномалії електропровідності, виконаних в Україні, Румунії, Словаччині. Висловлено припущення про її флюїдну іонно-провідну природу з наявністю частково розплавлених порід. Зроблений висновок про необхідність міжнародних зусиль по виконанню досліджень глибини до верхів КАЕ постановкою МТЗ вздовж осі аномалії. На думку автора роботи така необхідність пов'язана з потенційною перспективністю цього об'єкта, як можливого джерела теплової енергії (і/або мінеральних ресурсів).

Завершує змістовну частину дисертаційної роботи цікавий і важливий *п'ятий розділ*, присвячений аналізу можливостей і умов електромагнітних досліджень Місяця з метою вивчення його глибинної електропровідності. В розділі наведена коротка історія дослідження Місяця; проаналізовані умови формування електромагнітних полів на Місяці; розглянуті фізичні основи магнітних зондувань Місяця; виконаний критичний аналіз минулих зондувань; проаналізовані дані геофізичних спостережень, що свідчать про наявність горизонтальних неоднорідностей; проаналізована обґрунтованість наявності на Місяці процесів вулканізму й дегазації; розроблені практичні методичні рекомендації відносно можливих нових досліджень електропровідності Місяця.

Здобувачем показано, що в електромагнітному полі Місяця існує як магнітна мода, так і електрична. Виконані ним наближені розрахунки свідчать, що інтенсивність тороїдальної компоненти магнітного поля в електричній моді складають ≈ 8 нТл, що є достатньо близьким значенням до реально вимірюваного поля на місячній поверхні. Здобувач робить важливі висновки про можливість використання тороїдального поля для оцінки поперечного високоомного шару Місяця і про можливий відчутний внесок цього поля у спостережене на Місяці магнітне поле. Останній фактор особливо може бути відчутним за умови присутності локальних каналів і зон пониженого опору, про можливу наявність яких свідчать як результати сейсмологічних і гравітаційних досліджень (неоднорідний розподіл вогнищ землетрусів, присутність інтенсивних густинних неоднорідностей), так і прояви таких процесів, як вулканізм і дегація, що підтверджуються моніторинговими спостереженнями.

В розділі аналізуються особливості в структурі магнітної та електричної мод на різних ділянках місячної орбіти, у результаті чого виділяються три можливих різновиди зондувань - в умовах місячного дня, в умовах місячної ночі і в умовах «геомагнітного хвоста».

У підрозділі 5.2 ретельно розглянуті фізичні основи зондувань Місяця в рамках використання магнітної моди. Виписані умови частотного зондування, невиконання яких призводить до втрати зв'язку магнітного поля з електропровідністю. Установлені умови застосування методики МВЗ для реальних небесних тіл при однорідному збуджувальному полі, яким повинні задовольняти виміряні на поверхні

Місяця нормальна й тангенціальна компоненти магнітного поля, нормовані по відповідних компонентах збуджувального поля. У цьому ж підрозділі вказуються фактори, які є джерелом похибок при зондуваннях Місяця, такі як: «обдування» великої частини Місяця сонячним вітром; наявність електричної моди; прийняття за вакуум не лише витягнутої від Місяця порожнини, а всього простору поза Місяцем при зондуваннях Місяця в його нічній частині.

У підрозділі 5.3 проаналізовані деякі результати зондувань Місяця, проведених у 1970-ті роки. У результаті виконаного аналізу здобувач прийшов до висновку, що отримані із вимірювань функції відгуку не відповідають прийнятій моделі «Індукція однорідним зовнішнім полем у сферично симетричному Місяці», тому конкретні оцінки електропровідності Місяця, що ґрунтуються на цих даних, вочевидь не можуть викликати високу довіру.

У цьому ж підрозділі аналізуються дані, отримані гравітаційними вимірюваннями з навколomisячних супутників, про наявність густинних неоднорідностей, наводиться доволі суперечлива (на погляд здобувача) будова надр Місяця за сейсмічними даними, аналізуються присутні на місяці такі явища, як вулканізм і дегазація. Здобувач вважає, що присутність останніх є свідченням того, що в структурі місячної кори можливі флюїдомістки вертикальні канали підвищеної провідності, а відтак повинні існувати полоїдальні електричні струми й тороїдальні магнітні поля, просторову структуру яких необхідно ще вивчати. На основі аналізу просторово-часової структури наявних на Місяці місяцетрясінь автор дисертаційної роботи висуває гіпотезу про можливу наявність в мантиї Місяця структур типу плюмів.

