

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

**ТЕРЕШИН Артем Валерійович**

УДК 537.8:523.31/.34(043.3)

**Електромагнітні дослідження Землі та Місяця**

04.02.22 – геофізика  
103 – Науки про Землю

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

**Київ - 2021**

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Рокитянський Ігор Іванович**,  
старший науковий співробітник  
Інститут геофізики імені С.І. Субботіна НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
**Стародуб Юрій Петрович**,  
професор кафедри цивільного захисту та комп'ютерного  
моделювання екогеофізичних процесів  
Львівського державного університету безпеки  
життєдіяльності

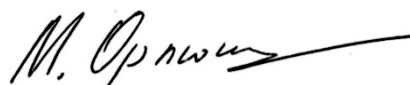
кандидат фізико-математичних наук,  
**Рева Микола Васильович**,  
доцент ННІ «Інститут геології»  
Київського національного університету імені Тараса  
Шевченка

Захист відбудеться «3» березня 2021 року о 11:00 годині на засіданні  
Спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики імені  
С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, просп. Академіка  
Палладіна, 32. Fax: +380(44)450-25-20; e-mail: rada-igph@igph.kiev.ua

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

Автореферат розіслано «29» січня 2021 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01  
доктор геологічних наук



М. І. Орлюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Електропровідність – важливий параметр, який характеризує склад та фізичний стан надр Землі, Місяця та планет. Дослідження рівнянь стану твердого тіла за високих тисків та температур, результати лабораторних експериментів указують на тісний зв'язок електропровідності гірських порід із температурою. Отже, вимір глибинної електропровідності може дати інформацію про температуру та фазовий стан надр, причому в даний час. Слід зазначити, що вимірювання теплового потоку дозволяють розрахувати глибинну температуру тільки у доволі віддаленому минулому. Дослідження глибинної електропровідності Землі дозволили суттєво уточнити розподіл температури в мантії Землі та локалізувати зони розплавів. Аналогічні дослідження Місяця та планет є важливими як для розуміння їх будови, так і для розвитку теорії походження та еволюції Сонячної системи. Електромагнітні дослідження також є ефективним інструментом пошуку та розвідки багатьох корисних копалин.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано на базі відділу Глибинних процесів Землі і гравіметрії Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України при виконанні держбюджетних тем Інституту: 1) Комплексне геолого-геофізичне вивчення глибинної будови південно-західної окраїни Східноєвропейської платформи з метою розширення мінерально-сировинної бази України (2006–2010), № р/н 0106U000911; 2) - Побудова тривимірної геолого-геофізичної моделі південної окраїни СЄП та її обрамлення з метою розширення мінерально-сировинної бази України (2011–2015) № р/н 0111U000236; 3) Комплексне геофізичне дослідження літосфери України: від моделей до процесів формування родовищ корисних копалин (2016–2020) № р/к 0116U000131.

**Мета і завдання дослідження** відповідно до предмета та об'єкта дослідження полягають у вивченні електропровідності Землі та Місяця і підвищенні достовірності отриманих результатів шляхом вибору оптимальної методології проведення робіт та інтерпретації, а також шляхом уточнення структури використовуваного природного електромагнітного поля.

Для досягнення цієї мети були вирішені такі завдання:

- оцінка величини електричної моди на Землі та Місяці і її впливу на дослідження електропровідності, що базується на використанні теорії, яка передбачає існування тільки магнітної моди.
- критичний аналіз, виконаних електромагнітних зондувань Місяця, та формулювання рекомендацій для оптимального планування майбутніх досліджень електропровідності Місяця.
- аналіз методології дослідження двох найбільших аномалій електропровідності України, Кіровоградської та Карпатської, і розробка рекомендацій щодо оптимальної стратегії майбутніх досліджень.
- проведення експериментальних досліджень за допомогою сучасного обладнання та з використанням передових технологій спостережень, обробка результатів досліджень сучасними програмними комплексами. Інтерпретація отриманих результатів.

**Об'єкт дослідження** – електропровідність Землі та Місяця а також електромагнітні поля, які використовуються для дослідження електропровідності.

**Предмет дослідження** – двомодальність природних електромагнітних полів і її вплив на дослідження електропровідності Землі та Місяця. Найбільші аномалії електропровідності України.

**Метод дослідження** та достовірність і обґрунтованість отриманих результатів та висновків включають в себе загальні підходи до збору, аналізу, систематизації та обробки даних; геофізичний експеримент у вигляді досліджень природного електромагнітного поля Землі за допомогою сучасної цифрової апаратури; аналіз функцій відгуку, що отримані методами обробки на основі аналізу Фур'є і робастних алгоритмів лінійного оцінювання у частотній області як одноточкових, так і багатоточкових записів за допомогою сучасних програмних комплексів; огляд та аналіз непрямих даних, що допомагають доповнити недолік прямих ЕМ даних.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

**Новизна** в описі джерела геомагнітного поля на поверхні Землі.

Теорія електромагнітних зондувань розвинута для магнітної (індукційної) моди, електрична мода вважалась нехтовно малою внаслідок досить високого опору приземного шару повітря. Проведений в останні роки супутниковими системами моніторинг параметрів іоносфери показав, що іоносфера досить чутлива до літосферних впливів. Передача цих впливів здійснюється переважно шляхом переносу зарядів (глобальне електричне коло), тобто вертикальними струмами в атмосфері, які утворюють електричну моду із горизонтальним магнітним полем. Теорія зондувань не враховує електричну моду, а відтак ці поля будуть виступати в якості завади на горизонтальних компонентах. Для векторів індукції ця завада буде мінімальною, оскільки у вертикальній компоненті її немає.

**Новизна** у дослідженні Кіровоградської аномалії та суміжних об'єктів:

1) Виконано дослідження південного продовження Кіровоградської аномалії, яке показало, що аномалія продовжується на південь та йде під води Чорного моря;

2) Зіставлення Кіровоградської аномалії електропровідності з аномаліями постійного магнітного поля показало їх певний взаємозв'язок: східніше КіРАЕ проходить додатна аномалія постійного поля, західніше – від'ємна. Подібна відповідність була встановлена і для Ладозько-Ільменської аномалії.

3) Для визначення ступеня універсальності отриманого взаємозв'язку було проаналізовано аномалії Східноєвропейської платформи до Балтійського щита включно. В результаті отримано ланцюг коротких аномалій, які перериваються осадовими басейнами, що екранують корові провідники, із двома довгими, добре вивченими схожими аномаліями на кінцях – Кіровоградською та Ладозькою. Цей матеріал дав підставу для припущення про існування єдиної Транс-Європейської аномалії електропровідності. Ця ідея прийнята тектоністами докембрію як одна із підстав для опису геологічних процесів у далекому минулому.

**Новизна** у дослідженні електропровідності Місяця:

1) Виконано розрахунки полів електричної моди за різного опору верхнього погано провідного шару. Виконано аналіз даних про горизонтальні неоднорідності всередині Місяця, про наявність вулканізму й дегазації із його надр, із яких зроблено висновок про необґрунтованість пануючої думки про дуже високий опір

верхнього 100-200 кілометрового шару, який перешкоджає проходженню вертикальних струмів і утворенню електричної моди на Місяці. Магнітне поле електричної моди може бути зіставне за порядком величини із полем магнітної моди, яка використовується для зондувань Місяця. Відтак присутність поля електричної моди може вносити значну похибку в результати зондувань і навіть виводити спостережувані поля за межі множини можливих розв'язків оберненої задачі.

2) Виписано умови, яким повинні задовольняти функції відгуку поставленої задачі (індукція магнітної моди під дією зовнішнього однорідного поля) та застосовані до спостережених даних. Виявилось, що більшість даних, які отримано у 1970-ті роки місіями Аполло та Луноход, не задовольняють теоретичним критеріям. Причина: дані ускладнено неконтрольованими (під час двоточкових спостережень) факторами (наявність електричної моди, неоднорідність поля, відхилення електропровідності Місяця від сферично симетричної та ін.), про які, у зв'язку з нестачею даних, робилося припущення про їх відсутність.

3) На основі викладеного запропоновано програму майбутніх електромагнітних досліджень Місяця.

4) На основі зіставлення та аналізу просторово-часового розподілу припливних та тектонічних місяцетрясінь висловлено гіпотезу про можливість існування в мантії Місяця структур типу плюмів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані та проаналізовані практичні дані уточнюють знання про найбільшу на території України Кіровоградську аномалію електропровідності, що є вагомим внеском у розуміння глибинної геоелектричної будови півдня Східноєвропейської платформи і можуть бути використані для побудови моделей глибинних геологічних та геотектонічних процесів у даному регіоні.

На підставі виконаних розрахунків природних змінних магнітних полів Місяця, а також аналізу значного об'єму інформації, запропоновано програму майбутніх електромагнітних досліджень Місяця.

**Особистий внесок здобувача** в основні роботи, виконані в співавторстві, визначається наступним чином. Монографія [Третяк та ін., 2014] та статті [Рокитянский та ін., 2013; Рокитянский та ін., 2014] - участь у постановці задачі, проведення аналізу літератури та систематизації отриманої інформації, участь у створенні рекомендацій щодо нових електромагнітних досліджень. Статті [Рокитянский, Терешин, 2010а; Рокитянский, Терешин, 2010б; Рокитянский, Терешин, 2020] – участь у постановці задачі, здійснення аналізу літератури, розрахунок величини електричної моди на Місяці, участь у створенні рекомендацій щодо подальших електромагнітних досліджень на Місяці. [Рокитянский та ін., 2012; Рокитянский та ін., 2018] – участь у постановці задачі, проведення експериментальних досліджень, обробка отриманих даних та їх інтерпретація, продовження осі Кіровоградської аномалії електропровідності на південь, зіставлення аномалії електропровідності з аномаліями постійного поля. Стаття [Рокитянский, Терешин, 2019] - участь у постановці задачі, обробка значного масиву даних обсерваторій, аналіз залежності амплітудного спектру від геомагнітної активності.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідались на таких наукових конференціях та асамблеях: IAGA WG 1.2, 20<sup>th</sup> International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. (Giza, Egypt, 2010); Міжнародна наукова конференція. Астрономічна школа молодих вчених. (Біла Церква, 2010); Международный семинар по электроагнитным зондированиям памяти Марка Наумовича Бердичевского и Петера Вайдельта, (Москва, 2010); 38th COSPAR Scientific Assembly, (Bremen, Germany, 2010); 5-я школа-семинар «ЭМЗ-2011», (Санкт Петербург, 2011); Международная конференция «Актуальные вопросы современных зондирующих электромагнитных систем». (Киев, 2012) 9<sup>th</sup> International conference. Problems of Geocosmos, St. Petersburg, 2012; 21<sup>st</sup> EM Induction Workshop (Darwin, Australia, 2012); 5<sup>ая</sup> международная научная конференция молодых ученых и студентов: «Фундаментальная и прикладная геологическая наука глазами молодых ученых: достижения, перспективы, проблемы и пути их решения» (Баку, 2013); 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop (Weimar, Germany, 2014); VI міжнародна наукова конференція «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища» (Львів, 2016); Третья международная конференция «Актуальные проблемы геосреды и зондирующих систем», (Киев, 2017);

**Публікації.** Основні наукові результати та висновки, викладені у дисертаційній роботі, одержані автором особисто або у співавторстві та опубліковані у журналах, які входять до затвердженого МОН переліку наукових фахових видань України з наук про Землю, або іноземних виданнях. За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць: 7 статей (3 входять до міжнародної наукометричної бази - Web of Science) і 1 монографія (друковане видання накладом 300 примірників), а також 14 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях і симпозиумах.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 132 сторінках машинописного тексту, складається з анотації, вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Обсяг основного тексту дисертації складає 116 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 34 рисунками та 1 таблицею. Список використаних джерел містить 99 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено загальну характеристику роботи, обґрунтовано доцільність обраного напрямку та актуальність дисертації, сформульовано мету, основні методи і задачі досліджень, визначено наукову новизну отриманих результатів, сформульовано основні наукові та практичні досягнення здобувача, а також подано інформацію щодо апробації одержаних результатів, публікацій, структури й обсягу роботи.

