

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Терешин Артем Валерійович

Прим.№ _____

УДК 537.8:523.31/.34(043.3)

**ДИСЕРТАЦІЯ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕМЛІ ТА МІСЯЦЯ**

04.02.22 - геофізика (103 – Науки про Землю)

10 Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.В. Терешин

Науковий керівник - Рокитянський Ігор Іванович, доктор фізико-математичних наук, професор

Київ -2021

АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидату фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика (103 – Науки про Землю). – Інститут геофізики НАН України, Київ, 2021.

Теорія електромагнітних (ЕМ) зондувань Землі та Місяця використовує магнітну моду, електрична мода передбачається нехтовно малою. Дисертант зібрав нещодавні літературні дані про те, що зміни літосферної емісії, електричного опору тропосфери, вертикального електричного поля на поверхні Землі та в повітрі призводять до змін повного електричного заряду (Total Electron Content - TEC) іоносфери, який безперервно вимірюється системами GPS, і зробив із цього зв'язку висновки про наявність вертикальних електричних струмів між Землею та іоносферою, а також наявність електричної моди, яка може бути виміряна у земних умовах, однак вона не настільки велика, щоб «заглушити» магнітну моду, на використанні якої побудовано теорію ЕМ зондувань Землі.

На Місяці відсутність електричної моди обґрунтовували високим опором (10^7 – 10^{12} Ом·м) реголіту - самого верхнього шару товщиною декілька метрів. Дисертант виконав серію розрахунків для різних доволі реалістичних параметрів верхнього погано провідного шару і отримав поля електричної моди, які зіставні за порядком величини із спостережуваним на Місяці змінним магнітним полем. Потім було розглянуто описані в літературі неоднорідності в корі та мантії Місяця: щільності за гравітаційними спостереженнями, за розподілом вогнищ місяцетрясінь, за спостереженнями вивержень вулканів і швидкоплинних поверхневих явищ, які інтерпретуються як явище дегазації із надр Місяця. Серед цих неоднорідностей деякі (канали магматичних джерел під вулканами, канали дегазації, мантійні плюми та ін.) є хорошими провідниками, що забезпечує локальні вертикальні струми і поля електричної моди. Таким чином, у роботі наведено дані про існування квазі-вертикальних провідних каналів у найбільш

високоомних шарах Землі (нижня атмосфера) і Місяця (кора і верхня мантія) і тим самим показано, що електрична мода присутня в природному електромагнітному полі Землі та Місяця і може бути виміряна.

У роботі виписано теоретичні критерії, яким повинні задовольняти функції відгуку в задачі глобальних зондувань Місяця (індукція магнітної моди під дією зовнішнього однорідного змінного магнітного поля) і використано до даних спостережень. Виявилось, що більшість даних, які було отримано в 1970-ті роки місіями Аполло та Луноход не задовольняють теоретичним критеріям, звідки випливає, що опубліковані моделі розподілу електропровідності Місяця не базуються на адекватних спостереженнях.

На основі детального аналізу всіх електромагнітних (ЕМ) вимірювань на Місяці і навколomisячних орбітах сформульовано рекомендації для майбутніх досліджень електропровідності, необхідні:

А. Удосконалення зондувань із використанням природних варіацій: 1. Магнітометри із більш високою чутливістю і частотою опитування. 2. Синхронні трьохкомпонентні магнітні спостереження на поверхні Місяця, бажано не менше, ніж у трьох пунктах. 3. При використанні орбітальних магнітометрів бажано мати 2-3 синхронно працюючих навколomisячних супутника із магнітометрами, щоб реєструвати ступінь однорідності поля сонячного вітру.

Б. Дослідження із використанням штучних ЕМ полів: 1. Дистанційне глобальне ЕМ зондування Місяця на різних частотах із борту навколomisячних супутників. 2. Локальні індукційні зондування із 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 узгоджених рознесених установок і значно більше.

Роботи групи Б напевно дадуть цікаві достовірні нові результати. У роботах групи А неминучі припущення, від яких буде залежати достовірність результату. Навіть робота трьох синхронних магнітометрів на поверхні Місяця не гарантує розділення двох мод (складне і проблематичне завдання навіть на Землі), однак

використання особливостей формування полів у чотирьох зонах місячної орбіти може допомогти виконанню задачі. Повторення робіт Аполло (один орбітальний магнітометр і один на поверхні Місяця) не дасть нових наукових результатів. Оскільки встановлення багатьох магнітометрів силами однієї країни мало ймовірна, бажана організація міжнародного проекту.

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

Дослідження електропровідності Землі представлено/описано в даній роботі на прикладі вивчення двох основних регіональних аномалій України – Кіровоградської та Карпатської. У роботі розглянуто приклади інтерпретації одних і тих самих даних магнітоваріаційного профілювання та магнітотеллуричного зондування (МВП+МТЗ) різними групами геоелектриків, які отримали суттєво різні моделі електропровідності і проаналізовано причини цього: недооцінка багатозначності оберненої задачі, переоцінка можливостей двовимірного і тривимірного моделювання, складність матеріалів спостереження і використання суб'єктивних критеріїв при відборі матеріалів. У даній роботі замість конструкції складних 3D моделей, не забезпечених даними спостережень, автор обмежується простішими моделями – інваріантами. Найбільш прості і достовірні інваріанти дає метод МВП: положення вісі або центру аномалії, ширина/максимальна глибина аномалії (по формі профільної кривої) і оцінка її інтегральної поздовжньої провідності G (за частотною характеристикою аномального поля). Глибина верхньої кромки аномалії визначається методом МТЗ.

Базуючись на аналізі старих магнітоваріаційних (МВ) та магнітотеллуричних (МТ) даних, а також виходячи із пріоритету даних МВП, що передбачали продовження Кіровоградської аномалії електропровідності на південь від границі Українського щита, автор виконав нові експериментальні спостереження зовнішнього змінного низькочастотного електромагнітного поля Землі, за допомогою сучасного обладнання з використанням передових технологій, на

півдні Херсонської та Миколаївської областей. Було проведено обробку отриманих експериментальних даних за допомогою загальноприйнятого у геоелектричному науковому середовищі програмного комплексу PRC_MTMV (розробленого І.М. Варенцовим) та проаналізовано передавальні оператори МТ і МВ поля в широкому діапазоні періодів. В результаті чого, було показано, що аномалія продовжується на південь під води Чорного моря. Цей результат спростував пануючу думку, яка ґрунтувалась на 3D-моделюванні, що аномалія закінчується поблизу південної границі Українського щита.

Зіставлення Кіровоградської аномалії електропровідності (КірАЕ) із аномаліями постійного магнітного поля показало їх певний взаємозв'язок: східніше КірАЕ проходить позитивна аномалія постійного поля, західніше – негативна. Подібну відповідність було знайдено і для Ладозько-Ільменської аномалії.

Для визначення ступеню універсальності отриманого взаємозв'язку було проаналізовано аномалії Східноєвропейської платформи до Балтійського щита включно. Вийшов ланцюг коротких аномалій (що перериваються осадовими басейнами, які екранують корові провідники) із двома довгими, гарно вивченими схожими аномаліями на кінцях – Кіровоградською та Ладозькою. Цей матеріал дав підставу для припущення про існування єдиної Транс-Європейської аномалії електропровідності. Яка включає в себе: Південно-Фінляндську та Ладозьку аномалії, далі круто повернувши на південний-захід Ільменську аномалію, яка розгалужується імовірно на Московсько-Тамбовську та більш впевнено на Барятинську аномалію, яка в свою чергу розділяється на Курську та Кіровоградську аномалію. Ця ідея прийнята тектоністами докембрію як одна із підстав для опису геологічних процесів у далекому минулому.

Автор прийняв активну участь у виконанні огляду ЕМ досліджень Карпатської аномалії електропровідності і обґрунтуванні задачі подальших робіт. На Карпатах побудовано більше 300 векторів індукції, за якими картовано вісь аномалії і оцінено її максимальну глибину (20-30 км). Нажаль, аномальне поле в горизонтальній компоненті розраховувалось у небагатьох пунктах. Враховуючи

можливе практичне використання Карпатської аномалії електропровідності, необхідне детальне дослідження глибини її верхньої кромки методами зондування – МТЗ, про що було складено Проект міжнародних досліджень SECAD (Study of the Electrical Conductivity Anomaly Depth).

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

ABSTRACT

Tereshyn A.V. Electromagnetic studies of the Earth and the Moon. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Physics and Mathematics, specialty 04.00.22 — geophysics (103 – Earth Sciences). — S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The theory of EM soundings of the Earth and the Moon uses a magnetic mode, the electric mode is assumed to be negligible. The Applicant collected recent literature data which indicated the existence of changes in lithospheric emission, troposphere electrical resistance, vertical electric field on the Earth's surface and in air that results in changes in the total electric charge (TEC) of the ionosphere, that continuously measured by GPS systems, and made from this connection the conclusion about the presence of vertical electric currents between the Earth and the ionosphere and the presence of an electric mode that can be measured in terrestrial conditions, but it is not so big as to "drown out" the magnetic mode, on the use of which the theory of EM Earth soundings is built.

On the Moon, the absence of an electric mode was justified by the high resistance ($10^7 - 10^{12}$ Ohm) of regolith - the uppermost layer several meters thick. The Applicant performed a series of calculations for different, quite realistic parameters of the upper poorly conducting layer and obtained electric mode magnetic fields comparable with the alternating magnetic field observed on the Moon. Then, the inhomogeneities in the crust

and mantle of the Moon described in the literature were considered: density according to gravitational observations, the distribution of moonquakes foci, according to the observation of volcanic eruptions and transient surface phenomena, interpreted as the degassing from the Moon interior. Among these inhomogeneities, some (channels of magma chambers under volcanoes, degassing channels, mantle plumes, etc.) are good conductors, which will provide local vertical currents and electric mode fields. Thus, the work provides data on the existence of quasi-vertical conducting channels in the most high-resistance layers of the Earth (lower atmosphere) and the Moon (crust and upper mantle) and thus shows that the electric mode is present in the natural electromagnetic field of the Earth and the Moon and can be measured.

In this work, theoretical criteria are written that must be satisfied by the response functions in the problem of global soundings of the Moon (magnetic mode induction under the action of an external uniform alternating magnetic field) and applied to the observed data. It turned out that most of the data obtained in the 1970s by the Apollo and Lunokhod missions do not satisfy theoretical criteria, which means that the published models of the Moon electrical conductivity distribution are not based on adequate observations.

Based on a detailed analysis of all EM measurements on the Moon and circumlunar orbits, recommendations for future studies of electrical conductivity are formulated:

A. Improvement of soundings using natural variations: 1. Magnetometers with higher sensitivity and sampling rate. 2. Synchronous three-component magnetic observations on the lunar surface, preferably at least at three points. 3. When using orbital magnetometers, it is desirable to have 2-3 synchronously operating circumlunar satellites with magnetometers in order to record the degree of uniformity of the solar wind field.