На завершення 5-го розділу дисертаційної роботи, здобувач вносить цілком слушні пропозиції стосовно вдосконалення таких важливих наукових досліджень, як електромагнітне зондування Місяця з метою вивчення його електропровідності.

Переходячи до заключної оцінки дисертаційної роботи Терешина Артема Валерійовича опонент констатує наступне:

I. Обрана тема дисертаційної роботи є актуальною, оскільки вона пов'язана з удосконаленням методологічних засад, що сприяють підвищенню достовірності результатів дослідження електропровідності Землі та Місяця на основі уточнення структури використовуваного природного електромагнітного поля та вибору оптимальної технології експериментальних досліджень й інтерпретації експериментальних даних, а також направлена на отримання нових даних про глибинну електропровідність аномальних об'єктів на території України.

II. Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, є достатньо обґрунтованими, достовірними, мають новизну, яка полягає в наступному:

1. Удосконалене джерело геомагнітного поля на поверхні Землі за рахунок введення в його структуру електричної моди.

2. За результатом виконаних експериментальних досліджень на території УЩ отримані нові дані про електропровідність Кіровоградської аномалії електропровідності, які встановлюють продовження аномалії на південь і подальше її прямування під води Чорного моря.

3. На основі зіставлення Кіровоградської аномалії електропровідності зі стаціонарним магнітним полем встановлено їх взаємозв'язок у вигляді супровідної

присутності аномалій стаціонарного магнітного поля різних знаків з різних сторін Кіровоградської аномалії. Подібний взаємозв'язок установлений також для Ладозько-Ільменської аномалії Балтійського щита.

4. В результаті аналізу Ладозької аномалії Балтійського щита, низки аномалій Східно-Європейської платформи та Кіровоградської аномалії УЩ отримано ланцюг аномалій меридіонального простягання, що дає обґрунтовані підстави для припущення про існування єдиної Транс-Європейської аномалії електропровідності.

5. Установлено, що магнітне поле електричної моди в умовах високоомного поверхневого місячного шару може бути співставним з магнітним полем магнітної моди. Виконаний розрахунок полів електричної моди.

6. Виписані умови частотного зондування Місяця, невиконання яких призводить до втрати зв'язку магнітного поля з його електропровідністю. Установлені умови застосування методики МВЗ для реальних небесних тіл при однорідному збуджувальному полі, яким повинні задовольняти виміряні на поверхні Місяця нормальна й тангенціальна компоненти магнітного поля.

7. На основі аналізу даних про присутність суттєвих неоднорідностей у будові Місяця, вулканізму й дегазації висловлено припущення про можливу наявність флюїдомістких вертикальних каналів підвищеної провідності, як можливих джерел магнітних полів електричної моди, які можуть вносити суттєві похибки в результати зондувань.

8. На основі аналізу просторово-часового розподілу місяцетрясінь висловлена гіпотеза про можливу наявність в мантиї Місяця структур типу плюмів.

9. На основі виконаного в роботі аналізу і принципів методологічних розробок запропонована програма можливих майбутніх електромагнітних досліджень Місяця, яка включає використання як природних полів, так і полів контрольованих джерел.

III. Результати досліджень, виконаних здобувачем достатньо повно апробовані на Міжнародних наукових конференціях і висвітлені в опублікованих працях: 9 статей, 4 із яких входять до міжнародних наукометричних баз, і 1 монографія, а також 14 тез доповідей на Міжнародних наукових конференціях і симпозіумах.

IV. Результати роботи можуть бути використані науковою геологічною спільнотою для уточнення уявлень про глибинну будову півдня Східно-Європейської платформи. Методологічні розробки електромагнітних зондувань Місяця можуть бути використані в Міжнародних програмах дослідження Місяця, у яких Україна прийматиме участь.

V. Разом з безумовними науковими досягненнями до дисертаційної роботи в опонента є певні **зауваження**:

1. У першому підрозділі першого розділу розглядаються рівняння Максвелла для векторів поля й рівняння Гельмгольца для векторних потенціалів, а також формули Стреттона-Чу. З погляду опонента не завадило б пояснити суть і роль останніх в теорії електромагнітних полів в об'ємних середовищах. Окрім того в поясненнях позначень, що входять у ці формули фігурують не чітко визначені терміни: «електричні та магнітні струми», «електричні і магнітні заряди» у той час як це цілком визначені параметри – «густина електричних та магнітних струмів» й

«об'ємна густина електричних і магнітних зарядів», бажано було б дати пояснення позначенню $\epsilon' = \epsilon \pm \frac{\sigma}{i\omega}$, що це є комплексна діелектрична проникність.