**Перший розділ «Співвідношення теорії електромагнітних полів, які лежать в основі геоелектрики»** дисертації є оглядовим, він написаний за матеріалами монографій [Стрэттон, 1948; Рокитянский, 1981; Бердичевский и Дмитриев, 2009] і ряду статей.

Було відмічено, що дослідження глибинної електропровідності Землі та Місяця ґрунтуються на спостереженні й аналізі природних електромагнітних (ЕМ) полів зовнішнього походження. У розділі наведені вихідні рівняння Максвелла, у скороченому вигляді представлений перехід до рівнянь Гельмгольца для векторного

потенціалу електричних та магнітних джерел поля. Використовуючи векторний аналог теореми Гріна, було отримано формулу Стреттона-Чу [Стрэттон, 1948], в якій електричне  $\mathbf{E}$  та магнітне  $\mathbf{B}$  поля в однорідному середовищі визначаються як функції об'ємних та поверхневих джерел електричного й магнітного типу. Якщо об'ємні джерела виключити із розгляду, оточивши їх поверхнями і задавши на цих поверхнях граничні значення компонент  $\mathbf{E}$  і  $\mathbf{B}$ , які описують поле джерел, то у формулі залишиться лише поверхневий інтеграл (в сумарну поверхню інтегрування  $S$  будуть включені всі поверхні, які оточують джерело). Тоді векторні функції  $\mathbf{E}$  і  $\mathbf{B}$  в області твердої планети не будуть мати джерел (літосферна ЕМ емісія не розглядається), і можуть бути виражені через свої значення на обмежувальній поверхні  $S$ :

$$\mathbf{E}(p) = -\frac{1}{4\pi} \int_S \{ \mp i\omega \mathbf{n} \times \mathbf{B}G + [\mathbf{n} \times \mathbf{E}] \times \text{grad } G + (\mathbf{n}\mathbf{E}) \text{grad } G \} ds; \quad (1)$$

$$\mathbf{B}(p) = \frac{1}{4\pi} \int_S \{ \mp i\omega \mu \varepsilon' \mathbf{n} \times \mathbf{E}G - [\mathbf{n} \times \mathbf{B}] \times \text{grad } G - (\mathbf{n}\mathbf{B}) \text{grad } G \} ds$$

де  $\mathbf{n}$  – нормаль до поверхні  $S$ ,  $G$  – функція Гріна.

Якщо  $S$  на деякій ділянці співпадає з поверхнею сферичного тіла або паралельна їй, то члени, які містять  $\mathbf{n} \times \mathbf{B}$  та  $(\mathbf{n}\mathbf{E})$ , відповідають електричній, тобто ТМ-моді, члени, які містять  $\mathbf{n} \times \mathbf{E}$  та  $(\mathbf{n}\mathbf{B})$ , відповідають магнітній, тобто ТЕ-моді. Структура формули Стреттона-Чу при об'ємному інтегралі, який дорівнює нулю, подібна структурі інтегралу Коші, який визначає аналітичну функцію в області за значеннями її на замкнутому контурі, що обмежує цю область. Тому формулу (1) можна використовувати для розділення поля на внутрішню та зовнішню, нормальну та аномальну, поверхневу та глибинну частини і для аналітичного продовження полів. Формула Стреттона-Чу виведена для однорідного простору і функція Гріна, що використовується в ній, є скаляром. На неоднорідних об'єктах функція Гріна перестає бути скаляром, а стає тензором другого рангу, що містить в загальному випадку 9 скалярних величин.

Далі розглядаються ЕМ поля на сферичній концентрично-шарованій та горизонтально шарованій моделях Землі/Місяця

$$\sigma = \sigma(r), [\sigma = \sigma(z)] \quad (2)$$

Відповідно до теорії векторних полів [Morse and Feshbach, 1953; Eckhardt, 1968], для таких середовищ розв'язання рівнянь електромагнітного поля може бути представлено сумою двох мод – електричною і магнітною, кожна із яких виражається через векторний потенціал, який містить лише одну (радіальну – орт  $\mathbf{e}_1$ ) компоненту:

$$\mathbf{A}^{e,m} = \Psi^{e,m}(r, \theta, \varphi) \mathbf{e}_1 \quad [\mathbf{A}^{e,m} = \Psi^{e,m}(z, x, y) \mathbf{e}_1], \quad (3)$$

- у (2-3) і наступних виразах перша формула дана для сфери в сферичних координатах  $(r, \theta, \varphi)$ , а друга (у квадратних дужках) для прямокутних координат  $(z, x, y)$ . Оскільки джерела магнітотелуричного поля знаходяться поза Землею, для провідних шарів Землі будемо вважати сторонні струми рівними нулю.

Підставляючи вираз (3) у векторне рівняння Гельмгольца отримуємо скалярне рівняння

$$\nabla^2 \Psi^{e,m} + k^2 \Psi^{e,m} = 0 \quad (4)$$

Розв'язання виконується методом поділу змінних і має вигляд нескінченного ряду із загальним членом:

$$\Psi_n^{e,m}(r, \theta, \varphi) = F_n^{e,m}(r) S_n(\theta, \varphi) \quad [\Psi_n(z, x, y) = F_n(z) S_n(x, y)], \quad (5)$$

де радіальна функція  $F_n(r)$  задовольняє рівнянню

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial F_n}{\partial r} \right) = (n(n+1) - k^2 r^2) F_n, \quad \left[ \frac{\partial^2 F_n}{\partial z^2} = (v_n^2 - k^2) F_n \right], \quad (6)$$

а поверхнева функція  $S_n$  задовольняє рівнянню

$$r^2 \nabla^2 S_n + n(n+1) S_n = 0, \quad [\nabla^2 S + v_n^2 S = 0], \quad (7)$$

розв'язок якого має вигляд

$$S_n^m = e^{im\varphi} P_n^m(\cos\theta), \quad [S_n = e^{iv_{xn}x} e^{iv_{yn}y}], \quad (8)$$

де  $P_n^m(\cos\theta)$  – приєднана функція Лежандра першого роду.

В результаті деяких перетворень для однієї просторово-часової гармоніки

$$e^{\pm i(\omega t - m\varphi)} P_n^m(\cos\theta) \quad [e^{\pm i(\omega t - v_{xn}x - v_{yn}y)}] \quad (9)$$

отримано розв'язок

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= F^m \text{grad } S \times \mathbf{e}_1 \mp \frac{i\omega}{k^2} \frac{\partial F^e}{\partial r} \text{grad } S \mp \frac{i\omega}{k^2} F^e \nabla^2 S \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{B} &= \mp \frac{1}{i\omega} \frac{\partial F^m}{\partial r} \text{grad } S \mp \frac{1}{i\omega} F^m \nabla^2 S \mathbf{e}_1 + F^e \text{grad } S \times \mathbf{e}_1 \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\nabla^2$  – оператор Лапласа,  $k^2 = \mp i\omega\mu(\pm i\omega\varepsilon + \sigma)$ , – хвильове число. При нехтуванні струмами зміщення  $k = (\mp i\omega\mu_0\sigma)^{1/2}$ . Два знаки в наведених виразах відповідають двом варіантам задавання часової залежності:  $e^{i\omega t}$  (верхній знак) або  $e^{-i\omega t}$  (нижній знак).

Як відомо, геометрія поля джерела визначається порядком  $n$  сферичної гармоніки (або просторовою частотою  $v_n$ ). Якщо у правій частині рівняння (6) перший доданок малий у порівнянні із другим, тобто.

$$\frac{n(n+1)}{r^2} \ll k^2 \quad [v^2 \ll k^2] \quad (11)$$

то функції  $F$ ,  $R$ , імпеданс та інші інтерпретаційні параметри не залежать від структури джерела і визначаються лише провідністю Землі. Реальні поля зазвичай описуються сумою просторових гармонік. Всі гармоніки, що задовольняють умові (11), можна розглядати разом, при цьому єдиним суттєвим параметром поля джерела залишається часова частота  $\omega$ , тому умову (11) називають умовою частотного зондування. У різноманітті геоелектричних структур та видів джерел зазвичай є випадки, коли умова (11) не виконується, тоді імпеданс, що визначається за відношенням компонент електричного і магнітного полів, буде спотворений. Ступінь спотворення можна оцінювати за розкидом значень імпедансу, визначених за різними реалізаціями. Згідно з умовою (11), на високоомних ділянках земної кори спостерігається більший розкид значень імпедансу, на низькоомних – менший.

Функції відгуку шарованої планети визначаються виразом:

для магнітної моди



$$R^m = \frac{F^m}{\frac{dF^m}{dr}} \left[ R^m = \frac{F^m}{\frac{dF^m}{dz}} \right] \quad (12)$$

для електричної

$$R^e = \frac{\frac{dF^e}{dr}}{k^2 F^e} \left[ R^e = \frac{\frac{dF^e}{dz}}{k^2 F^e} \right] \quad (12')$$

Функції  $R$  мають розмірність довжини і за виконання умови (11) характеризують ефективну глибину проникнення поля. В дисертації наводяться формули для магнітної та електричної мод у прямокутних координатах і наводиться графік позірною опору, від якого із збільшенням періоду «відокремлюються» криві магнітної моди – вниз, а електричної моди - вверх, відображаючи послідовний вплив все більш низьких просторових частот  $\nu$  поля джерела.

За виконання умови частотного зондування (11), функція  $R$ , імпеданс та  $\rho_{\text{п}}$  ведуть себе однаково для полів електричної та магнітної мод, що описуються сферичними та просторовими гармоніками, і збіжні з відповідними величинами для вертикально набіжної плоскої хвилі.

**Розділ 2. «Методологія та методи дослідження»** починається із нагадування про неоднозначність висновків геофізики і неможливість прямої перевірки цих висновків практикою, що є важливим методологічним аспектом [Backus and Gilbert, 1967].