B. Research with the use of artificial EM fields: 1. Remote global EM sounding of the Moon at different frequencies with the lunar satellites. 2. Local induction soundings from the board of specialized lunar rovers, for example, using the "loop in loop" technique. Due to the high resistance of the upper layers of the Moon and

a low level of noise, the sounding depth can reach hundreds and thousands of meters, and in the presence of two coordinated remote instruments, even much more.

The work of group B will certainly yield interesting reliable new results. In the works of group A, assumptions are inevitable, on which the reliability of the result will depend. Even the operation of three synchronous magnetometers on the lunar surface does not guarantee the separation of two modes (this is difficult and problematic to implement even on Earth), however, using the features of the formation of fields in four zones of the lunar orbit can help to accomplish the task. Repetition of Apollo's work (one orbiting magnetometer and one on the lunar surface) will not give anything new. Organization of an international project is desirable, since installation of many magnetometers by forces of only one country is unlikely.

Based on the comparison and analysis of the spatio-temporal distribution of tidal and tectonic moonquakes, a hypothesis was put forward about the possibility of the existence of plume-type structures in the lunar mantle.

The study of the electrical conductivity of the Earth is presented/described in this work on the example of the study of Kirovograd and Carpathian regional anomaly - main regional anomalies of Ukraine. The paper considers examples of interpretation of the same magnetovariational profiling and magnetotelluric sounding (MVP + MTS) data by different groups of researchers who received significantly different models of electrical conductivity and analyzes the reasons for this: underestimation of the ambiguity of the inverse problem, overestimation of the capabilities of two-dimensional and three-dimensional modeling, observation data complexity, and the use of subjective criteria in the data selection. In this work, instead of constructing complex 3D models that are not provided with observational data, the author limits himself to the simplest models - invariants. The simplest and most reliable invariants are provided by the MVP method: the position of the axis or center of the anomaly, the width/maximum depth of the anomaly (according to the shape of the profile curve), and an estimate of its integral longitudinal conductivity G (according to the frequency characteristic of the anomalous field). The depth of the anomaly upper edge is determined by the MTS method.

Based on the priority of the MVP data, which predicted the continuation of the Kirovograd anomaly south of the Ukrainian shield, the author made new observations and showed that the anomaly continues to the south and goes under the Black Sea waters. This result disproved the prevailing opinion, which based on 3D-modeling, that the anomaly ends near the southern border of the Ukrainian Shield.

Comparison of the Kirovograd electrical conductivity anomaly with the constant magnetic field anomalies showed their definite relationship: a positive constant field anomaly passes to the east of Kirovograd anomaly, and a negative one to the west. A similar correspondence was found for the Ladoga-Ilmenska anomaly.

To determine the degree of universality of the obtained relationship, the anomalies of the East European Platform up to the Baltic Shield were analyzed. The result is a chain of short anomalies (interrupted by sedimentary basins that screen crustal conductors) with two long, well-studied similar anomalies at the ends - Kirovograd and Ladoga. This material gave rise to the assumption of a single Trans-European electrical conductivity anomaly existence. This idea was accepted by Precambrian tectonists as one of the bases for describing geological processes in the distant past.

The author took an active part in the review of EM studies of the Carpathian anomaly and substantiation of the task of subsequent works. In the Carpathians, more than 300 induction vectors have been built, according to which the axis of the anomaly is mapped and its maximum depth (20-30 km) is estimated. Unfortunately, the anomalous field in the horizontal component was calculated at few points. Taking into account the possible practical use of the Carpathian anomaly, a detailed study of its upper edge depth using sounding methods - MTS is necessary, about which the SECAD International Research Project (Study of the Electrical Conductivity Anomaly Depth) was drawn up.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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 в 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.І., 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.І., **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.0203-3 100.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 та матеріали конференцій:

9. Rokityansky, I.I., **Tereshyn, A.V.** (2010), Electromagnetic sounding of the Moon. *IAGA WG 1.2, 20th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth*. Giza, Егуп, 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. Рокитянский, И.И., **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. *9th 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. *21st 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^{ая} 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. 22nd 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.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і символів	15
ВСПУП	16
РОЗДІЛ 1. СПІВВІДНОШЕННЯ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ, ЩО ЛЕЖАТЬ В ОСНОВІ ГЕОЕЛЕКТРИКИ	22
1.1. Основоположні співвідношення геоелектрики	22
1.2. ЕМ поля на сферично симетричній або горизонтально-шарованій Землі	26
Висновки до розділу 1	32
Перелік використаних джерел для розділу 1	32
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	34
2.1. Магнітоваріаційне зондування (МВЗ).	35
2.2. Магнітоваріаційне профілювання (МВП)	36
2.3. Магнітотеллуричне зондування (МТЗ)	40
2.4. Етапи геоелектричного дослідження	43
Висновки до розділу 2	46
Перелік використаних джерел для розділу 2	46
РОЗДІЛ 3. ДЖЕРЕЛА ПРИРОДНОГО ЗМІННОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ	47
3.1. Магнітосфера Землі та струми в ній	47
3.2. Морфологія електромагнітного поля Землі	54
3.2.1. Добові варіації	55
3.2.2. Збурення	56
3.2.3. Пульсації	57
Висновки до розділу 3	57
Перелік використаних джерел для розділу 3	58
РОЗДІЛ 4. КІРОВОГРАДСЬКА ТА КАРПАТСЬКА АНОМАЛІЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ	60
4.1. Історія ранніх досліджень	60
4.2. Аналіз результатів на ряді профілів Українського Щита	62
4.2.1. Український щит і його південний схил	70

	14
4.3. Нові МВП-МТЗ, що виконані автором	71
4.3.1. Проведення спостережень. Методика і апаратура	72
4.3.2. Результати геоелектромагнітних досліджень та їх аналіз	74
4.4. Північне продовження КірАЕ	79
4.4.1. Ладозька аномалія електропровідності	79
4.4.2. Транс-Європейська аномалія електропровідності	82
4.4.3. Зіставлення із аномаліями постійного магнітного поля	85
4.5. Карпатська аномалія електропровідності	86
4.5.1. МТЗ над осьюою зоною Карпатської аномалії	89
Висновки до розділу 4	93
Перелік використаних джерел для розділу 4	94
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ НА МІСЯЦІ	100
5.1. Формування електромагнітних полів на Місяці	101
5.1.1. Електрична мода	101
5.1.2. Магнітна та електрична моди на різних ділянках місячної орбіти	103
5.2. Фізичні основи зондувань Місяця	107
5.3. Деякі результати зондувань Місяця в 1970-ті роки	111
5.3.1. Горизонтальні неоднорідності всередині Місяця	117
5.3.2. Вулканізм і дегазація Місяця	120
5.4. Пропозиції щодо нових досліджень електропровідності Місяця	122
Висновки до розділу 5	123
Перелік використаних джерел для розділу 5	124
ВИСНОВКИ	127
Додаток 1	130

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів:

ЕМ – електромагнітні;

МВП – магнітоваріаційне профілювання;

МВЗ – магнітоваріаційне зондування;

МТЗ – магнітотеллуричне зондування;

МТ/МВ методи – магнітотеллуричні і магнітоваріаційні методи;

СЄП – Східноєвропейська платформа;

УЩ – Український кристалічний щит;

БЩ – Балтійський кристалічний щит;

ДДВ – Дніпровсько-Донецька западина;

ТЄЛАЕ – Транс-Європейський ланцюг аномалій електропровідності;

ТЕС - повний електронний склад (Total Electron Content) іоносфери;

КірАЕ – Кіровоградська аномалія електропровідності;

ЛАЕ+І – Ладозько-Ільменська аномалія електропровідності

КАЕ – Карпатська аномалія електропровідності;

ФВ (або RF-response functions) – функція відгуку;

Т-К - модель Тихонова-Кан'яра;

ГЕК - Глобальне електричне коло;

ККР - Криворізько-Кременчуцький розлом;

ЗІККШЗ - Західно-Інгулецько-Криворізько-Кременчуцька шовна зона

МТ – місяцетрясіння;

S – сумарна поздовжня провідність

3D – тривимірна модель;

2D – двовимірна модель;

ВСПУП

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, вимірювання 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 в 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 в 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, і ці поля будуть виступати в якості завади на горизонтальних компонентах. Для векторів індукції ця завада буде мінімальною, оскільки у вертикальній компоненті її немає.

Новизна в 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 знайдена і для Ладозько-Ільменської аномалії.

3). Для визначення ступеня універсальності отриманого взаємозв'язку було проаналізовано аномалії Східноєвропейської платформи до Балтійського щита включно. У 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 в дослідженні електропровідності Місяця:

1) Виконано розрахунки полів електричної моди за різного опору верхнього погано провідного шару. Виконано огляд даних про горизонтальні неоднорідності всередині Місяця, про наявність вулканізму та 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 магнітної 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 в 1970-ті роки місіями Аполло та Луноход не задовольняють теоретичним критеріям. Причина: дані ускладнені неконтрольованими (під час двохточкових 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 праці, що 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, 20th 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».

(Київ, 2012) 9th International conference. Problems of Geocosmos, St. Petersburg, 2012; 21st EM Induction Workshop (Darwin, Australia, 2012); 5^{ya} міжнародна наука конференція молодих учених і студентів: «Фундаментальна і прикладна геологічна наука глазами молодих учених: досягнення, перспективи, проблеми і шляхи їх рішення» (Баку, 2013); 22nd EM Induction Workshop (Weimar, Germany, 2014); VI міжнародна наукова конференція «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища» (Львів, 2016); Третя міжнародна конференція «Актуальні проблеми геосреда и зондирующих систем», (Київ, 2017);

Публікації. Основні наукові результати та висновки, викладені в дисертаційній роботі, одержані автором особисто або в співавторстві та опубліковані в 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: статей – 7 (3 входять до міжнародної наукометричної бази - Web of Science), та 1 – монографія (друковане видання накладом 300 примірників) та 14 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях та симпозіумах.

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.

РОЗДІЛ 1

СПІВВІДНОШЕННЯ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ, ЩО ЛЕЖАТЬ В ОСНОВІ ГЕОЕЛЕКТРИКИ

1.1. Основоположні співвідношення геоелектрики.

Розділ написано за матеріалами монографій [Стрэттон, 1948; Рокитянский, 1981; Бердичевский и Дмитриев, 2009] і ряду статей.