2. У підрозділі 2.2 (стор. 36) стверджується «...домінуюча роль у формуванні аномального струму у локальному гарно провідному тілі (в аномалії електропровідності) належить процесу кондуктивного перетікання планетарно-регіонального струму із вміщуючого середовища в аномалію, а локальна індукція у більшості реальних геоелектричних ситуацій другорядна». А на рис. 2.1 демонструється механізм утворення аномального магнітного поля індуктивного типу й відповідні йому аномалії. Мабуть логічніше в цьому разі було б звернути увагу на особливості аномалій кондуктивного типу.

3. Видається не досить вдалою назва підрозділу 2.4 «Етапи геоелектричного дослідження», у якому аналізуються питання, що переважно охоплюють проблемні моменти аналізу експериментальних даних, а не етапи робіт.

4. У третьому розділі (стор. 50) за результатом виконаного розрахунку вертикальна компонента густини струму на земній поверхні в середньому складає $\approx 10^{-12}$ А/м². У свій час у роботах Виноградова А.П. (1960) і Четаєва Д. М. (1985) наводяться значення аналогічної компоненти геомагнітних пульсацій $\approx 10^{-9}$ А/м². Виникає питання про причини такої розбіжності.

5. У 4 розділі на стор. 80-81 є фрагмент «Однак, глибина верхньої кромки Кіровоградської аномалії складає 15 ± 5 км за даними 10 пунктів МТЗ над віссю аномалії. Цей факт у сукупності з іншими геофізичними даними дозволяє допускати можливість флюїдної природи і припускати процес сучасної тектонічної активізації у якості її джерела». На стор. 88 цього ж розділу стверджується «Для КіРАЕ більш ймовірна її електронно-провідна природа». Виникає питання, так все-таки, якою ж вважається природа Кіровоградської аномалії електропровідності?

6. Однією із пропозицій стосовно зондувань Місяця (стор.123) пропонується «Дистанційне глобальне ЕМ зондування Місяця на різних частотах із борту навколomisячних супутників». Не зовсім зрозуміло, як це можна практично реалізувати.

7. У 5 розділі на стор. 112 мова йде про перехідний процес, збуджуваний на Місяці однорідним зовнішнім полем. Зокрема відмічається: «Залежність амплітуди індукованого поля від часу близька до експоненти. Якщо провідність Місяця зростає із глибиною, ця залежність описується накладенням експонент». Справа в тому, що перехідний процес, збуджуваний однорідним зовнішнім полем у провідному тілі сферичної форми завжди, навіть коли це тіло однорідне, представляється нескінченною суперпозицією експонент. Тільки починаючи з певного часу перехідного процесу (його умовно можна назвати «пізнім часом»), дійсно, перехідний процес може бути описаний практично одною (першою із нескінченного ряду) експонентою.

8. Є певні зауваження технічного характеру, стосовно стилістичних виразів, подекуди також зустрічаються граматичні помилки.

Не дивлячись на зауваження, робота справляє позитивне враження, зазначені вище зауваження не знижують її наукового рівня. Дисертаційна робота свідчить про належний науковий потенціал дисертанта, його вміння ставити і розв'язувати важливі наукові задачі – від теоретичних розробок до одержання значимих наукових і науково-практичних геолого-геофізичних результатів.

Дисертація належно оформлена. Текст автореферату відповідає змісту дисертаційної роботи.

Аналіз дисертації, автореферату та опублікованих праць дає підстави для висновку про те, що робота «Електромагнітні дослідження Землі та Місяця» є завершеною самостійно виконаною науковою працею, що має вагомое теоретичне й практичне значення, заслуговує позитивної оцінки, відповідає вимогам пп. **9, 11, 12, 13** «Порядку присудження наукових ступенів» (Постанова Кабінету міністрів України від 24.07.2013 р. №567), вимогам наказу №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій та інших нормативним актам Міністерства освіти і науки **щодо кандидатських дисертацій**, а її автор Терешин Артем Валерійович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика.

Доцент кафедри геофізики
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
кандидат фізико-математичних наук

Рева М. В.

ПІДАМС ЗАСІДУ
ВЧЕРН СЕКРЕТАР НДЧ
КАРАУЛЬНА Н. В.
18.08.2021р.