Дослідження електропровідності у надрах Землі прийнято розділяти на дві стадії: 1) Обробка даних експериментальних вимірювань, тобто перехід від вимірних магнітних та електричних полів до функцій відгуку  $R(x, y, T)$ , які звільнені від мінливості джерела, але зберегли інформацію про електропровідність; 2) Інтерпретація – перехід від функцій відгуку до моделей електропровідності  $\sigma(r, \theta, \phi)$ ,  $[\sigma(z, x, y)]$ . Враховуючи багатозначність оберненої задачі, доцільно відмовитись від пошуку однієї конкретної моделі електропровідності, а обмежитись пошуком та визначенням інваріантів, тобто таких параметрів реального середовища, які притаманні усім моделям, що задовольняють даним спостереженням. Такі параметри у кожному методі свої. Далі у роботі розглядаються три методи глибинної геоелектрики:

1. *Магнітоваріаційне зондування (МВЗ)*. В методах зондування вивчається одновимірна модель  $\sigma(r)$   $[\sigma(z)]$ . Основна функція відгуку МВЗ – це відношення вертикальної компоненти сферичної гармоніки порядку  $n$  [гармоніки із просторовою частотою  $\nu$ ] до її горизонтальної компоненти:

$$W^m = \frac{B_r}{B_\theta} = \frac{B_r}{B_\phi} = \frac{n(n+1)}{r} \frac{F^m}{\frac{dF^m}{dr}} \left[ W^m = \frac{B_z}{B_x} = \frac{B_z}{B_y} = \nu \frac{F^m}{\frac{dF^m}{dz}} \right] \quad (13)$$

Найбільш часто МВЗ виконується за першою гармонікою  $n = 1$ , яка відповідає однорідному полю, зокрема при зондуванні Місяця (Розділ 5).

Результати МВЗ на Землі використовуються для визначення нормального розрізу верхньої мантії до глибин порядку 1000 км, причому нормальні розрізи виявились різними для океану та суші, для стабільних платформ та активних тектонічних регіонів. Криві МВЗ використовуються для контролю, прив'язки та корекції кривих МТЗ, які спотворені локальними неоднорідностями.

2. *Магнітоваріаційне профілювання (МВП)*. Суть методу полягає у спостереженні локальних аномалій у поведінці геомагнітних варіацій та їх інтерпретації у термінах аномального (відмінного від 1D нормального) розподілу електропровідності всередині Землі. В роботі викладено основні положення теорії та методики інтерпретації даних МВП. Вертикальна компонента аномального поля  $V_z$  дозволяє за спостереженням в одному пункті трьох компонент поля  $\mathbf{V}$  визначити функцію відгуку – матрицю типпера та її графічне представлення - вектор індукції

$$\mathbf{C} = A\mathbf{e}_x + B\mathbf{e}_y \quad (14)$$

де  $\mathbf{e}_x$  та  $\mathbf{e}_y$  – одиничні вектори,  $x$  – на північ,  $y$  – на схід. Параметр  $A$  зумовлений аномальним струмом уздовж осі  $y$ , параметр  $B$  – струмом уздовж осі  $x$ . Оскільки змінні гармонічні поля описуються комплексними числами, то у рівнянні (14) всі величини комплексні і залежать від періоду  $T$ , а вектор індукції має відповідно реальну  $C_u$  та уявну  $C_v$  частини. Реальні вектори індукції спрямовані від області із підвищеною провідністю до зони із пониженою провідністю (конвенція Візе).

Більш локальну інформацію несе горизонтальна компонента аномального поля, але для її визначення необхідні синхронні спостереження і синхронна обробка, яка дає тензор аномального магнітного поля

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{bmatrix} \quad (15)$$

який визначається із лінійних співвідношень між горизонтальними компонентами магнітних полів у точці спостереження і в базисній (опорній) точці. Горизонтальні та вертикальні аномальні поля взаємопов'язані інтегральним перетворенням Гільберта, яке дозволяє одну компоненту, виміряну вздовж профілю, перераховувати в іншу і тим самим перевірити правильність виділення аномального поля.

За профільними графіками аномального поля з високою достовірністю визначається факт існування аномалії та положення її осі або епіцентра. За ними можна оцінити максимально можливу глибину залягання центра аномальних струмів та ширину аномалії, до глибини залягання аномально провідного тіла криві МВП мало чутливі. За положенням  $T_0$  – максимуму частотної характеристики аномального поля можна визначити сумарну поздовжню провідність  $G$  витягнутого аномального тіла.

### 3. *Магнітотелуричне зондування (МТЗ)*.

Метод МТЗ базується на моделі Тихонова-Каньяра [Тихонов, 1950; Gagniard, 1953], у якій розподіл електропровідності передбачається одновимірним, тобто таким що залежить лише від глибини, а джерело задається у вигляді вертикально набіжної плоскої хвилі. В реальних умовах неоднорідної планети дані МТЗ схильні до майже повсюдних локальних спотворень, а також регіональних викривлень: індукційному ефекту поздовжніх кривих та S-ефекту поперечних кривих, коли

бокові ефекти приповерхневих неоднорідностей можуть бути прийняті за глибинний провідник [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Постановка спостережень МТЗ по площі дозволяє мінімізувати небезпеку такої помилкової інтерпретації. Більш складним для розпізнавання виявляється ефект екранування глибинних провідників перекриваючою їх шарованою структурою з похилим заляганням пластів підвищеного опору. Така ситуація зустрілась у південній частині Кіровоградської аномалії.

В роботі зазначено, що параметрами, які найбільш надійно визначаються при 1D МТЗ, є глибина верхньої кромки  $h$  провідного шару/тіла з високою провідністю і його сумарна поздовжня провідність  $S$ .

Розділ 2 завершується висновком: у даній роботі пріоритет віддається даним МВП, які достовірно визначають наявність та місцезнаходження аномалії, а також дозволяють оцінити її максимальну глибину та сумарну електропровідність  $G$ . Метод МТЗ націлений на визначення глибини аномалії, та на дослідження безаномальних горизонтально-шарованих структур.

У розділі 3 «Джерела природного змінного електромагнітного поля» наведений опис традиційних уявлень про формування природних електромагнітних полів: Сонячний вітер зіштовхується з магнітосферою Землі і вносить електричне поле

$$\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e \approx 0.002 \text{ В/м} \quad (16)$$

де  $V = 400$  км/с – середня швидкість сонячного вітру,  $B_e \approx 5$  нТл – середня інтенсивність магнітного поля, яке вноситься сонячним вітром. Інтегруючи поле  $E$  по діаметру магнітосфери (в середньому близько 125000 км), отримуємо різницю потенціалів  $\Delta U$  близько 250000 В, яка збуджує складну систему магнітосферно-іоносферних струмів, складну завдяки анізотропії провідності атмосферних шарів. На висотах більше 300 км провідність уздовж силових ліній геомагнітного поля на порядки більша провідності перпендикулярно магнітному полю і поздовжні струми із малими втратами переносять  $\Delta U$  на іоносферу, яка розташована на висотах 60-300 км. Із збільшенням концентрації заряджених частинок в іоносфері збільшується частота їх зіткнень, і з'являються специфічні провідності Педерсона та Холла. Електропровідність іоносфери анізотропна, і величина її горизонтальних компонент, які проінтегровані по всій висоті іоносфери, змінюється від одиниць (вночі) до тисячі сименс в залежності від напрямку, місця, часу доби, сонячно-геомагнітної активності, а також в залежності від впливів знизу, від процесів у літосфері та тропосфері Землі [Рокитянский, 1981, розділ 1; Chave and Jones, 2012, Chapter 3B].

Далі силові лінії проходять через стратосферу і тропосферу у добре провідну землю. Але струм, на думку більшості вчених, не проходить внаслідок дуже високого опору приземного шару повітря (до  $10^{14}$  Ом·м), а обходить по довгому колу меншого опору, який включає полярну іоносферу, потім більш внутрішні силові лінії геомагнітного поля, що виводять в частково кільцевий радіаційний шар на відстані 3-5 радіусів від поверхні Землі і далі таким шляхом до протилежної границі магнітосфери. Ці струми прийнято розглядати як тороїдальну структуру, яка збуджує полоїдальне магнітне поле із  $B_r \neq 0$ .

Хоча електропровідність тропосфери і дуже мала, але не нульова, і автор спробував зробити оцінку вертикальних струмів, які втікають у землю. Вивчення

цього питання в останні роки поєднується терміном Глобальне електричне коло (ГЕК). ГЕК розміщене між твердою/рідкою земною поверхнею та іоносферою, тобто між двома провідниками, що розділені погано провідними в середньому нейтральними шарами тропосфери та стратосфери. Безпосередні виміри показують, що біля поверхні Землі вертикальна компонента електричного поля  $E_z$  при ясній погоді має величину близько 100 В/м і спрямована вниз, тобто Земля заряджена від'ємно. З висотою  $E_z$  швидко зменшується: на висоті 2 км у 2 рази, на висоті 13 км у 20 раз. Зумовлено це відповідним зменшенням питомого опору  $\rho$  повітря, максимального в приземному шарі  $\rho \approx 5 \cdot 10^{13}$  Ом·м. Звідси узагальнена оцінка густини вертикального струму в атмосфері  $j_z = E_z/\rho \approx 2 \cdot 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>. При інтегруванні по всій земній поверхні отримуємо сумарний струм близько 1000 А. Верхній додатній заряд розподілений у так званій електросфері на висотах близько 40-70 км. Знаючи ефективну висоту  $h_{ef}$  електросфери, можна розрахувати ємність сферичного конденсатора  $C = \frac{4\pi a^2}{h_{ef}} \epsilon_0$  і його повний опір  $R = \frac{1}{4\pi a^2} \int_0^{h_{ef}} \frac{dz}{\sigma(z)}$  вертикальному струму. Оцінюючи електричні параметри  $R$  і  $C$  сферичного конденсатора, утвореного позитивно зарядженою електросферою та негативно зарядженою Землею, отримуємо  $R \approx 1000$  Ом,  $C \approx 0,1$  Ф, що дає постійну часу саморозрядження глобального конденсатора близько 100 с.

Підтримування заряду електросфери здійснюється сторонніми силами, що реалізуються у грозових хмарах [Имянитов, Колоколов, 1976]. За даними прямих вимірів над або під хмарою одна блискавка несе струм близько 1 А ( $\pm$  порядок величини). На Землі одночасно відбувається в середньому більше 1000 розрядів блискавок, які дадуть сумарний струм підзарядки електросфери близько 1000 А, що відповідає сумарному струму її розрядки на територіях поза полем дії грозових генераторів.

Просторово-часовий розподіл гроз на Землі доволі неоднорідний, що призводить до зміни заряду електросфери. Існують регулярні добові та річні варіації, на які накладаються безліч нерегулярних варіацій від різноманітних впливів зі сторони як зовнішніх, так і внутрішніх геосфер.

В роботі наведено приклади, що ілюструють як зміна електропровідності повітря в тропосфері відображається на заряді електросфери [Рокитянский, Терешин, 2020]. Слід зазначити, що зміни заряду електросфери під дією літосферних та атмосферних процесів свідчать про наявність вертикальних струмів [Raroport et al., 2020].

Проведений в останні роки супутниковими системами моніторинг параметрів іоносфери показав, що іоносфера доволі чутлива до літосферних впливів. Передача цих впливів здійснюється переважно шляхом переносу зарядів (глобальне електричне коло), тобто вертикальними струмами в атмосфері, які утворюють електричну моду з горизонтальним магнітним полем.