Дослідження глибинної електропровідності Землі та Місяця базуються на спостереженні та аналізі природних електромагнітних ЕМ полів. Їх аналіз ґрунтується на рівняннях Максвелла:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j} + \mathbf{j}^{\text{CT}}; \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}; \quad (1.2)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0; \quad (1.3)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{D} = q; \quad (1.4)$$

із матеріальними співвідношеннями

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu\mathbf{H}; \quad \mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}. \quad (1.5)$$

де \mathbf{H} і \mathbf{B} – напруженість магнітного поля і магнітна індукція; \mathbf{E} та \mathbf{D} – напруженість електричного поля та індукція; \mathbf{j} – щільність електричного струму; \mathbf{j}^{CT} – щільність сторонніх струмів; q - об'ємна щільність стороннього електричного заряду; ε і μ – діелектрична і магнітна проникність; σ – питома провідність середовища; t - час.

Рівняння Максвелла є узагальненою диференційною формою основних експериментальних законів електродинаміки: рівняння (1.1) – узагальненням закону Біо-Савара, рівняння (1.2) – закону електромагнітної індукції Фарадея, рівняння (1.3) виражає замкненість силових ліній магнітного поля, рівняння (1.4) витікає із закону Кулона. Сторонні струми \mathbf{j}^{CT} у рівнянні (1.1) – це струми, які

викликані, в першу чергу, силами неелектроманітної природи: наприклад, струми поділу зарядів у грозівій хмарі, що течуть під дією гравітаційних сил, термодинамічних і молекулярних процесів; струми електрорушійної сили електрохімічної поляризації. До сторонніх струмів можна, нарешті, віднести струми деякої частини електродинамічної системи, яку ми не розглядаємо в представленій задачі, а вважаємо заданою. Так при зондуванні Землі систему магнітосферних та іоносферних струмів можна віднести до розряду сторонніх струмів. Сторонні струми діють там, де є джерела поля.

Вважаючи матеріальні параметри ϵ , μ та σ такими, що не залежать від інтенсивності полів, можна вважати рівняння Максвелла лінійними. У застосуванні до геоелектрики, лінійність рівнянь Максвелла є важливою властивістю, з чого слідує принцип суперпозиції, за яким електромагнітне поле деяких джерел дорівнює сумі полів, які збуджуються кожним джерелом окремо. Принцип суперпозиції суттєво спрощує розв'язання електродинамічних задач, дозволяючи представляти поля у вигляді розкладень за часовими та просторовими гармоніками та розглядати кожну гармоніку незалежно від інших, дає можливість представляти поля реальних джерел у вигляді суми полів елементарних джерел, які описуються функцією Гріна.

Із рівнянь Максвелла для гармонійної зміни поля із частотою ω можна вивести рівняння Гельмгольца:

$$\begin{aligned}\nabla^2 A^e + k^2 A^e &= -\mu \mathbf{j}^e \text{ ст}; \\ \nabla^2 A^m + k^2 A^m &= -\mathbf{j}^m \text{ ст}.\end{aligned}\tag{1.6}$$

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

Перша із формул (1.6) написана для потенціалів електричного типу, оскільки вони збурюються електричними струмами, друга – для потенціалів магнітного типу, які збурюються магнітними струмами (фіктивні поняття магнітних струмів

j^m та зарядів q^m – є математичним засобом опису вихрових електричних струмів) [Стреттон, 1948].

Не заглиблюючись у деталі перетворень ми наведемо формулу Стреттона-Чу, яка виводиться із рівнянь Максвелла із використанням векторної формули Гріна. Нехай V замкнена область простору, яка обмежена регулярною поверхнею S , \mathbf{Q} та \mathbf{P} векторні функції точки, що безперервні в області V і на поверхні S разом із своїми першими та другими похідними. \mathbf{n} – нормаль до поверхні S . Тоді має місце векторний аналог теореми Гріна:

$$\int_V (\mathbf{Q} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{P} - \mathbf{P} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{Q}) dv = \oint_S (\mathbf{P} \times \operatorname{rot} \mathbf{Q} - \mathbf{Q} \times \operatorname{rot} \mathbf{P}) \mathbf{n} ds \quad (1.7)$$

і формула Стреттона-Чу має наступний вигляд [Стреттон, 1948]:

$$\begin{aligned} E(p) = & \frac{1}{4\pi} \int_V \left\{ \mp i\omega \mu j^e G - j^m \times \operatorname{grad} G + \frac{q^e}{\varepsilon} \operatorname{grad} G \right\} dv - \\ & - \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ \mp i\omega \mathbf{n} \times \mathbf{B} G + [\mathbf{n} \times \mathbf{E}] \times \operatorname{grad} G + (\mathbf{n} \mathbf{E}) \operatorname{grad} G \right\} ds; \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(p) = & \frac{1}{4\pi} \int_V \left\{ \mp i\omega \mu \varepsilon' j^m G + \mu j^e \times \operatorname{grad} G + q^m \operatorname{grad} G \right\} dv + \\ & + \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ \mp i\omega \mu \varepsilon' \mathbf{n} \times \mathbf{E} G - [\mathbf{n} \times \mathbf{B}] \times \operatorname{grad} G - (\mathbf{n} \mathbf{B}) \operatorname{grad} G \right\} ds. \end{aligned}$$

де G – скалярна функція Гріна, j^e, j^m – електричні та магнітні струми, q^e та q^m – електричні і магнітні заряди, $\varepsilon' = \varepsilon \pm \frac{\sigma}{i\omega}$.

Наведені співвідношення (1.8) визначають електричне і магнітне поля в однорідному середовищі як функцію об'ємних і поверхневих джерел. Якщо об'ємні джерела виключити із розгляду, оточивши їх поверхнями і задавши на цих поверхнях граничні значення компонент \mathbf{E} та \mathbf{B} , що описують поле джерел, то

у формулі залишиться лише поверхневий інтеграл (у s будуть включені також всі поверхні, що оточують джерела). Тоді векторні функції \mathbf{E} та \mathbf{B} в області v не будуть мати джерел, і будуть задовольняти однорідним (без правої частини) рівнянням Гельмгольца і єдиним чином виражатись через свої значення на границі області [Жданов, 1975]:

$$\mathbf{E}(p) = -\frac{1}{4\pi} \int_s \{\mp i\omega \mathbf{n} \times \mathbf{B}G + [\mathbf{n} \times \mathbf{E}] \times \text{grad } G + (\mathbf{nE}) \text{ grad } G\} ds; \quad (1.9)$$

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

Значення $\mathbf{n} \times \mathbf{B}$ та $\mathbf{n} \times \mathbf{E}$ відповідають поверхневим електричним і магнітним струмам, (\mathbf{nB}) та (\mathbf{nE}) – поверхневим магнітним та електричним зарядам. Слід зазначити, що струми пов'язані із відповідними зарядами за допомогою рівнянь неперервності вигляду $\text{div } \mathbf{j} = -\frac{\partial q}{\partial t}$. Згідно із теоремою єдиності, електромагнітне поле всередині замкненої області без джерел визначається початковим розподілом поля по всій області і граничним розподілом тангенційного поля \mathbf{E} (або \mathbf{B}) на її поверхні для $t \geq 0$. Якщо s на деякій ділянці співпадає з поверхнею землі або паралельна їй, то члени, що містять $\mathbf{n} \times \mathbf{B}$ та (\mathbf{nE}) , відповідають електричній, тобто ТМ-моді, члени, які містять $\mathbf{n} \times \mathbf{E}$ та (\mathbf{nB}) , відповідають магнітній, тобто ТЕ-моді. Структура формули Стреттона-Чу при об'ємному інтегралі, який дорівнює нулю, подібна до структури інтегралу Коші, який визначає аналітичну функцію в області за значеннями її на замкнутому контурі, який обмежує цю область. Тому формулу (1.9) можна використовувати для розділення поля на внутрішню і зовнішню, нормальну та аномальну, поверхневу та глибинну частини, а також для аналітичного продовження полів. Формула Стреттона-Чу виведена для однорідного простору. На неоднорідних об'єктах функція Гріна перестає бути скаляром, а стає тензором другого рангу, який містить у загальному випадку 9 скалярних величин.

1.2. ЕМ поля на сферично симетричній або горизонтально-шарованій Землі

$$\sigma = \sigma(r) , [\sigma = \sigma(z)] \quad (1.10)$$

Згідно із теорією векторних полів [Morse and Feshbach, 1953; Eckhardt, 1968], для таких середовищ розв'язок рівнянь електромагнітного поля може бути представлений сумою двох мод – електричною і магнітною (наочна конфігурація двох мод дана на рис. 5.1 у розділі про Місяць), кожна із яких виражається через векторний потенціал, який має тільки одну компоненту:

$$A^{e,m} = \Psi^{e,m}(r, \theta, \varphi) \mathbf{e}_1 , [A^{e,m} = \Psi^{e,m}(z, x, y) \mathbf{e}_1], \quad (1.11)$$

- у (1.11) і наступних виразах перша формула дана для сфери в сферичних координатах (r, θ, φ) , а друга (у квадратних дужках) для прямокутних координат (z, x, y) . Оскільки джерела магнітотеллуричного поля знаходяться поза Землею, для провідних шарів Землі будемо вважати сторонні струми рівними нулю. Підставляючи вираз (1.11) у векторне рівняння Гельмгольца (1.6), для скалярної функції отримуємо

$$\nabla^2 \Psi^{e,m} + k^2 \Psi^{e,m} = 0, \quad (1.12)$$

Розв'язання виконується методом відокремлення змінних і має вигляд нескінченного ряду із спільним членом:

$$\Psi_n^{e,m}(r, \theta, \varphi) = F_n^{e,m}(r) S_n(\theta, \varphi) , [\Psi_n(z, x, y) = F_n(z) S_n(x, y)] \quad (1.13)$$

де радіальна функція $F_n(r)$ задовольняє рівнянню

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial F_n}{\partial r} \right) = (n(n+1) - k^2 r^2) F_n , \left[\frac{\partial^2 F_n}{\partial z^2} = (v_n^2 - k^2) F_n \right] \quad (1.14)$$

а поверхнева функція S_n задовольняє рівнянню

$$r^2 \nabla^2 S_n + n(n+1) S_n = 0 , [\nabla^2 S + v_n^2 S = 0] \quad (1.15)$$

розв'язок якого має вигляд

$$S_n^m = e^{im\varphi} P_n^m(\cos\theta) , [S_n = e^{iv_{xn}x} e^{iv_{yn}y}] \quad (1.16)$$

де $P_n^m(\cos\theta)$ – приєднана функція Лежандра першого роду; $m = 1, 2, \dots, n$ [$v_n^2 = v_{xn}^2 + v_{yn}^2$].