В розділі 4 «Кіровоградська та Карпатська аномалії електропровідності» більш детально розглянуто Кіровоградську (КіРАЕ) аномалію. Описано ранні роботи методом МВП [Рокитянский и др., 1974]: наведено профільні графіки горизонтального аномального магнітного поля та східної компоненти векторів індукції, які зібрані на 5 профілях, а також частотна характеристика цих величин.



Рис. 1. Карта району робіт на півдні Херсонської області із двома профілями, які на рис. 3 і 4 спроектовані в один інтерпретаційний профіль. Стрілки вектора індукції на періоді 1500 с в околі максимуму  $T_0$  частотної характеристики, тому уявний вектор зовсім малий. Жирна лінія – вісь КірАЕ за результатами наших робіт [Рокитянский и др., 2012]

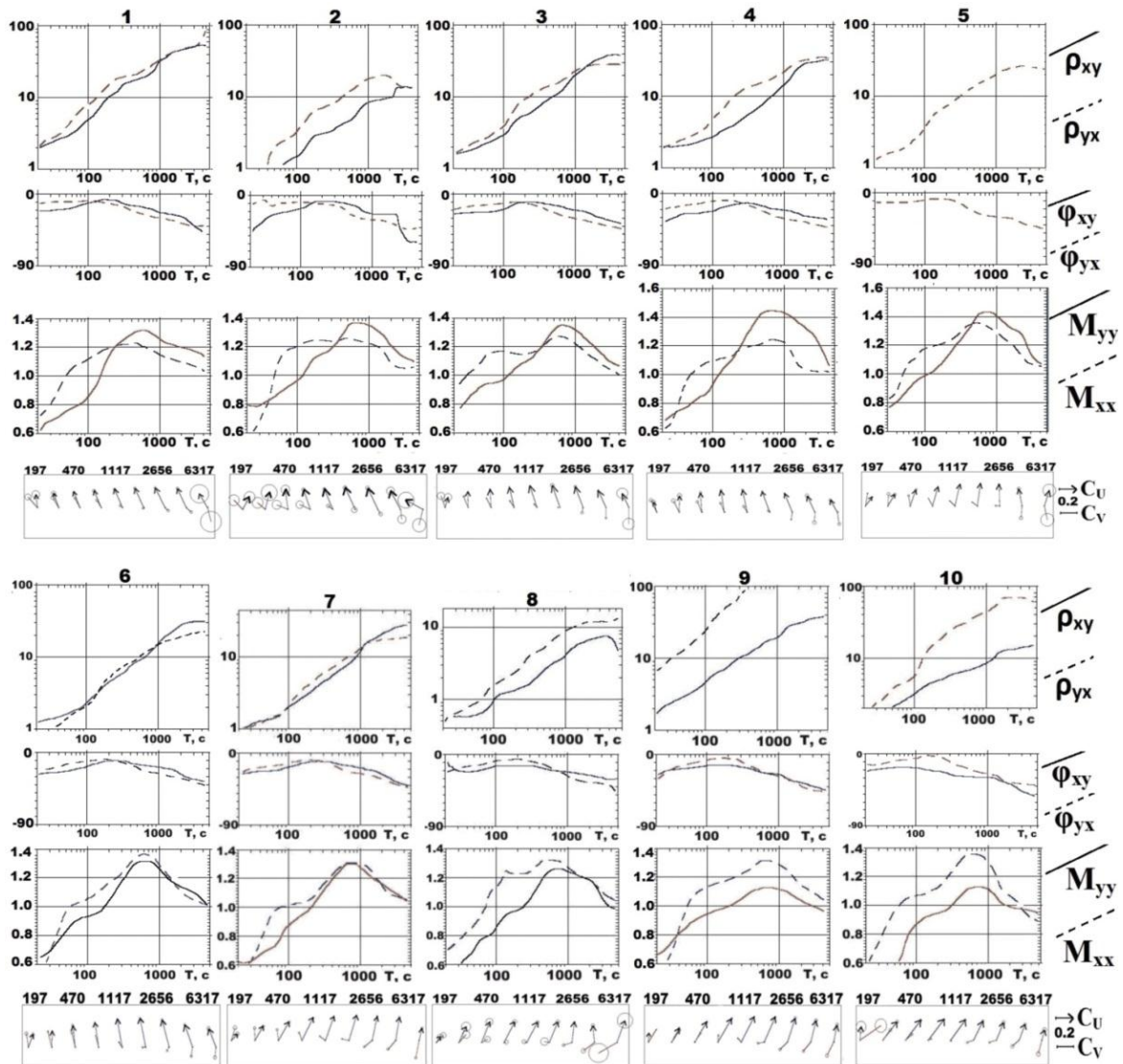


Рис. 2. Результати обробки виконаних спостережень: питомий опір  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$ ; фаза імпедансу  $\varphi_{xy}$ ,  $\varphi_{yx}$ ; компоненти тензора горизонтального аномального поля:  $M_{yy}$ ,  $M_{xx}$ ; внизу – вектори індукції для 9 періодів (кола навколо кінчиків векторів показують похибку їх визначення); x – направлено на північ, y – на схід.

Наведено серію моделей від максимально глибинної (30 км) до таких, що знаходяться на поверхні, всі вони узгоджуються із даними спостережень МВП, що ілюструє неоднозначність оберненої задачі МВП. Визначити глибину верхньої кромки аномалії може МТЗ.

В Україні в 1980-ті роки було виконано більше 1000 МТЗ, із яких більше 25 над КіРАЕ. 15 із них зареєстрували КіРАЕ, але через велику кількість приповерхневих неоднорідностей криві МТЗ були складними, унаслідок чого за результатами їх інтерпретації глибина верхньої кромки аномалії отримана зі значним розкидом. Це не дозволило достовірно оцінити зміну глибин у межах різних ділянок аномалії, а тільки розрахувати середню глибину КіРАЕ ( $15 \pm 8$  км). В 10 пунктах спостережень, розташованих на передбачуваній осі КіРАЕ південніше Українського щита (УЩ), на кривих МТЗ аномалія не зафіксована. Цей факт, а також 3D-моделювання, яке не забезпечене адекватними даними, дозволили зробити висновок про закінчення КіРАЕ поблизу границі УЩ. Автор заново проаналізував дані МВП, помітив в них ознаки продовження аномалії на південь та виконав експериментальні дослідження вздовж двох профілів поблизу Чорного моря (рис. 1-4).

Данні МВП чітко показали продовження аномалії на південь з її виходом під води Чорного моря (рис. 1-4). Дані МТЗ (рис. 2) не показали наявності корової аномалії електропровідності, так само як її не зареєстрували станціями ЦЕС-2 у 1980-ті роки в пунктах 267-273 (місцезнаходження пунктів старих МТЗ показано на рис. 4). Причиною «нечутливості» МТЗ до корового провідника є ефект екранування електричних струмів похилими високоомними пропластками у товщі осадових порід Причорноморської монокліналі.

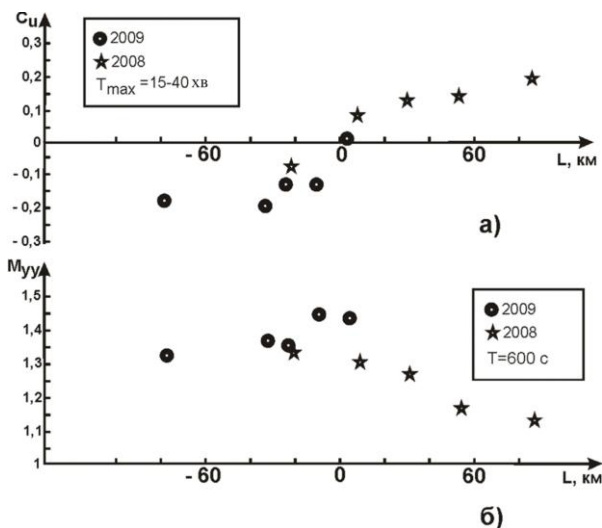


Рис. 3. а) Східна компонента реальної частини векторів індукції  $C_{uy}$  по профілях 2008-2009 років; б) Значення східної компоненти магнітного тензора  $M_{yy}$  по профілях 2008-2009 років.

В роботі виконано зіставлення КіРАЕ з різними геофізичними полями. У результаті виявлено взаємозв'язок з аномаліями постійного магнітного поля, а саме, КіРАЕ розташовується в градієнтній зоні між позитивними аномаліями постійного магнітного поля на сході та від'ємними на заході [Рокитянский и др., 2018].

Подібний взаємозв'язок був виявлений і для Ладозько-Ільменської аномалії на Балтійському щиті і його південному схилі (рис. 5). Виникла ідея простежити, чи не з'єднується КіРАЕ із аномаліями Балтійського щита, утворюючи Транс-Європейський Ланцюг Аномалій Електропровідності (ТЄЛАЕ). Було проаналізовано дані МВП-ГМТЗ, виконані в смузі  $30-35^\circ$  східної довготи.

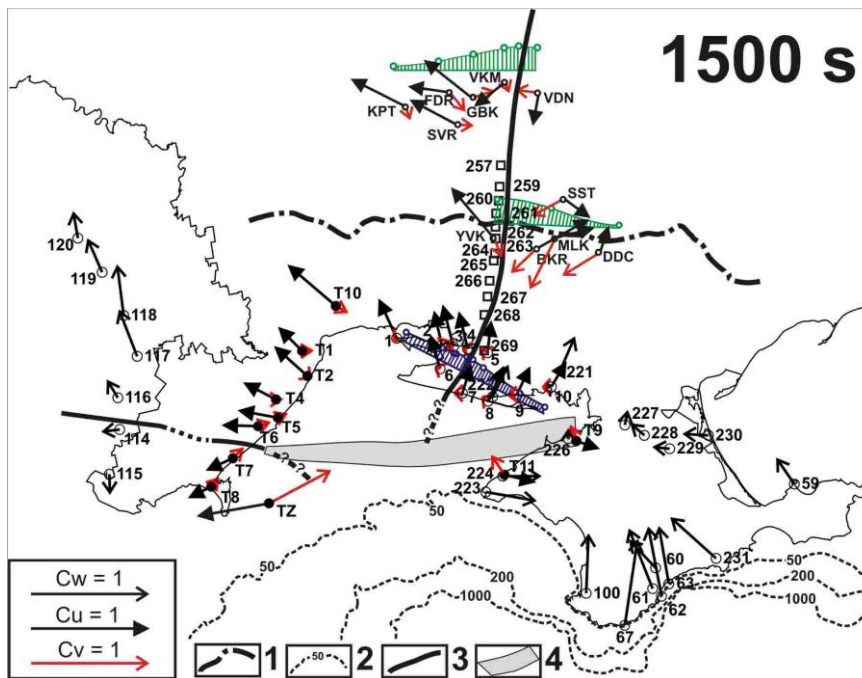


Рис. 4. Карта північної частини Кіровоградської аномалії електропровідності. Вектори індукції на періоді 1500 с:  $C_u$  – реальні,  $C_v$  – уявні,  $C_w$  – старі вектори Візе. Пусті кружечки – МВП, що були отримані Інститутом геофізики; зафарбовані кружечки із буквою «Т» – МВП, отримані В.І. Трегубенком; пусті квадрати із номерами 257-269 – старі МТЗ уздовж осі аномалії. Профільні графіки - східна компонента горизонтального аномального поля: зверху - два старих профілі, знизу – новий профіль (див. рис.3). **1** – межа Українського щита; **2** – ізолінії глибин Чорного моря; **3** – осі аномалій електропровідності; **4** – Причорноморська западина.

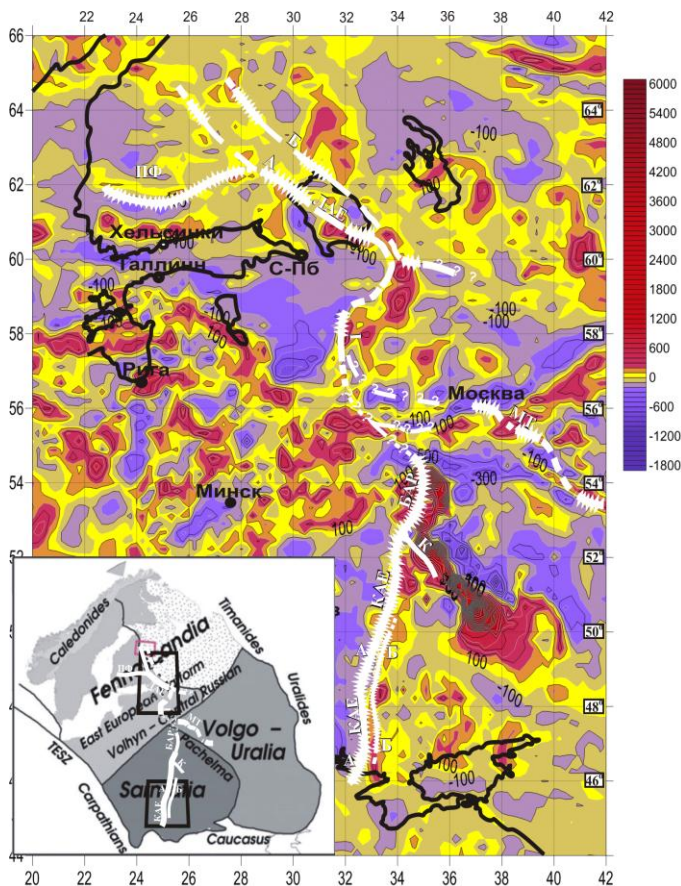


Рис.5. Транс-Європейський ланцюг аномалій електропровідності (ТЕЛАЕ) (представлені білим кольором): Кіровоградська (КіРАЕ, провідники А і Б), Барятинська (БАР із відгалуженнями К – Курська аномалія), Ладозько-Ільменська (ЛАЕ-І), Московсько-Тамбовська (МТ) і Південно-Фінляндська (ПФ) представлені на фоні карти аномалій постійного магнітного поля (ізолінії в нТл). На вставці зліва ТЕЛАЕ на фоні трьох-сегментної карти Східно-Європейського кратону (СЕК), яка була запропонована С.В. Богдановою. Двома трапеціями оконтурені зони залягання КіРАЕ та ЛАЕ. [Рокитянский и др., 2018]

На шляху можливого з'єднання Ільменської аномалії із Барятинською знаходяться Валдайський грабен та Московська синекліза із провідністю більше 2000 См, які екранують корові провідники, і за малої кількості пунктів спостереження висновок про наявність чи відсутність корової аномалії не міг бути зроблений. Такі ділянки на карті рис. 5 представлені серією знаків запитань. Спільний аналіз горизонтальних та вертикальних аномальних полів на північному закінченні дослідженої території Барятинської аномалії вказує на поворот цієї аномалії на захід. Цей результат цікавий і важливий, оскільки у тектоністів існує припущення про обертання Сарматії – одного із трьох сегментів Східно-Європейського Кратону (СЕК) – відносно двох інших сегментів (вставка на рис. 5). Отримані у цій роботі попередні результати про розташування ТЄЛАЕ підказують напрямок та амплітуду обертання Сарматії, а також лінію стикання сегментів. Результат був переданий тектоністам для пошуку тектонічних підтверджень.

Далі в **розділі 4** наводиться огляд виконаних досліджень Карпатської аномалії електропровідності (КАЕ) та рекомендація для оптимального планування майбутніх досліджень.

Карпати покриті щільною мережею спостережень МВП, і більш ніж у 300 пунктах побудовано вектори індукції. Згруповані в десяток профілів, профільні графіки векторів індукції визначають положення осі КАЕ з похибкою 2-10 км на території Словаччини, Польщі та України і вдвічі більшою – в Румунії (з огляду на більш рідку мережу спостережень і більш складну структуру аномалії – її розгалуженням) [Рокитянский и др., 2014]

На профільних графіках аномального поля відстань від точки зміни знака (осі аномалії) до різнополярних екстремумів складає приблизно 20-25 км [Третьак и др., 2014], тоді як для Кіровоградської аномалії вона дорівнює 30-35 км. Ці величини визначають максимально можливу глибину залягання аномалій.

Для КірАЕ більш імовірна її електронно-провідна природа. КАЕ знаходиться в Альпійському орогені, у якому активні тектонічні процеси, пов'язані з вулканізмом, відбувалися не так давно і можуть продовжуватись і зараз, наприклад, у вигляді регіонального метаморфізму [Рокитянский, 1975]. Для цієї аномалії більш імовірна флюїдна іоно-провідна природа частково розплавлених порід. У будь-якому випадку, КАЕ знаходиться в Центральній Європі і якщо виявиться на доступній глибині, то може стати джерелом геотермічної енергії і/або мінеральних ресурсів. Тому вимірювання глибини до її верхньої кромки має не тільки наукове, але, можливо, і практичне значення.

Розглядаючи задачі майбутніх досліджень, слід охарактеризувати виконані на сьогоднішній день. Векторів індукції отримано багато, їх вимірювання виконувалося впродовж більш ніж півстоліття. Обчислення аномального поля в горизонтальних компонентах майже не проводилось, імовірно через відсутність загальноприйнятої базисної обсерваторії. Головною задачею майбутніх досліджень є визначення глибини КАЕ методами зондування, з використанням сучасної апаратури. На Українських Карпатах над віссю КАЕ виконано 11 МТЗ, за сукупністю поздовжніх кривих визначена глибина верхньої кромки аномалії  $12 \pm 4$  км [Рокитянский и др., 2013]. Поперечні криві не «відчувають» аномалію («поперечно-прозора аномалія»), це пояснюється тим, що ширина аномалії менша, ніж глибина на ділянці вимірів.



Ще 5 МТЗ над віссю КАЕ виконано в Румунії [Pinna et al., 1992], отримано глибину  $10 \pm 5$  км і оцінка сумарної провідності більше 5000 См. Для розгортання вимірювань глибини до верхньої кромки КАЕ у 2016 році нами обґрунтовано міжнародний проект SECAD (Study of the Electrical Conductivity Anomaly Depth), представлений на EMIW-2016 [Rokitynsky et al., 2014]. Проект було розглянуто, асигнування ще не виділені.

У розділі 5 «Дослідження на Місяці» коротко дано історію досліджень Місяця під час космічних місій та описано як з'явилась ця тематика в Інституті геофізики НАН України. Змістом роботи був критичний огляд попередніх ЕМ зондувань Місяця і формулювання рекомендацій для оптимальної постановки майбутніх досліджень. Цю частину було виконано й описано ще у 2010 році, але тільки під час написання дисертації прийшло усвідомлення того, що про глибинну електропровідність Місяця ніяких достовірних результатів не отримано.

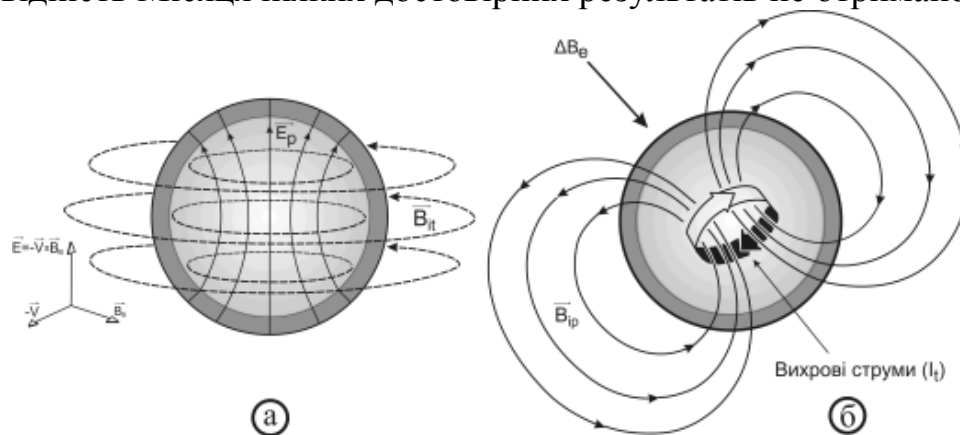


Рис. 6. Генерація змінних магнітних полів на концентрично шарованому  $\sigma = \sigma(r)$  Місяці: а) Тороїдальне  $\mathbf{B}_{it}$  магнітне поле струмів під дією полоїдального електричного поля  $\mathbf{E}_p = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e$ , що виникає в результаті руху Місяця відносно магнітного поля  $\mathbf{B}_e$  набіжного сонячного вітру (електрична або ТМ-мода). б) Полоїдальне поле  $\mathbf{B}_{ip}$  вихрових струмів  $\mathbf{I}_t$ , які індуковано змінами зовнішнього магнітного поля  $\Delta \mathbf{B}_e$  у провідних шарах Місяця (магнітна або ТЕ-мода) [Dyal, Parkin, 1971]. Поля зображено у припущенні, що Місяць зі всіх сторін оточений непровідним середовищем.

В роботі описано формування електромагнітних полів. На Місяці немає атмосфери і глобального магнітного поля, тому високопровідна плазма сонячного вітру безпосередньо зіштовхується із місячною поверхнею і поглинається нею. У системі координат, яка пов'язана із Місяцем, з'являється електричне поле  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e$ . Вважаючи  $V = 400$  км/с та  $B_e = 5$  нТл, отримуємо  $E \approx 0,002$  В/м, та інтегруючи по діаметру Місяця отримуємо різницю потенціалів  $\Delta U$ , прикладену до Місяця, рівною  $\approx 7000$  В [Рокитянський, Терешин, 2010-а]. В концентрично шарованому Місяці виникає полоїдальна система струмів із відмінними від нуля радіальною та меридіональною компонентами (вісь симетрії системи спрямована вздовж вектора  $\mathbf{E}$ ) і відповідно тороїдальне вторинне внутрішнє (індекс  $i$ ) магнітне поле  $\mathbf{B}_{it}$ , яке містить тільки азимутальну компоненту (пунктир на рис. 6-а). В роботі представлені наближені розрахунки тороїдального магнітного поля, яке можна очікувати при різному опорі верхнього найбільш високоомного шару.