Введемо вектори \mathbf{M} та \mathbf{N} . \mathbf{M} – векторне поле, поперечне відносно r [z], а \mathbf{N} вектор, який дорівнює $\mathbf{N} = \text{rot}\mathbf{M}$. Тепер електричну (\mathbf{e}) та магнітну (\mathbf{m}) моди можна записати через ці вектори та визначити їх фізичний сенс:

- $\mathbf{B} = \mathbf{M}^e, \mathbf{E} = \mp \frac{i\omega}{k^2} \mathbf{N}^e$ - це електрична мода. Оскільки нормальна до Землі компонента B_r [B_z] дорівнює нулю, цю моду називають також поперечно-магнітною – ТМ. Їй відповідає полоїдальна струмова система, в якій електричні струми містять радіальну складову, а магнітне поле тороїдальне, тобто усюди паралельне земній поверхні.

- $\mathbf{E} = \mathbf{M}^m, \mathbf{B} = \mp \frac{1}{i\omega} \mathbf{N}^m$ - це магнітна, або поперечно-електрична, мода ТЕ, оскільки нормальна складова E_r , [E_z] дорівнює нулю. Електричні струми в концентрично шарованому провіднику всюди течуть паралельно земній поверхні, утворюючи тороїдальну систему, якій відповідає полоїдальне магнітне поле.

Таким чином, для однієї просторово-часової гармоніки

$$e^{\pm i(\omega t - m\varphi)} P_n^m(\cos\theta) [e^{\pm i(\omega t - v_{xn}x - v_{yn}y)}] \quad (1.17)$$

розв'язок можна отримати в наступному вигляді:

$$\mathbf{E} = \mathbf{M}^m \mp \frac{t\omega}{k^2} \mathbf{N}^e = F^m \text{grad } S \times \mathbf{e}_1 \mp \frac{i\omega}{k^2} \frac{\partial F^e}{\partial r} \text{grad } S \mp \frac{i\omega}{k^2} F^e \nabla^2 S \mathbf{e}_1, \quad (1.18)$$

$$\mathbf{B} = \mp \frac{1}{i\omega} \mathbf{N}^m + \mathbf{M}^e = \mp \frac{1}{i\omega} \frac{\partial F^m}{\partial r} \text{grad } S \mp \frac{1}{i\omega} F^m \nabla^2 S \mathbf{e}_1 + F^e \text{grad } S \times \mathbf{e}_1.$$

Спектральний імпеданс. Із виразу (1.18) видно, що характер розподілу тангенційних компонент електричного та магнітного полів однаковий на поверхні сферично симетричної Землі та на будь-якій поверхні, яка паралельна до неї. При цьому горизонтальній компоненті E_t відповідає перпендикулярна їй компонента B_t . Сіввідношення цих компонент визначає спектральний імпеданс [Бердичевский и др., 1969а], який знаходиться не за повним спостережуваним полем, а за одною

просторовою гармонікою і має для магнітної та електричної мод наступний вигляд:

$$\xi^m = \frac{E_\theta^m}{B_\varphi^m} = -\frac{E_\varphi^m}{B_\theta^m} = \mp \frac{i\omega F^m}{\frac{dF^m}{dr}},$$

$$\left[\xi^m = \frac{E_x^m}{B_y^m} = -\frac{E_y^m}{B_x^m} = \mp \frac{i\omega F^m}{\frac{dF^m}{dz}} \right];$$

$$\xi^e = \frac{E_\theta^e}{B_\varphi^e} = -\frac{E_\varphi^e}{B_\theta^e} = \mp \frac{i\omega \frac{dF^e}{dr}}{k^2 F^e},$$

$$\left[\xi^e = \frac{E_x^e}{B_y^e} = -\frac{E_y^e}{B_x^e} = \mp \frac{i\omega \frac{dF^e}{dz}}{k^2 F^e} \right].$$

Для встановлення загального правила визначення знаку імпедансу виразимо імпеданс через вектори поля:

$$\mathbf{E} - \mathbf{n}(\mathbf{nE}) = \xi \mathbf{B} \times \mathbf{n},$$

або більш зручно через їх тангенційні компоненти

$$\mathbf{E}_t = \xi \mathbf{B} \times \mathbf{n}.$$

де \mathbf{n} – нормаль, яка спрямована всередину провідника, тобто вертикально вниз.

Вектори $\mathbf{E}_t, \mathbf{B}_t, \mathbf{n}$ утворюють правоїгвинтову систему, вектори \mathbf{E}_t та $\mathbf{B} \times \mathbf{n}$ паралельні і спрямовані в одну і ту ж сторону. Якщо паралельність \mathbf{E}_t та $\mathbf{B} \times \mathbf{n}$ порушується, ξ стає тензором. Неперпендикулярність \mathbf{E}_t та \mathbf{B}_t може бути зумовлена властивостями джерела та анізотропією або горизонтальною неоднорідністю Землі. Як видно із формули (1.18), на горизонтально-шарованій Землі поля \mathbf{E}_t та \mathbf{B}_t однієї просторової гармоніки магнітного та електричного типу завжди взаємно перпендикулярні [Price, 1967]. Для бімодального збуреного поля (тобто за наявності двох мод – магнітної та електричної) або для поля, яке складається із багатьох просторових гармонік однієї моди, \mathbf{E}_t та \mathbf{B}_t можуть бути неперпендикулярними, якщо не виконуються умови частотного зондування (1.23).

Як відомо геометрія поля визначається порядком n сферичної гармоніки (або просторовою частотою ν_n). Якщо в правій частині рівняння (1.14) перший доданок малий у порівнянні із другим, тобто

$$\frac{n(n+1)}{r^2} \ll k^2, [v^2 \ll k^2] \quad (1.23)$$

то функції F , R , імпеданс та інші інтерпретаційні параметри не залежать від структури джерела та визначаються тільки провідністю Землі. Реальні поля зазвичай описуються сумою просторових гармонік. Всі гармоніки, які задовольняють умові (1.23), можна розглядати разом, при цьому єдиним суттєвим параметром поля джерела залишається циклічна частота ω , тому умову (1.23) називають умовою частотного зондування. При різноманітті геоелектричних структур та видів джерел можуть зустрічатися випадки, коли умова (1.23) не виконується, тоді імпеданс, який визначається із співвідношення компонент електричного та магнітного полів, буде спотворений. Про ступінь спотворення можна судити по розкиду значень імпедансу, що визначаються за різними реалізаціям. Відповідно до умови (1.23), на високоомних ділянках земної кори спостерігається великий розкид значень імпедансу, на гарно провідних – малий.

Функції відгуку шарованої Землі. Рівняння (1.19) та (1.20) свідчать, що всі інтерпретаційні параметри визначаються одним і тим же самим виразом:

для магнітної моди

$$R^m = \frac{F^m}{\frac{dF^m}{dr}}, \quad \left[R^m = \frac{F^m}{\frac{dF^m}{dz}} \right], \quad (1.24)$$

для електричної

$$R^e = \frac{\frac{dF^e}{dr}}{k^2 F^e}, \quad \left[R^e = \frac{\frac{dF^e}{dz}}{k^2 F^e} \right]. \quad (1.24')$$

Функції R мають розмірність довжини та за виконання умови (1.23) характеризують ефективну глибину проникнення поля, тобто вони також є

ефективними параметрами, для яких відомий ряд співвідношень, що пов'язують їх із розподілом провідності в шарованій Землі.

Розрахунок функцій відгуку на горизонтально-шарованій Землі зазвичай виконується за допомогою рекурентних формул, при виведенні яких використовується безперервність тангенційних компонент електричного та магнітного полів на межах розділу шарів із різною електропровідністю.

Виконуючи послідовно від шару до шару підстановки функції R , отримуємо функцію R на поверхні Землі, яка виражена через параметри усіх шарів. Для магнітної та електричної мод, у прямокутних координатах, отримано формули

$$\begin{aligned}
 R^m(p, 0) = & -\frac{1}{p_1} \operatorname{cth} \left\{ p_1 h_1 \right. \\
 & + \operatorname{Arcth} \left[\frac{p_1}{p_2} \operatorname{cth}(p_2 h_2 + \dots \right. \\
 & \left. \left. + \operatorname{Arcth} \left[\frac{p_{N-2}}{p_{N-1}} \operatorname{cth} \left(p_{N-1} h_{N-1} + \operatorname{Arcth} \frac{p_{N-1}}{p_N} \right) \right] \right] \dots \right\}.
 \end{aligned} \tag{1.25}$$

та

$$\begin{aligned}
 R^e(p, 0) = & \frac{p_1}{k_1^2} \operatorname{cth} \left\{ p_1 h_1 \right. \\
 & + \operatorname{Arcth} \left[\frac{p_2 \sigma_1}{p_1 \sigma_2} \operatorname{cth}(p_2 h_2 + \dots \right. \\
 & \left. \left. + \operatorname{Arcth} \left[\frac{p_{N-1} \sigma_{N-2}}{p_{N-2} \sigma_{N-1}} \operatorname{cth} \left(p_{N-1} h_{N-1} + \operatorname{Arcth} \frac{p_N \sigma_{N-1}}{p_{N-1} \sigma_N} \right) \right] \right] \dots \right\}.
 \end{aligned} \tag{1.26}$$

де N – число шарів, h – глибина кожного шару, $p = i(k^2 - v^2)^{1/2}$, $k = (\mp i \omega \mu_0 \sigma)^{1/2}$, k – хвильове число, v – просторова частота. За виконання умови частотного зондування (1.23) $v^2 \ll k^2$ та $p = ik$. Підставляючи $p = ik$ у вирази (1.25) та (1.26), можна легко переконатися, що $R^m = R^e$. Коли умова частотного зондування (1.23) не виконується, R^m та R^e , а отже, імпеданс та ρ_k розходяться: для магнітної моди модулі цих параметрів відхиляються вниз, для електричної

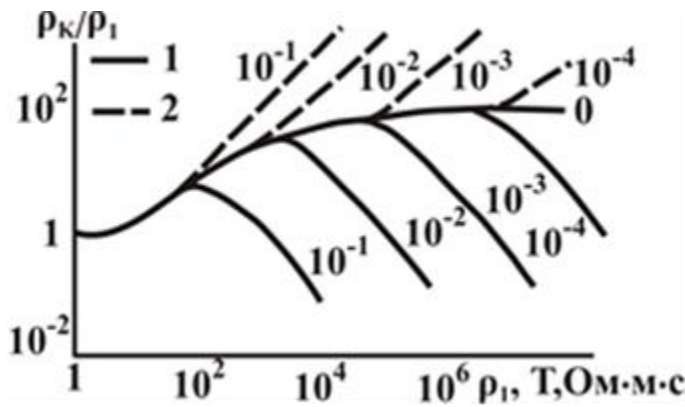


Рис. 1.1 Вплив просторової частоти ν (шифр кривих - ν в км^{-1}) поля джерела на уявний опір двохшарової пласкої структури

$\rho_1/\rho_2 = 100$ [Беленькая, 1972].