Самий верхній шар Місяця – реголіт із питомим опором  $10^7 - 10^{10}$  Ом·м і потужністю 2 - 12 метрів, нижче залягають брекчії, потім вивержені породи різного складу й віку. У всіх можна вважати високий опір. Швидкість сейсмічних хвиль в них стрибкоподібно зростає від 100 м/с в реголіті до 4-6 км/с в низах кори на глибині декілька десятків кілометрів і нижче кори до 6-9 км/с. Середня потужність кори 60 км [Галкин, 1978]. Нещодавній, 2012 року, політ двох близнюків супутників GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory) із удосконаленою гравіметричною зйомкою показав, що потужність місячної кори коливається від 34 до 43 км. Яка температура, пористість, флюїдонасиченість порід місячної кори і верхньої мантії – певних даних про це немає. В дисертаційній роботі виконано наближені оцінки величини  $\mathbf{V}_{it}$  за реалістичних припущень про зміну електропровідності із глибиною. Величина  $\mathbf{V}_{it}$  може досягати 1 – 5 нТл, тобто бути зіставною із спостережуваними на Місяці полями.

Зміни міжпланетного магнітного поля  $\Delta\mathbf{V}_e$  індукують у провідних шарах Місяця вихрові тороїдальні струми з їх вторинним внутрішнім полоїдальним магнітним полем  $\mathbf{V}_{ip}$  (Рис. 6-б) – магнітна мода TE, яка використовувалась у всіх зондуваннях Місяця. Віссю симетрії полів цієї моди є напрямок  $\Delta\mathbf{V}_e$ , який у загальному випадку не співпадає із напрямками  $\mathbf{V}_e$  та  $\mathbf{E}$ , тобто із віссю симетрії полів електричної моди. На Рис.6

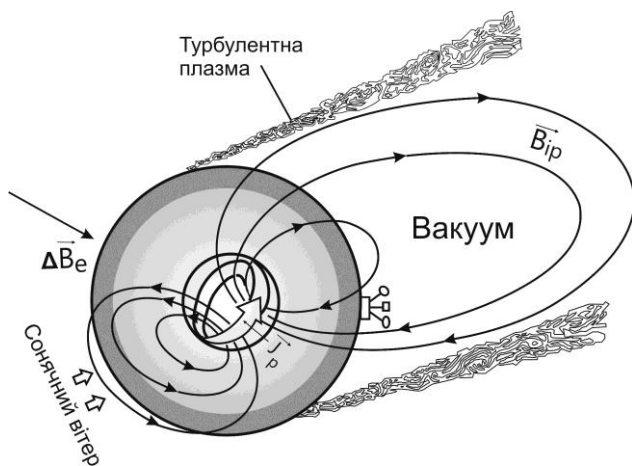


Рис.7. Полоїдальне поле магнітної моди у реалістичних умовах асиметричного «обтиснення» сонячним вітром [Dyal, Parkin, 1971]

магнітного поля значно зменшена, а тангенціальна підсилена. Все це перешкоджає виходу магнітного поля у зовнішній простір. Це явище називають «обтисненням» внутрішнього поля сонячним вітром. Однак, сонячний вітер налітає з однієї сторони й ефективне «обтиснення» відбувається лише на зверненій до Сонця стороні Місяця, як це показано на рис. 7.

Далі розглянуто орбіту Місяця (рис.8). Майже три тижні Місяць знаходиться у зоні дії сонячного вітру, двічі по 2,7 дня проходять турбулентні області плазмового шару із середнім рівнем магнітного поля  $\sim 8$  нТл і 3,2 дні - геомагнітний хвіст із полем  $\pm 9$  нТл.

У залежності від положення Місяця на орбіті і від положення магнітометра, зондування має наступні різновиди:

взаємодія вторинних магнітних полів із сонячним вітром не враховувалась – поля вільно виходили за межі Місяця. Насправді внутрішні магнітні поля індукують у провідній плазмі сонячного вітру вихрові струми, магнітне поле яких додається до індукованого внутрішнього поля. У результаті нормальна до поверхні Місяця компонента внутрішнього

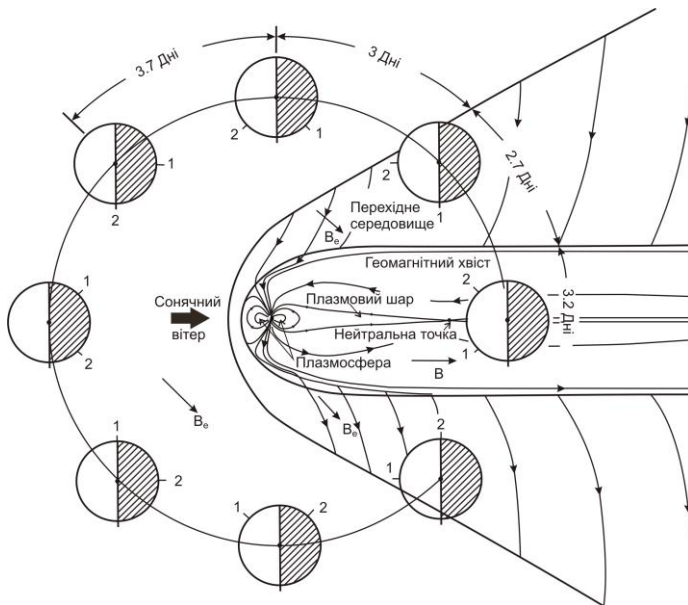


Рис.8. Кінематика руху Місяця навколо Землі. Маже 3 тижні він обдувається незбуреним сонячним вітром (із його несиметричним «обтисненням» та електричною модою), 3,2 дні знаходиться у відносно стабільному полі ( $\pm 9$  нТл) частин геомагнітного хвоста магнітосфери Землі (без «обтиснення» із його асиметрією і без електричної моди). В рознесені пункти 1 і 2 на зверненій до Землі стороні Місяця було встановлено магнітometri.[Sill, Blank, 1970]

1. Індукуючим полем є поле сонячного вітру, місячний день. Індуковане поле затиснуто сонячним вітром у просторі, який обмежений із денної сторони поверхнею Місяця (рис. 7). На сонячній стороні Місяця вертикальна компонента внутрішнього поля перетворюється на нуль, отже, можна використовувати лише горизонтальну компоненту змінного магнітного поля.

2. Індукуючим полем є поле сонячного вітру, місячна ніч. На нічній стороні сонячного вітру немає, простір за Місяцем розглядається як вакуум, у який внутрішні поля проникають безперешкодно (Рис.6-б та 7).

3. Струми в Місяці індукують магнітне поле геомагнітного хвоста. Воно стабільніше, ніж поле сонячного вітру, у ньому ефекти плазмового «обтиснення» мінімальні, розгляд індукованого поля у вакуумі більш виправданий, і електрична мода практично не виникає.

У розділі представлені фізичні основи зондувань Місяця. У всіх роботах щодо електропровідності Місяця (та Землі) використовувалась тільки магнітна або індукційна мода, яка містить найбільш цікаву інформацію про провідність глибоких надр.

Теорія електромагнітної індукції на сфері представляє магнітне поле у вигляді розкладу в ряд за сферичними гармоніками і встановлює співвідношення між компонентами поля на поверхні сфери: відношення амплітуди вертикальної компоненти до амплітуди горизонтальних для сферичної гармоніки порядку  $n$  і часової гармоніки із кутовою частотою  $\omega$  визначається [Рокитянский, 1981, с. 46-51] виразом:

$$W = \frac{B_{r0}}{B_{\theta 0}} = \frac{B_{r0}}{B_{\varphi 0}} = \frac{n(n+1)}{r} R(\omega, \sigma(r)) \quad (17)$$

де  $R(\omega, \sigma(r))$  - функція відгуку концентрично шаруватої сфери, яка має розмірність довжини. Вона характеризує ефективну глибину проникнення поля заданої кутової частоти  $\omega$  за виконання умови частотного зондування (11):

$$\frac{n(n+1)}{r^2} \ll k^2 = i\omega\mu\sigma \quad (18)$$

Коли умова (18) не виконується, магнітне поле втрачає зв'язок з електропровідністю. Виконання цієї умови залежить від розподілу електропровідності із глибиною. При збільшенні глибини дослідження до електромагнітного поглинання поля додається його геометричне згасання, яке залежить від порядку  $n$  гармоніки. При сильному невиконанні (18):  $\frac{n(n+1)}{r^2} > k^2$  вторинне індуковане змінне магнітне поле на поверхні планети складає малу частину первинного поля і не може бути надійно виміряне. Найбільш важливою для зондування Місяця і Землі є гармоніка  $n = 1$ , яка відповідає однорідному збуджувальному полю. На Землі вдається виділити варіації  $n = 1$  у діапазоні часових періодів від частин доби до 11 років і всі вони, як показують побудовані криві позірною опору, також як і гармоніки  $S_q$  ( $n = 2 \div 5$ ) задовольняють умові (18). Пояснюється це високою електропровідністю Землі та інтенсивним зростанням електропровідності із глибиною. Електропровідність надр Місяця, достовірним чином ще не вивчена, більшість дослідників вважають її значно меншою, ніж у Землі.

Відомо, що співвідношення амплітуд сферичних гармонік вертикальної компоненти до амплітуд горизонтальних визначається провідністю тіла [Паркінсон, 1986; Рокитянский, 1981]. На поверхні ідеально провідної сфери вертикальна компонента магнітних варіацій дорівнює нулю, а горизонтальна збільшена у півтора рази (властивість сферичної геометрії!) для першої гармоніки  $n = 1$ . На поверхні кулі-ізолятору вторинне поле не виникає, і нормована амплітуда першої сферичної гармоніки вертикальної і горизонтальних компонент дорівнює 1 (всі величини нормовані до відповідних компонент первинного поля  $\mathbf{V}_e$ ). Для реальних небесних тіл у разі однорідного збуджувального поля ( $n = 1$ ) повинні спостерігатись проміжні значення між розглянутими граничними випадками. Запишемо сказане у вигляді нерівностей:

$$0 < |B_{n\text{спостер.}}|/|B_{ne}| < 1 \quad (19)$$

$$1 < |B_{t\text{спостер.}}|/|B_{te}| < 1.5 \quad (20)$$

де індекси  $n$  і  $t$  позначають нормальну й тангенціальну до поверхні Місяця компоненти магнітного поля. **Виконання (19-20) є необхідною умовою застосування методики МВЗ, що використовується для вивчення електропровідності.**

Магнітні поля, що записані у знаменнику – це первинні зовнішні поля, які викликають у надрах Місяця вихрові струми. Прийнято вважати [Dyal & Parkin, 1971; Sill & Blank, 1970; Sonett, 1975], що на їх місце можна поставити поля  $\mathbf{V}_e$ , що виміряні орбітальним магнітометром. Однак індукуючим полем є вектор *варіацій* -  $\Delta\mathbf{V}_e$ , який визначає симетрію індукованого магнітного поля магнітної моди. Вектори  $\mathbf{V}_e$  і  $\Delta\mathbf{V}_e$  не рівні і не паралельні, але відмінність між ними ніде не фігурує і не враховується.