1. Джерело магнітного типу;
2. Джерело електричного типу.

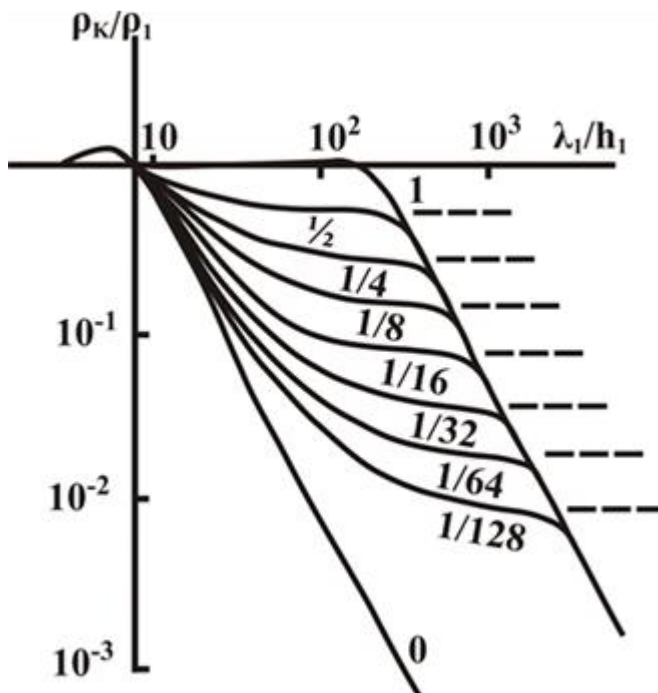


Рис. 1.2 Вплив сферичності Землі на уявний опір для першої сферичної гармоніки $n = 1$ над двохшаровою Землею: $h_1 = 128$ км,

ρ_2/ρ_1 – шифр кривих [Сочельников, 1969].

Штрихова лінія – пласка модель.

Асимптота, яка нахилена під кутом 63.6° - лінія n .

моди – вверх по відношенню до цих параметрів для вертикально падаючої пласкої хвилі (рис.1.1).

У сферичній системі координат подібне рекурентне співвідношення отримане для найбільш корисної при глобальному зондуванні першої сферичної гармоніки $n = 1$ [Сочельников 1969].

Коли умови частотного зондування не виконуються, на R^m , імпеданс та ρ_k впливає сферичність Землі (рис. 1.2).

При виконанні умови частотного зондування (1.23), R , імпеданс та ρ_k ведуть себе однаково для полів, які описуються сферичними та просторовими гармоніками, для електричної та магнітної мод і співпадають із відповідними величинами для вертикально падаючої пласкої хвилі. Це означає, що вказані інтерпретаційні параметри можуть бути нанесені на єдину частотну криву незалежно від структури поля джерела та їх можна інтерпретувати способами, які розроблено для вертикально падаючих пласких

хвиль. Такий спосіб є наближеним, тому, використовуючи його, необхідно пам'ятати, що наближеність виконання умови частотного зондування (1.23) може бути джерелом похибки. Ця похибка збільшується: а) при використанні полів локальних джерел – полів аврорального та екваторіального електроджетів (збільшується ν); б) при переході на високоомні геологічні структури (зменшується ефективне k); в) при підсиленні геомагнітної збуреності (збільшується ν).

Висновки до розділу 1

У даному розділі було відмічено, що дослідження глибинної електропровідності Землі та Місяця ґрунтуються на спостереженні та аналізі природних електромагнітних полів зовнішнього походження. Також основою дослідження електропровідності надр даних космічних об'єктів є аналіз задач теорії електромагнітних полів на спрощених ідеалізованих моделях типових земних та місячних структур.

Даний розділ представляє собою огляд класичного матеріалу: виходячи із рівнянь Максвелла отримані вирази полів та їх потенціалів через джерела у вигляді електричних та магнітних струмів; електричне та магнітне поля в горизонтально-шаруватій Землі представлені у вигляді сферичних (і плоских) гармонік; описано функції відгуку шарованої Землі на зовнішнє електромагнітне поле у вигляді сферичної (пласкої) гармоніки. У тому числі, було виведено формулу Стреттона-Чу, яку можна використовувати для розділення поля на внутрішню і зовнішню, нормальну та аномальну, поверхневу та глибинну частини, у тому числі і для аналітичного продовження полів.

Також встановлено умову частотного зондування, за виконання якої інтерпретаційні параметри не залежать від структури джерела та визначаються лише провідністю Землі чи Місяця. Таким чином, за цієї умови, імпеданс та позірний опір ρ_k можна інтерпретувати способами, які розроблено для вертикально падаючих плоских хвиль. Крім того, було зазначено, що наближене

виконання умови частотного зондування може бути джерелом похибок, а за її не виконання - імпеданс, буде спотворений, а ступінь спотворення залежить від провідності земної кори.

Перелік використаних джерел до розділу 1

1. Беленькая, Б.Н. (1972), Об импедансе слоистой среды для неоднородных поверхностных волн – *Изв. АН СССР, Физика Земли*, №2, с. 82–86
2. Бердичевский, М.Н, Ваньян, Л.Л., Файнберг, Э.Б. (1969), Частотное зондирование Земли по результатам сферического анализа электромагнитных вариаций – *Геомагнетизм и аэрономия*, **9**, с. 372-374
3. Рокитянский, И.И. (1981), *Индукционные зондирования Земли* - Киев: Наук. думка, 296 с.
4. Сочельников, В.В. (1969), Влияние сферичности Земли при определении удельного сопротивления глубоких слоев с использованием мировых магнитных бурь – *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*, №6, с. 66-77
5. Стрэттон, Дж. (1948), *Теория электромагнетизма*. М.; Л.: ОГИЗ - Гостоптехиздат. 539 с.
6. Eckhardt, D.H. (1968), Theory and interpretation of the electromagnetic impedance of the Earth – *J. Geophys. Res.*, 73, p.5317-5326.
7. Morse, P.M., Feshbach, H. (1953), *Methods of theoretical physics* – New York: McGraw-Hill. 1978 p.
8. Price, A.T. (1967), Electromagnetic induction within the Earth. – In: *Physics of Geomagnetic Phenomena*. New York; Acad. press, p. 235-295

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Геофізика твердої Землі – це розділ природознавства, який вивчає фізичні поля та властивості у твердих шарах планети. Геофізика є основним джерелом інформації про будову глибоких шарів Землі та процесів у них, причому важливо відмітити, що інформація отримується дистанційно, наслідком чого є невизначеність, неоднозначність її висновків та неможливість прямої перевірки цих висновків практикою. Визнання неоднозначності результатів геофізики та інших наук, які базуються на спостереженнях та експериментах, є важливим методологічним аспектом. Реальний об'єкт завжди невичерпний за своєю складністю, тому його точний опис неможливий ніяким кінцевомірним вектором. У будь-яку задану епоху об'єм геофізичної інформації скінченний, тобто дані спостережень можуть бути описані вектором із скінченною розмірністю. Параметризацію, тобто перехід від реального об'єкту до його кінцевомірних моделей, які задовольняють даним спостереження в рамках їх невизначеності, можна виконати нескінченним числом способів, тобто число можливих моделей нескінченне [Backus and Gilbert, 1967].

У методах глибинної геоелектрики, які використовують природні електромагнітні поля позаземного походження із неконтрольованою амплітудою та структурою, задача дослідження електропровідності всередині твердої Землі особливо складна. Тому її прийнято розділяти на дві частини, дві стадії: 1) Обробка, тобто перехід від вимірних магнітних та електричних полів до функцій відгуку $R(x, y, T)$ реальної Землі в районі вимірювань. 2) Інтерпретація – перехід від функцій відгуку до моделей електропровідності $\sigma(x, y, z)$ або $\sigma(r, \theta, \varphi)$, які відповідають даним вимірювань і враховують неоднозначність інтерпретації. Представлення множини конкретних моделей дуже громіздке і не гарантує, що дійсний розподіл електропровідності виявиться в цій множині. Тому доцільно відмовитись від пошуку однієї конкретної моделі електропровідності, а обмежитись пошуком і визначенням інваріантів, тобто таких параметрів, які

притаманні всім моделям, які задовольняють даним спостереження. Такі параметри в кожному методі свої.

Глибинні геоелектромагнітні дослідження, які використовують природні ЕМ поля, включають три основні методи: магнітоваріаційне зондування (МВЗ), магнітотеллуричне зондування (МТЗ) та магнітоваріаційне профілювання (МВП). Традиційна геоелектрика виходить із припущення, що спостережуване на поверхні Землі ЕМ-поле є магнітною модою, а електрична мода нехтовно мала. У цій дисертації аналізуються останні роботи з даного питанням і показано, що електрична мода не дорівнює нулю (див. Розділ 3).

2.1. Магнітоваріаційне зондування (МВЗ)

МВЗ є «найдавнішим» із розглянутих методів. У 1883 р. Лемб опублікував теорію електромагнітної індукції в провідній сфері, у 1889 р. Шустер розділив поле добових геомагнітних варіацій на частини зовнішнього (первинного поля) та внутрішнього (вторинного індукованого поля) походження і за їх співвідношенням визначив, що надра Землі є гарним провідником. У першій половині 20-го століття Чепмен, Прайс, Бенькова показали, що електропровідність збільшується із глибиною. У третій чверті 20-го століття прогрес МВЗ був пов'язаний, по-перше, із покращенням даних спостереження, починаючи із Міжнародного Геофізичного Року – МГР (1957-1958), по-друге, із представленням даних у вигляді імпедансу, що дозволило застосувати гарно розвинену теорію частотного зондування.

У широкому сенсі під функцією відгуку можна розуміти будь-який параметр, що визначається за спостережуваним на поверхні Землі електромагнітним полем та несе інформацію про розподіл електропровідності всередині Землі. Основна функція відгуку – це відношення вертикальної компоненти сферичної гармоніки порядку n до її горизонтальної компоненти

$$W^m = \frac{B_r}{B_\theta} = \frac{B_r}{B_\varphi} = \frac{n(n+1)}{r} \frac{F^m}{\frac{dF^m}{dr}}, \quad \left[W^m = \frac{B_z}{B_x} = \frac{B_z}{B_y} = v \frac{F^m}{\frac{dF^m}{dz}} \right] \quad (2.1)$$

Найбільш часто МВЗ виконується за першою гармонікою – однорідному полю $n = 1$, зокрема при зондуванні Місяця (див. у Розділі 5).

Результати МВЗ на Землі використовуються для визначення нормального розрізу верхньої мантії, причому нормальні розрізи виявились різними для океану та суші, для стабільних платформ та активних тектонічних регіонів (Ваньян, Шмукер, Семенов). Криві МВЗ використовуються для контролю, прив'язки та корекції кривих МТЗ, які спотворені локальними неоднорідностями.