У роботі представлено аналіз результатів зондувань Місяця у 1970-ті роки. Обробка часових рядів, записаних магнітометрами, виконувалась за допомогою гармонічного аналізу (перетворення Фур'є) [Ваньян и др., 1973; Sonett, 1975, 1977] або аналізу перехідних характеристик (перетворення Лапласа) [Ваньян и др., 1973; Дайел и др., 1975; Sonett, 1975]. Останній спосіб заснований на аналізі перехідного

процесу, що виникає в провідному середовищі в результаті індуктивного збудження в ньому електричних струмів зовнішнім імпульсним магнітним полем. У результаті за відносно коротку реалізацію тривалістю 10-15 хвилин можна отримати всю криву зондування. У дисертації наведено приклади обох способів: представлені функції відгуку в залежності від частоти, отримані у всіх зонах місячної орбіти – у полі сонячного вітру на денній і нічній сторонах, у турбулентному плазмовому шарі і у межах хвосту; представлені також горизонтальні й вертикальні компоненти зареєстрованих імпульсів. Аналіз усіх матеріалів показав, що їх більша частина не задовольняє умови існування розв'язку (19-20). Отже, отримані з вимірів функції відгуку не попали в простір функцій відгуку, що відповідають прийнятій моделі: «індукція однорідного зовнішнього поля у сферично симетричному Місяці». Відтак, достовірних результатів про глибинну електропровідність Місяця не отримано.

У розділі описано горизонтальні неоднорідності й вертикальні провідники всередині Місяця. Краще всього відомо про ті неоднорідності, які вивчаються за допомогою супутників, що рухаються по навколomisячних орбітах. Зокрема, гравітаційне поле виявилось різко аномальним із десятками великих позитивних аномалій величиною 100-200 мГал і характерними розмірами 50-300 км. Ці аномалії просторово віднесені здебільшого до круглих морів. Надлишкові маси, які є джерелами таких аномалій, були названі масконами. Глибина їх залягання досягає сотень кілометрів, що свідчить про суттєву неоднорідність кори і верхньої мантії Місяця.

Стратиграфію надр Місяця побудовано за фрагментарними сейсмічними даними. Товщина місячної кори в середньому складає 60 км, змінюючись від 0 під морем Криз до 107 км у північній частині кратеру Корольова на зворотному боці Місяця. Параметри, отримані у різних регіонах місячної поверхні, помітно різняться для одних і тих самих глибин, що може вказувати на наявність латеральних неоднорідностей, які зумовлюють латеральну мінливість швидкостей сейсмічних хвиль. Шар понижених швидкостей (астеносферу) деякі автори [Галкин, 1978] розміщують на глибину більше 800 км, вважаючи верхні 800 км твердою кристалічною літосферою. В інших джерелах наводяться дані на користь існування на глибині 250-500 км зниження швидкостей сейсмічних хвиль на  $\approx 10\%$  [Adams, 2009].

Особливо цікаві й переконливі дані про розподіл двох основних типів місяцетрясінь (МТ). **Припливні** МТ відбуваються на глибині 800-1100 км, де передбачається контакт твердої і напіврідкої (частково розплавленої) фаз. Припливна хвиля із добре відомою періодичністю **глобально** пробігає по тілу Місяця, а припливні МТ відбуваються не глобально, а тільки уздовж окремих локальних витягнутих структур. На глибинах 300-800 км МТ не спостерігались. На глибинах 50-300 км відбуваються **тектонічні** МТ. Вони більш рідкісні, але сильніші (очевидно, тому, що літосфера менш в'язка на цих глибинах і може накопичувати великі напруги). Найцікавіше полягає у тому, що тектонічні МТ концентруються у тих же регіонах де відбуваються припливні МТ або на периферії цих регіонів. Спостерігається також деяка часова кореляція – тектонічні МТ виникають після активізації припливних МТ у найближчому районі. Все це підводить до припущення, що на Місяці існують і можливо широко розповсюджені субвертикальні структури

типу плюмів, по яких найбільш активно відбувається дегазація і винос теплової енергії, можливо за участі вулканізму. Такі структури повинні мати підвищену електропровідність і по них можуть протікати вертикальні струми.

У розділі описаний вулканізм і дегазація Місяця [Рокитянский, Терешин, 2020]. Найбільш переконливим доказом існування вертикальних каналів підвищеної електропровідності є дані про наявність вулканічної активності й дегазації з надр Місяця. Вулканічна активність на Місяці була відкрита у 1958 р. М.А. Козиревим завдяки цілеспрямованим спостереженням за кратером Альфонс і підтверджена місячними місіями. Швидкоплинні місячні явища TLP (transient lunar phenomena) спостерігались рідко, оскільки у XX столітті й раніше моніторинг усєї місячної поверхні з високою роздільною здатністю не проводився. З початку XXI століття декілька орбітальних апаратів проводять моніторинг місячної поверхні з більш високою роздільною здатністю і кількість повідомлень про TLP різко зросло [Crotts and Hummels, 2009; Ivanov, 2012; Basilevsky et al., 2012]. TLP інтерпретуються цими авторами, як поверхневі прояви дегазації Місяця, які виносять із її надр флюїди і летучі речовини, включаючи воду.

Отже, за виконаними на початку розділу розрахунками тороїдальне поле може давати відчутний внесок у спостережуване на Місяці магнітне поле, особливо, якщо є локальні канали або області пониженого опору. На існування останніх однозначно вказує наявність діючого вулканізму, велика кількість швидкоплинних місячних явищ, що свідчать про дегазацію Місяця, а також численні непрямі дані: неоднорідність шару реголіту; дані сейсмології щодо істотно неоднорідного розподілу вогнищ землетрусів, як припливної, так і тектонічної природи; дані гравіметрії про наявність інтенсивних неоднорідностей густини порід у корі і мантії Місяця. Для оцінки величини вертикальних струмів поки що даних недостатньо. Не ясно також, чи будуть магнітні поля електричної моди глобально згладженими або проявляться локальними квази-круговими концентричними аномаліями магнітного поля навколо окремих найбільш добре провідних каналів.

У кінці розділу сформульовано пропозиції щодо нових досліджень електропровідності Місяця.

## **ВИСНОВКИ**

1. Електрична мода присутня у природному електромагнітному полі Землі та Місяця. Ідея відома, дискусійна. Автор зібрав деякі додаткові дані, які показують, що електрична мода не мала і може бути виміряна у земних умовах, однак вона не настільки велика, щоб «заглушити» магнітну моду, на використанні якої побудована теорія електромагнітних зондувань і вивчення глибинної електропровідності Землі.

2. Виконано дослідження південного продовження Кіровоградської аномалії, яке показало, що аномалія продовжується на південь і йде під води Чорного моря.

3. Зіставлення Кіровоградської аномалії електропровідності з аномаліями постійного магнітного поля показало їх певний взаємозв'язок: східніше КірАЕ проходить додатна аномалія постійного поля, західніше – від'ємна. Подібна відповідність установлена і для Ладозько-Ільменської аномалії.

Для визначення ступеня універсальності отриманого взаємозв'язку було проаналізовано аномалії Східноєвропейської платформи до Балтійського щита

включно, що дало підставу для припущення про існування єдиної Транс-Європейської аномалії електропровідності. Ця ідея прийнята тектоністами докембрію як одна із експериментальних підстав опису геологічних процесів у далекому минулому.

4. Показано необґрунтованість розповсюджені думки про те, що шар реоліту не пропускає вертикальні струми на Місяці. Аналіз природи електропровідності гірських порід, огляд недавніх спостережень деяких параметрів і явищ (дегазація, вулканізм) на Місяці і наближені попередні оцінки показують, що вертикальна електропровідність цілком достатня для утворення електричної моди, зіставної із магнітною. Для точної теоретичної оцінки внеску кожної моди не вистачає знань властивостей навколomisячної плазми і фізики її взаємодії з Місяцем. Для експериментального розділення мод необхідні багатоточкові синхронні спостереження на поверхні Місяця і навколomisячних орбітах.

5. Виписано умови, яким повинні задовольнити функції відгуку поставленої задачі зондувань Місяця (індукція магнітної моди під дією зовнішнього однорідного поля) і застосовано до даних спостережень. Виявилось, що більшість даних, які отримано у 1970-ті роки місяцями Аполло та Луноход не задовольняють теоретичним критеріям, звідки випливає, що опубліковані моделі розподілу електропровідності Місяця не базуються на адекватних спостереженнях.

6. На основі зіставлення та аналізу просторово-часового розподілу припливних та тектонічних місяцетрясін висловлено гіпотезу про можливість існування у мантиї Місяця структур типу плюмів.

7. Враховуючи недостовірність результатів зондувань Місяця із природними полями на даному етапі, рекомендувати дослідження із використанням штучних ЕМ полів: а) Дистанційне глобальне ЕМ зондування Місяця на різних частотах із борту навколomisячних супутників; б) Локальні індукційні зондування з борту спеціалізованих місяцеходів, наприклад, за методикою «петля в петлі». Завдяки високому опору верхніх шарів Місяця і низькому рівню завад, глибинність зондування може досягати сотень і тисяч метрів, а за наявності двох і більше узгоджених рознесених установок і значно більше. Ці роботи можуть дати нові достовірні результати стосовно розподілу електропровідності в надрах Місяця.

8. Обернена задача завжди багатозначна, тому знаходження однієї багатопараметричної моделі не є встановленим результатом, тобто новим знанням. Нове знання повинно бути оформлено у вигляді інваріантів, тобто понять і величин, які відповідають категорії «без варіантів» і отримуються за наявними правильними експериментальними вимірюваннями. В роботі розглянуті інваріанти методів МВП та МТЗ.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Монографії*

1. Третяк, К.Р., Максимчук, В.Ю., Кутас, Р.І., Рокитянський, І.І., Кендзера, О.В., **Терешин, А.В.**, ... Романюк, В.В. (2014), *Сучасна геодинаміка Українських Карпат*, Видавництво Львівської політехніки, Львів. (Наклад 300 прим.)