2.2. Магнітоваріаційне профілювання (МВП)

Сутність методу полягає в спостереженні локальних аномалій у поведінці геомагнітних варіацій та їх інтерпретації в термінах аномального (відмінного від 1D нормального) розподілу електропровідності всередині Землі. Аномальну поведінку геомагнітних варіацій на суші було виявлено в Німеччині, Японії, Полярній Канаді ще в 1950-ті роки. Збурення аномальних полів пояснювали індукцією в локальному провіднику, індукція у вміщуючому середовищі не враховувалась. За такого підходу аномальні поля не можуть бути більшими за нормальні, що, однак, спостерігалось на деяких аномаліях. Шляхом розрахунків і моделювання було показано, що в реальному геологічному середовищі навіть відносно невеликою провідністю вміщуючих порід нехтувати не можна. В ньому планетарно-регіональним магнітосферно-іоносферним джерелом індукуються регіональні струми і 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 в більшості реальних геоелектричних ситуацій другорядна. На цій основі було побудовано теорію та методу кількісної інтерпретації даних МВП [Рокитянский, 1975] основні положення які можна сформулювати у вигляді наступних пунктів: 1. Аномальне поле геомагнітних варіацій є сума полів кондуктивного та індуктивного типів. Над локальними неоднорідностями практично завжди переважає поле кондуктивного типу. Воно пропорційне імпедансу нормального розрізу, функції,

яка описує ступінь заповнення тіла аномальними струмами, та загасанню у вміщуючому середовищі (останнім часто можна знехтувати). Три названі величини залежать від періоду варіацій, та їх добуток визначає частотну характеристику аномального поля. 2. Необхідний для інтерпретації МВП нормальний імпеданс визначається за сукупними даними глобального МВЗ та узагальненими даними МТЗ. 3. Амплітудна частотна характеристика аномального поля має завжди, принаймні, один максимум на періоді T_0 , фаза в околі T_0 змінює знак. 4. За відомих нормального імпедансу та загасанню у вміщуючому середовищі, частотна характеристика аномального поля над двомірним тілом визначається його інтегральною поздовжньою провідністю G . 5. Над витягнутими трьохмірними (3D) провідниками T_0 зміщується в бік коротких періодів при зменшенні довжини тіла. 6. За формою профільної кривої аномального поля практично можна визначити тільки максимально можливу глибину залягання провідного тіла. 7. Аномальні поля (та профільні графіки, і частотні амплітудно-фазові характеристики) (Рис.4.1) від поверхневих та тіл, що глибоко залягають, можуть бути практично однаковими, тому метод МВП не може визначити істинну глибину аномалії, для цього необхідні методи зондування – МТЗ та інші.

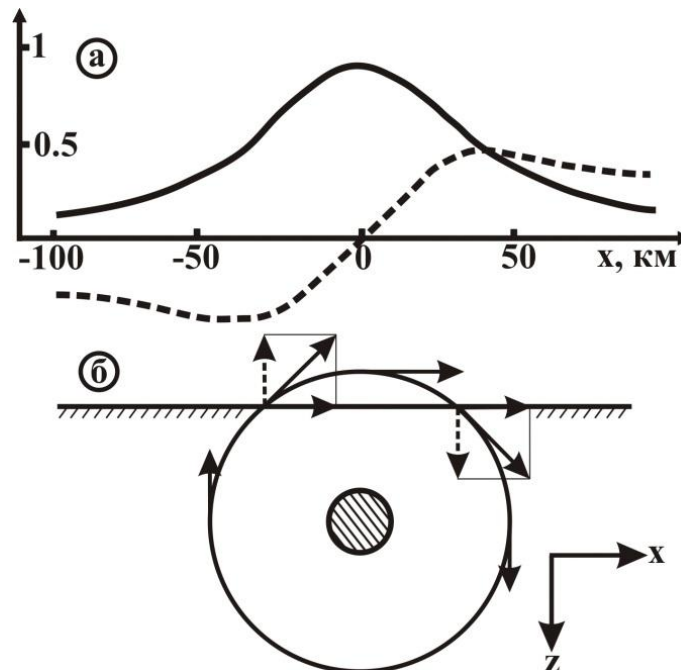


Рис. 2.1. Формування горизонтального (суцільна крива) та вертикального (пунктир) аномальних магнітних полів над двомірним провідником.

Аномальні поля геомагнітних варіацій спостерігаються в горизонтальних та вертикальних компонентах. Над двомірним тілом на Рис. 2.1 показано розклад аномального магнітного поля, яке напрямлене по колу на горизонтальну і вертикальну складові в різних пунктах профілю x .

У методі МВП використовуються дві основні функції відгуку (ФВ) - типпер (його наочне графічне представлення вектор індукції) та горизонтальний магнітний тензор.

Для двомірної аномалії із віссю однорідності уздовж вісі «у» справедлива формула Кертца, де горизонтальна H_x та вертикальна H_z складові аномального магнітного поля внутрішнього походження пов'язані співвідношеннями

$$H_{xa}(x_0) = -KH_{za}(x),$$

$$H_{za}(x_0) = KH_{xa}(x),$$

(2.2)

де

$$KH(x_0) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{H(x)}{x - x_0} dx.$$

яка дозволяє одну компоненту, яка виміряна уздовж профілю, перерахувати в іншу і, тим самим, перевірити правильність виділення аномального поля, а також наочно побачити переваги та недоліки кожного із двох методів обробки - точкового визначення векторів індукції та побудови горизонтального тензору за синхронними записами.

Вектор індукції має вигляд

$$\mathbf{C} = A\mathbf{e}_x + B\mathbf{e}_y. \quad (2.3)$$

де \mathbf{e}_x і \mathbf{e}_y – одиничні вектори, x – північний напрямок, y - східний. Компоненти A та B визначаються в точці спостереження із лінійного співвідношення між вертикальною компонентою магнітного поля та його горизонтальними компонентами:

$$B_z = A B_x + B B_y. \quad (2.4)$$

Параметр A пов'язаний із внеском надлишкового струму, який тече уздовж вісі y , а компонента B – уздовж вісі x .

Оскільки змінні поля описуються комплексними числами, то в рівнянні (2.4) усі величини комплексні та залежать від періоду T варіацій геомагнітного поля. Вектор індукції має відповідно реальну та уявну частини:

$$\begin{aligned} C_u &= A_u e_x + B_u e_y, \\ C_v &= A_v e_x + B_v e_y. \end{aligned} \quad (2.5)$$

де індексом “ u ” позначено реальну частину поля, індексом “ v ” – уявну. Реальні вектори індукції мають важливу властивість: вони напрямлені від області з підвищеною провідністю, до зони з пониженою провідністю.

Перевагою горизонтального магнітного тензору є локальність дослідження: аномальне поле в горизонтальній компоненті відображає наявність або відсутність аномальної електропровідності під пунктом спостереження, тоді як аномальне поле у вертикальній компоненті «зібрано» із значно більшої площі навколо точки спостереження.

Горизонтальний магнітний тензор визначається за формулою

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

яка витікає із лінійних співвідношень між горизонтальними компонентами магнітних полів у точці спостереження і в базисній (опорній) точці:

$$\begin{aligned} B_x(\mathbf{r}_1) &= M_{xx} B_x(\mathbf{r}_0) + M_{xy} B_y(\mathbf{r}_0), \\ B_y(\mathbf{r}_1) &= M_{yx} B_x(\mathbf{r}_0) + M_{yy} B_y(\mathbf{r}_0). \end{aligned} \quad (2.7)$$

де \mathbf{r}_0 та \mathbf{r}_1 – відповідають базисній та польовій точкам спостереження.

Найбільш чітко розуміння про будову середовища поблизу польової точки ми отримуємо у випадку, коли базисна точка розміщена в горизонтально-однорідній області, яка характеризується нормальним магнітним полем. В іншому випадку ефект неоднорідностей, які знаходяться поблизу базисної точки, передається всій області досліджень та накладається на ефекти неоднорідностей, які знаходяться в околі польових точок. Також, варто зауважити, що базова точка повинна бути

розміщена на доволі великій відстані від польової, щоб не відчувалася аномалія, але і достатньо малій, щоб не відчувалось зміни поля джерела.

У результаті обробки отримують профільні графіки аномального поля, за якими, із високою достовірністю, визначається факт існування аномалії, а також визначається положення її вісі (якщо аномалія витягнута) або епіцентру (якщо аномалія ізометрична). Профільні графіки дозволяють оцінити максимально можливу глибину та ширину аномалії, до глибини залягання аномально провідного тіла криві МВП мало чутливі. Частотні характеристики аномального поля визначаються сумарною повздожньою провідністю G витягнутого аномального тіла та нормальним імпедансом даного регіону, який визначений за даними МВЗ та МТЗ.

2.3. Магнітотеллуричне зондування (МТЗ)

Метод МТЗ був запропонований А.Н.Тихоновим [Тихонов,1950] та Л.Кан'яром [Gagniard, 1953]. В їх моделі розподіл електропровідності передбачається одномірним, тобто таким, що залежить лише від глибини (горизонтально-шарована модель), а джерело задавалося у вигляді вертикально падаючої пласкої хвилі (модель Т.-К.). У наступні роки було виконано обробку синхронних спостережень електричного та магнітного полів, які записані на обсерваторіях, та побудовано криві глибинного МТЗ, які дали, суттєво різні результати: глибина до гарно провідної основи верхньої мантії змінювалася від 50 до 2000 км. З'ясувалося, що криві МТЗ зміщені приповерхневими неоднорідностями, які надають сильний кондуктивний вплив на вимірюване електричне поле, але слабо впливають на магнітне. Виникла ідея [Рокитянский, 1971] прив'язки кривих МТЗ до більш стабільних даних МВЗ – ідея, яка отримала широке розповсюдження. Окрім локальних викривлень дані МТЗ схильні до регіональних викривлень: індукційному ефекту повздожніх 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 уникнути небезпеки такої

помилки. Більш складним для розпізнавання виявляється ефект екранування глибинних провідників перекриваючою їх шаруватою структурою із похилим заляганням пластів. Така ситуація зустрічається в південній частині Кіровоградської аномалії, вона буде описана у відповідному розділі. Тим не менш, метод МТЗ необхідний для визначення глибини залягання аномалій електропровідності та звісно для вивчення горизонтально-шаруваних структур.

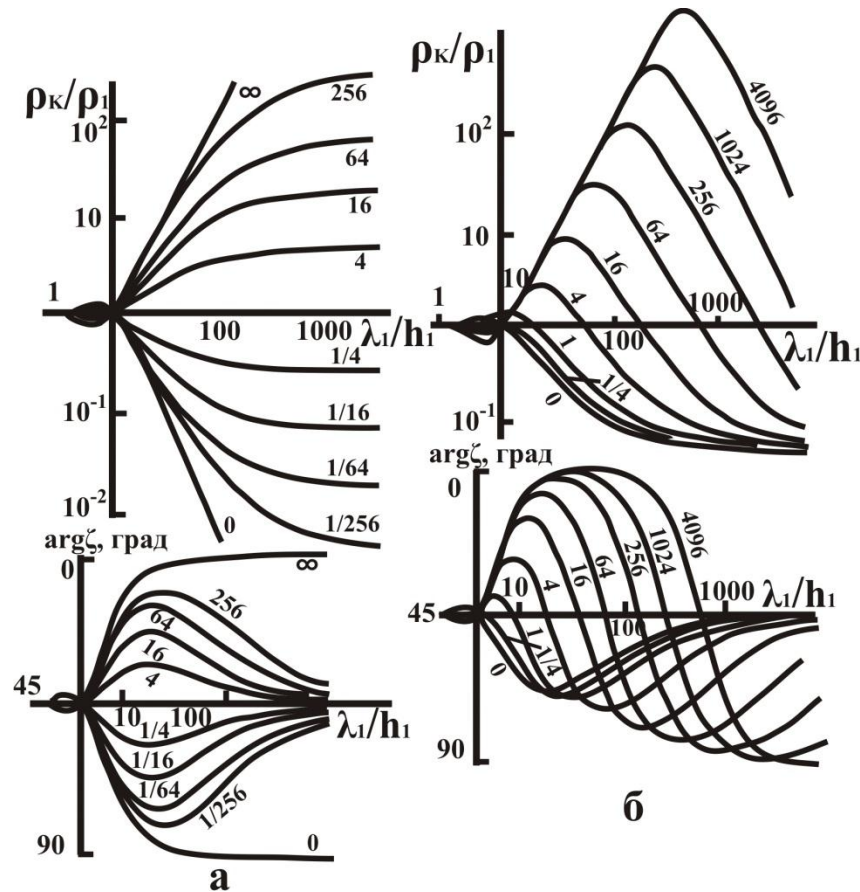


Рис.2.2 Криві МТЗ над горизонтально-шаруватим середовищем: а – над двохшаровими моделями із різноманітними ρ_2/ρ_1 (шифр кривих). б – над трьохшаровими моделями $\rho_2 \gg \rho_1, \rho_3$ $\rho_3/\rho_1 = 1/16$, h_2/h_1 (шифр кривих).[Рокитянский, 1981].

Основна функція відгуку МТЗ імпеданс

$$E_x = \zeta B_y, \quad E_y = \zeta B_x, \quad (2.8)$$

та уявний опір, який обчислюється із нього

$$\rho_k = \frac{\mu_0}{\omega} |\zeta|^2 = 0.2T |\zeta|^2. \quad (2.9)$$

Залежності уявного опору ρ_k та фази імпедансу $\arg \zeta$ від періоду утворюють так звані «криві МТЗ» - відповідно амплітудну та фазову. На Рис. 2.2 представлені приклади теоретичних кривих МТЗ деяких типових горизонтально-шаруватих моделей - двохшарового та типового для глибинних зондувань - трьохшарового розрізу.

Розглянемо характерні елементи амплітудних кривих МТЗ на Рис. 2.2. Зростаючі ділянки відповідають погано провідним шарам розрізу, причому положення асимптоти, яка нахилена під кутом $\arctg 2 \cong 63^\circ$ (лінії “S”) і проходить через зростаючу ділянку, дає сумарну поздовжню провідність S усіх шарів над погано провідним шаром, що зумовлює зростаючу ділянку.

Спадні ділянки кривих відповідають гарно провідним шарам розрізу, причому положення асимптоти, яка нахилена під кутом $-\arctg 2 \cong -63^\circ$ (лінія “h”) і така що проходить через спадну ділянку дає глибину до верхньої кромки провідного шару. На двохшарових моделях із ідеально ізолюючим та ідеально провідними основами лінії “S” та “h” співпадають з довгоперіодними асимптотами кривих $\rho_k(\sqrt{T})$ та визначають значення S та h першого шару (рис. 2.2).

Не кожен шар відображається на кривій МТЗ зростаючою або спадною ділянкою або іншою характерною зміною. Практично погано провідний шар виділяється тоді, коли його потужність зіставна за порядком величини із потужністю всіх вище лежачих шарів або більше неї. Гарно провідний шар виділяється тоді, коли його сумарна поздовжня провідність S зіставна за порядком величин із S всіх вище лежачих шарів або більше неї.

Окрім двох названих елементів на багатьох кривих МТЗ відмічаються проміжні екстремуми або характерні перегини, які несуть інформацію про астеносферу або про провідні шари в літосфері. Ці об’єкти найбільш цікаві для глибинної геоелектрики.

Практично геоелектрична структура зазвичай містить неоднорідності або анізотропію електропровідності, тоді імпеданс має вигляд тензора, який визначається із системи рівнянь

$$\begin{aligned}
 E_x &= \zeta_{xx}B_x + \zeta_{xy}B_y; \\
 E_y &= \zeta_{yx}B_x + \zeta_{yy}B_y.
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

2.4. Етапи геоелектричного дослідження

Вимірюваними величинами є компоненти природних електричного та магнітного полів, які представляються у вигляді дискретних часових рядів, що містять багатий набір варіацій із різноманітними періодами (різною частотою). Щоб виключити із подальшого розгляду змінні параметри джерел ЕМ поля, виконується обробка часових рядів із ціллю отримання функцій відгуку (ФВ або RF-response functions). ФВ залежать від частоти або періоду (або часу при переході до геоелектрики імпульсних перехідних характеристик = transient geoelectrics). Як було написано вище основними ФВ є тензор імпедансу (МТЗ), магнітне співвідношення вертикальної компоненти до горизонтальної для виділеної просторової гармоніки (МВЗ), вектор індукції та магнітний тензор (МВП). Кожна ФВ вводиться в рамках деякої ідеалізованої моделі поля і будови Землі. Наприклад, імпеданс відповідає моделі Тихонова-Кан'яра (пласка хвиля) або є спектральним, тобто визначається за однією просторовою гармонікою поля. Практично ці умови ніколи точно не виконуються, тому імпеданс та інші функції відгуку завжди визначаються із деякою похибкою. Оскільки відхилення реального джерела від ідеалізованої моделі часто носять не випадковий, а систематичний характер, оцінка ФВ у більшості випадків буде зміщена, що не відображається в статистичних оцінках похибок, які визначаються при обробці [Рокитянский, 2012].

Допустимо, функції відгуку кількісно визначені із оптимальною невизначеністю в точці, або на профілі, або на площі і можна перейти до кінцевої цілі дослідження – побудови геоелектричної моделі, тобто до знаходження розподілу електропровідності надр Землі в районі виконаних спостережень. У математичній постановці це називають розв'язанням оберненої задачі або інверсією. Як відомо, обернена задача завжди некоректна (Backus and Gilbert,

1967) і кількість моделей, які задовольняють отриманим даним, завжди нескінченна. Оскільки точний єдиний розв'язок отримати неможливо, зазвичай шукають «гладкі» моделі, в яких параметри ФВ вводяться із похибкою їх обчислення. Інверсія може давати доволі дивні результати. Прикладами надійно визначених параметрів при 1D зондуванні є сумарна повздовжня провідність S гарно провідного шару і глибина його верхнього краю h , при 2D МВП – надлишкова сумарна повздовжня провідність G аномального провідника та максимальна оцінка його глибини та ширини. При цьому сама питома провідність визначається в широких межах неоднозначно навіть у вибраному класі моделей і неоднозначність збільшується при переході до більш складних моделей.

Щоб зробити можливим розв'язання оберненої задачі, необхідно виконати параметризацію розрізу, тобто перейти від нескінченномірному вектору $\sigma(x,y,z)$ до скінченномірному $\sigma = (x_1, x_2, \dots, x_N)$. Параметризація не формалізується, а обирається дослідником на основі його досвіду, інтуїції та апіорних даних і може бути обрана нескінченим числом способів. Далі вступають у дію гарно розвинені і формалізовані методи інверсії, які можуть в автоматичному режимі знайти оптимальний розв'язок, який найкращим чином відповідає даним спостереження, можливе застосування методу регуляризації, який може змістити отриманий розв'язок завдяки врахуванню апіорних даних. Всі ці розв'язки знаходяться в рамках обраної параметризації, за межами якої може залишитись нескінченна множина розв'язків, які задовольняють даним спостереження, в тому числі найкраще наближення до істинного $\sigma(x,y,z)$. Тому знаходження єдиного розв'язку не може бути кінцевою ціллю фундаментальної науки.

На закінчення можна розглянути загальноприйнятту в геоелектриці послідовність дій при проведенні досліджень. Етап планування робіт (постановка задач, геологічна та геофізична вивченість, вибір методики спостережень...) розглядати не будемо.

- У результаті спостережень отримані дискретні (інтервал опитування Δt) часові ряди компонент електромагнітного поля в пунктах, які зазвичай розміщені

на деякому профілі або площині. Ці записи називають первинними вхідними даними ПД (rough data).

- Обробка ПД→ФВ має за ціль звільнитись від усього, що пов'язано із властивостями джерела поля у ПД, і отримати функції відгуку ФВ, які залежать тільки від шуканих властивостей Землі, причому у вигляді, зручному для визначення цих властивостей $\{\sigma(x, y, z)\}$. Обробка – задача далеко не тривіальна, вона неминуче включає модельні представлення, як про джерело поля, так і про середовище, що вивчається, і від адекватності обраних моделей залежить дуже багато що. Для локальних та помірно регіональних досліджень широко використовується модель Тихонова-Кан'яра (Т-К) із джерелом у вигляді пласкої вертикально падаючої ЕМ хвилі.

Часові ряди, як правило, зашумлені різними завадами та накладаннями джерела, які не задовольняють умові частотного зондування за якого тільки і застосовна модель Т-К. Сучасна обробка включає багатовіконний аналіз різноманітних ділянок запису із врахуванням коефіцієнтів когерентності між компонентами, у результаті отримуємо чисельні значення компонент тензору ФВ із статистичною оцінкою невизначеності результату і все це на деякій послідовності періодів (частот) для пунктів спостереження, допустимо на деякому профілі. Деякі завади або особливості джерела можуть бути не розпізнані існуючими методами аналізу і зробити внесок у систематичну похибку [Рокитянский, 2012].