*Статті у наукових виданнях*

2. Рокитянський, І.І., **Терешин, А.В.** (2010), Исследование электропроводности Луны (итоги и перспективы), *Геофизический журнал*. № 5, **32**, с. 69-81
3. Рокитянський, І.І., **Терешин, А.В.** (2010), Глубинное магнитовариационное зондирование Луны. *Космічна наука і технологія*, №4, **16**, с. 57-65.
4. Рокитянський, І.І., **Трегубенко, В.И.**, Голубцова, Н.С., Ингеро́в, А.И., **Терешин, А.В.**, Савченко, Т.С. (2012), Обзор наблюдений МВП-МТЗ в южной части Кировоградской аномалии электропроводности и первый опыт пленочного моделирования структуры УЩ. *Геофизический журнал*. № 3, **34**, с. 92-101.
5. Рокитянський, І.І., Бабак, В.И., **Терешин, А.В.** (2014), К исследованию глубины залегания Карпатской аномалии электропроводности. *Геофизический журнал*. № 3, **36**, С. 146-159
6. Рокитянський, І.І., Соколова, Е.Ю., **Терешин, А.В.**, Яковлев, А.Г., Рабочая группа LADOGA. (2018), Аномалии электропроводности в зонах сочленения архейских и протерозойских геоблоков Украинского и Балтийского щитов. *Геофизический журнал*, **40**, №5, с. 209-244 doi: 10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147490
7. Рокитянський, І.І., **Терешин, А.В.** (2019), Спектры суточных вариаций геомагнитного поля. *Геофизический журнал*. Т. 41, № 5. С. 105-114. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183633>
8. Рокитянський, І.І., **Терешин, А.В.** (2020), Особенности исследования глубинной электропроводности Луны и Земли. *Геофизический журнал*, **42**, №2, с. 53-70

*Тези доповідей і матеріали конференцій*

9. Rokityansky, I.I., **Tereshyn, A.V.** (2010), Electromagnetic sounding of the Moon. *IAGA WG 1.2, 20<sup>th</sup> International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth*. Giza, Egypt, S9-P8
10. **Терешин, А.В.** (2010), Электромагнитное зондирование Луны. *Міжнародна наукова конференція. Астрономічна школа молодих вчених*. Біла Церква.
11. Rokityansky, I.I., **Tereshyn, A.V.** (2010), Electromagnetic sounding of the Moon. *Международный семинар по электромагнитным зондированиям памяти Марка Наумовича Бердичевского и Петера Вайдельта*, Москва.
12. Korepanov, V., Rokityansky, I., Dudkin, F., Belyayev, S., **Tereshyn, A.** (2010), Electromagnetic sounding of Moon's interior – a proposal for Luna-Globe project. *38th COSPAR Scientific Assembly*, Bremen, Germany.
13. Рокитянський, І.І., **Терешин, А.В.**, Савченко, Т.С. (2011), Исследование южной части Кировоградской аномалии электропроводности. *5-я школа-семинар ЭМЗ-2011*, Санкт Петербург.



14. Рокитянский, И.И., **Терешин, А.В.**, Савченко, Т.С., **Трегубенко, В.И.** (2012), Исследование южной части Кировоградской аномалии электропроводности. *Актуальные вопросы современных зондирующих электромагнитных систем.* Киев, 1-4 Октября.
15. Rokityansky, I.I., **Tereshyn, A.V.**, Savchenko, T.S. (2012), Investigation of the Kirovograd electrical conductivity anomaly. *9<sup>th</sup> International conference. Problems of Geocosmos*, St. Petersburg.
16. Rokityansky, I.I., **Tereshyn, A.V.**, Savchenko, T.S., **Tregubenko, V.I.** (2012), *Kirovograd electrical conductivity anomaly. Old and new data.* 21<sup>st</sup> EM Induction Workshop Darwin, Australia July 25-31.
17. **Tereshyn, A.V.**, Savchenko, T.S. (2013), Review of MTS studies in Ukraine and new data for the Kirovograd electrical conductivity anomaly. *5<sup>ая</sup> международная научная конференция молодых ученых и студентов: «Фундаментальная и прикладная геологическая наука глазами молодых ученых: достижения, перспективы, проблемы и пути их решения»*, Баку
18. Rokityansky, I.I., Babak, V.I., Sokolova, E.Yu., **Tereshyn, A.V.** (2014), Carpathian Electrical Conductivity Anomaly (CECA): results and perspectives. *22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop.* Weimar, Germany 24-30 August.
19. **Терешин, А.В.**, Рокитянский, И.И. (2016), Геоэлектрические особенности и помехи на геомагнитных обсерваториях Украины. *Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища VI міжнародна наукова конференція*, 20-23 вересня, Львів
20. **Терешин, А.В.** (2017), Сравнительный анализ Кировоградской и Ладожской аномалий электропроводности. *Актуальные проблемы геосреды и зондирующих систем*, 3-5 октября, Киев
21. Жамалетдинов, А.А., Рокитянский, И.И., **Терешин, А.В.** (2017), Некоторые черты электропроводности Украинского и Балтийского щитов. *Глубинное строение и геодинамика Приладожья.* Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 43-54
22. Жамалетдинов, А.А., Рокитянский, И.И., **Терешин, А.В.** (2017), Структура электропроводности Украинского и Балтийского щитов. *Глубинное строение и геодинамика Приладожья.* Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С, 55-66.

## АНОТАЦІЯ

**Терешин А.В. Електромагнітні дослідження Землі та Місяця –**  
Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика (103 – Науки про Землю). – Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вивченню електропровідності Землі та Місяця. Як відомо теорія ЕМ зондувань цих космічних тіл використовує магнітну моду, електрична мода вважається мізерно малою. Дисертант зібрав нові літературні дані, що свідчать про наявність вертикальних струмів в атмосфері Землі, а також непрямі (не електромагнітні) дані про кору і верхню мантію Місяця, які вказують на існування в них вертикальних струмів та електричної моди. Виписано теоретичні критерії для функцій відгуку в задачі глобальних зондувань Місяця та використано на даних, що були спостережені місіями Аполло та Луноход. Показано, що дані не задовольняють критеріям, з чого слідує, що опубліковані моделі розподілу електропровідності Місяця не ґрунтуються на адекватних спостереженнях. Сформульовано рекомендації для майбутніх досліджень Місяця. Із аналізу припливних і тектонічних місяцетрясінь припущено існування структур типу плюмів.

На Землі досліджувались 2 аномалії – Кіровоградська і Карпатська за найбільш простою та надійною методологією: випереджальне магнітоваріаційне профілювання із визначенням місцезнаходження аномалії, її максимальної глибини та сумарної провідності. Метод МТЗ використовується для уточнення практично важливої глибини верхньої кромки. Доведено продовження Кіровоградської аномалії у південному напрямку і її кореляція з аномаліями постійного магнітного поля.

**Ключові слова:** електропровідність, електрична та магнітна мода, магнітоваріаційне зондування та профілювання, магнітотеллуричне зондування, функції відгуку, Кіровоградська та Карпатська аномалія електропровідності, Місяць, місяцетрясіння.

## ABSTRACT

**Tereshyn A.V. Electromagnetic studies of the Earth and the Moon –** Qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis for a PhD degree in physical and mathematical sciences, specialty 04.00.22 — geophysics (103 – Earth Sciences). — S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the study of electrical conductivity of the Earth and the Moon. The theory of EM soundings of these cosmic bodies uses a magnetic mode, the electric mode is assumed to be negligible. The Applicant collected recent literature data which indicated the presence of vertical currents in the Earth's atmosphere, as well as indirect (non-electromagnetic) data on the crust and upper mantle of the Moon, that indicate the existence of vertical currents and an electric mode in them. The theoretical criteria for the response functions in the problem of global soundings of the Moon are written out and applied to the data that observed by the Apollo and Lunokhod missions. It

is shown that the data do not meet the criteria, whence it follows that the published lunar electrical conductivity distribution models are not based on adequate observations. The recommendations for future study of the Moon are formulated. Analysis of tidal and tectonic moonquakes suggested the existence of plume-type structures.

On the Earth, two anomalies were studied - Kirovograd and Carpathian using the simplest and most reliable methodology: the outrunning magnetovariational profiling with the determination of the anomaly location, its maximum depth and total conductivity. The MTS method is used to determine the practically important top edge depth. The continuation of the Kirovograd anomaly in the southern direction was established and its spatial correlation with the permanent magnetic field anomalies was investigated.

**Key words:** electrical conductivity, electrical and magnetic modes, magnetovariational sounding and profiling, magnetotelluric sounding, response functions, Kirovograd and Carpathian electrical conductivity anomaly, Moon, moonquakes.

### АННОТАЦИЯ

**Терешин А.В. Электромагнитные исследования Земли и Луны -** Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика (103 – Науки о Земле). – Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена изучению электропроводности Земли и Луны. Как известно теория EM зондирования этих космических тел использует магнитную моду, электрическая мода предполагается пренебрежимо малой. Диссертант собрал недавние литературные данные, свидетельствующие о наличии вертикальных токов в атмосфере Земли, а так же косвенные (не электромагнитные) данные о коре и верхней мантии Луны, указывающие на существование в них вертикальных токов и электрической моды.

В работе выписаны теоретические критерии, которым должны удовлетворять функции отклика в задаче глобальных магнитовариационных зондирования (индукция магнитной моды под действием внешнего однородного переменного магнитного поля) и применены к данным, полученным в 1970-ые годы миссиями Аполло и Луноход. Оказалось, что большинство данных не удовлетворяют теоретическим критериям, откуда следует, что опубликованные модели распределения электропроводности Луны не основаны на адекватных наблюдениях.

На основе детального анализа всех EM измерений на Луне и окололунных орбитах сформулированы рекомендации для будущих исследований электропроводности.

На основе сопоставления и анализа пространственно-временного распределения приливных и тектонических лунотрясений высказана гипотеза о возможности существования в мантии Луны структур типа плюмов.

На Земле электропроводность изучалась на двух региональных аномалиях Украины – Кировоградской и Карпатской. Рассмотрены примеры интерпретации одних и тех же данных МВП+МТЗ разными группами, получившими разные модели электропроводности и проанализированы причины этого: недооценка

многозначности обратной задачи, переоценка возможностей двухмерного и трехмерного моделирования, сложность материалов наблюдения. В данной работе вместо конструкции сложных 3D моделей, не обеспеченных данными наблюдений, автор ограничивается простейшими инвариантными моделями. Наиболее простые и достоверные инварианты дает метод МВП: положение оси или центра аномалии, ширина/максимальная глубина аномалии (по форме профильной кривой) и оценка её интегральной продольной проводимости  $G$  (по частотной характеристике аномального поля). Глубина верхней кромки аномалии определяется методом МТЗ.

Исходя из приоритета данных МВП, предсказывавших продолжение КирАЭ южнее Украинского щита, автор выполнил новые наблюдения и показал, что аномалия продолжается на юг и уходит под воды Черного моря. Этот результат опроверг мнение, основанное на 3D-моделировании, что аномалия заканчивается близ южной границы Украинского щита.

Сопоставление Кировоградской аномалии электропроводности с аномалиями постоянного магнитного поля показало их определенную взаимосвязь: восточнее КирАЭ проходит положительная аномалия постоянного поля, западнее – отрицательная. Подобное соответствие было найдено и для Ладожско-Ильменской аномалии.

Анализ аномалий Восточно-Европейской платформы до Балтийского щита включительно дал основание для предположения о существовании единой Транс-Европейской Цепи Аномалий Электропроводности (ТЕЦАЭ). Эта идея принята тектонистами докембрия как одно из оснований для описания геологических процессов в далеком прошлом.

В исследовании Карпатской аномалии доминировало построение векторов индукции (более 300), по которым картирована ось аномалии и оценена её максимальная глубина (20-25 км). Дальнейший прогресс в исследовании Карпатской аномалии требует детальное исследование глубины её верхней кромки методом МТЗ, о чем был составлен Проект международных исследований SECAD.

**Ключевые слова:** электропроводность, электрическая и магнитная мода, магнитовариационное зондирование и профилирование, магнитотеллурическое зондирование, функции отклика, Кировоградская и Карпатская аномалии электропроводности, Луна, лунотрясения.