Отриманий масив чисел утворює ФВ на даній ділянці земної поверхні і необхідно отримати із нього достовірні свідчення про розподіл провідності земних надр у регіоні. Загальноприйнятий метод – двомірна (2D) інверсія функцій відгуку, які отримано уздовж профілю з прийняттям напрямку профілю в якості поперечної поляризації. У багатьох випадках таке припущення цілковито не відповідає реальній структурі. Лише за деяких умов інверсія буде успішною, коли реальна структура квазидвомірна і профіль приблизно перпендикулярний до неї, що повинно бути виявлено за узгодженістю результатів інверсії за усіма

компонентами ФВ. В іншому випадку інверсія відводить убік від підмножини моделей реального середовища, сумісних з цими спостереженнями.

Висновки до розділу 2

Зважаючи на складність геоелектричної будови Землі, спостережуваного електромагнітного поля та багатозначність оберненої задачі, а також виходячи із фізико-математичного аналізу можливостей різноманітних модифікацій геоелектрики, у цій роботі пріоритет надається даним МВП (у комплексі з відомими даними МВЗ та МТЗ), які достовірно визначають існування та місцезнаходження аномалії, а також деякі її параметри. Метод МТЗ націлений на визначення глибини аномалії, та на дослідження безаномальних горизонтально-шарованих структур.

Перелік використаних джерел до розділу 2

1. Бердичевский, М.Н., Дмитриев, В.И. (2009), *Модели и методы магнитотеллурики*. – М.: Научный мир. – С. 680.
2. Рокитянский, И.И. (1971), *Глубинные магнитотеллурические зондирования при наличии искажений от горизонтальных неоднородностей*, Геофиз. сб. / АН УССР, 43, с.71-77
3. Рокитянский, И.И. (1975), *Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования* – Киев: Наукова думка, 279 с.
4. Рокитянский, И.И. (2012), Заметки о геоэлектрике // *Геофизический журнал*, № 4, Т. 34, с. 235-244
5. Тихонов, А.Н. (1950), Об определении электрических характеристик глубоких слоев земной коры // *Докл. АН СССР*, **73**, С. 295—297.
6. Backus, G.E., Gilbert, J.F. (1967), Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems – *Geophys. J. Roy Astron. Soc.*, **13**, p.247-276
7. Cagniard, L. (1953), Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting // *Geophysics.*, **18.**, P. 605—635.

РОЗДІЛ 3

ДЖЕРЕЛА ПРИРОДНОГО ЗМІННОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Дослідження глибинної електропровідності Землі та Місяця виконуються шляхом вимірювання та аналізу природних електромагнітних (ЕМ) полів, які збурюються сонячним вітром – потоком заряджених частинок, що летять від Сонця із середньою швидкістю $V = 400$ км/с, і такими, що несуть «вморожені» магнітні поля порядку $B_e \approx 5$ нТл і при зіткненні із Землею/Місяцем вносять електричне поле

$$\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e \approx 2 \text{ мВ/м.} \quad (3.1)$$

Наведені величини залежать від активності Сонця і в інтервали його підвищеної активності можуть збільшуватись у декілька разів.

3.1. Магнітосфера Землі та струми в ній

Завдяки наявності постійного квазі-дипольного геомагнітного поля величиною до 60000 нТл на поверхні, Земля має магнітосферу, тобто область простору навколо небесного тіла, в якому поведінка міжпланетної плазми визначається магнітним полем цього тіла. Дипольне поле Землі на відстані порядку 10 земних радіусів зменшуються до (постійно змінних) значень, які властиві сонячному вітру, та взаємодіє з ним. Діаметр магнітосфери на цій відстані перевищує 10^5 км і до нього додається електричне поле, що визначається рівнянням (3.1). Інтегрування \mathbf{E} по діаметру магнітосфери дає різницю потенціалів $\Delta U = 200$ кВ \pm пів порядку величини, за рахунок різних напрямків \mathbf{B}_e і активності Сонця. Ця різниця потенціалів збурює складну систему магнітосферно-іоносферних струмів, складну завдяки анізотропії провідності атмосферних шарів (Рис. 3.1). На висотах більше 300 км провідність уздовж силових ліній геомагнітного поля на порядки більше провідності перпендикулярної до магнітного поля і поздовжні струми із малими втратами

переносять ΔU на іоносферу, яка розташована на висотах 60-300 км. Із збільшенням концентрації частинок в іоносфері збільшується частота їх зіткнень, і з'являються специфічні провідності Педерсона та Холла. Електропровідність іоносфери анізотропна, і величина її горизонтальних компонент, проінтегрованих по всій висоті іоносфери, змінюється від одиниць (вночі) до тисяч Сіменсів у залежності від напрямку, місця, часу доби, сонячно-геомагнітної активності, а також у залежності від впливів знизу, від процесів у літосфері та тропосфері Землі [Рокитянский, 1981, глава 1; Chave and Jones, 2012, Chapter 3B; Алексеев и Калегаев та багато інших]

Далі силові лінії проходять через стратосферу і тропосферу в 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 ланцюгу меншого опору, який включає полярну іоносферу (Рис. 3.1-г, д, е), потім більш внутрішні силові лінії геомагнітного поля, що виводять в частково кільцевий радіаційний шар на відстані 3-5 радіусів від поверхні Землі (Рис.3.1-в, г, е) і далі за подібним шляхом до протилежної границі магнітосфери (Рис. 3.1-е). Ці струми прийнято розглядати як тороїдальну структуру, яка збудує полоїдальне магнітне поле із $B_r \neq 0$.

Отже, в сучасній геоелектриці повітря приземної атмосфери розглядається як ізолятор, вертикальні струми на поверхні Землі і відповідно електрична мода дорівнюють нулю і в повітрі магнітне поле виражається через скалярний потенціал. Однак аналіз Sq-варіацій за світовою мережею станцій показує [Бенькова, 1941; Аксенов, 1997], що електрична мода присутня і має величину, що зіставна із магнітною модою.

Відповідно до теорії Максвелла можна стверджувати, що якщо електрична мода виділена, то повинен бути відповідний їй вертикальний струм провідності через атмосферу і атмосфера повинна мати електропровідність достатню для протікання цього струму. Вивчення цього питання в останні роки поєднується терміном Глобальне електричне коло (ГЕК).

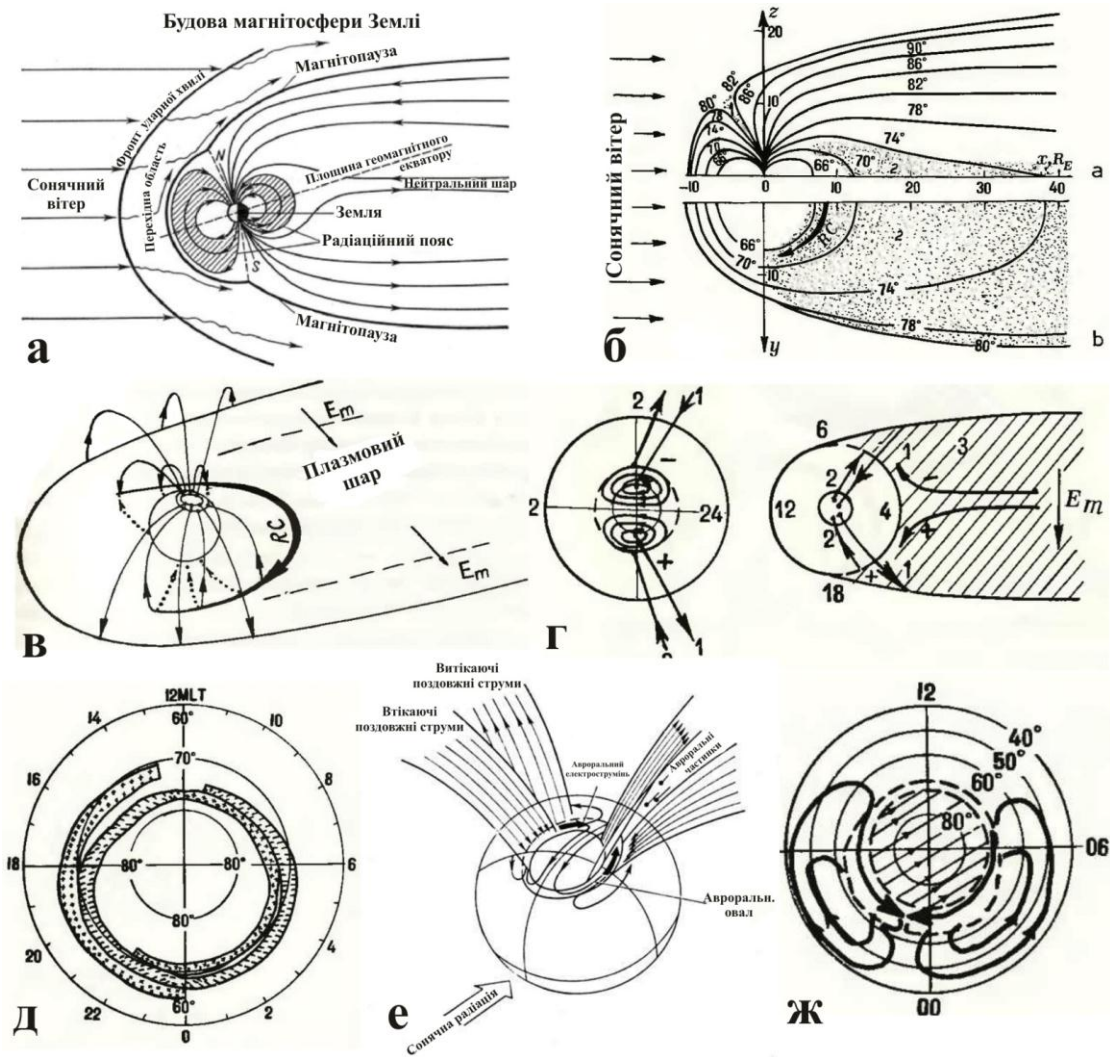


Рис. 3.1. Магнітне поле в магнітосфері Землі і струми в ній. а) Переріз магнітосфери площиною полуденного меридіану (ПМППМ). б) ПМППМ - верхній рисунок і переріз площиною геомагнітного екватору – нижній рисунок. Цифри поблизу ліній геомагнітного поля позначають геомагнітні широти, на яких ці лінії перетинають іоносферу і поверхню Землі. в) Об'ємна картина поздовжніх магнітосферних струмів із границі магнітосфери до іоносфери і далі до радіаційного поясу на відстані 3-5 земних радіусів. г) Тривимірні поздовжні струми стаціонарної магнітосферної конвекції в проекції на екваторіальну площину та іоносферу (правий рисунок) і на полярну іоносферу (лівий рисунок г та рисунки д, е, ж). 1 – силові лінії від магнітопаузи до внутрішнього (високоширотного) кільця зони полярних сьйв, 2 – силові лінії від поляризованих ділянок плазмового шару 4 (частково кільцевого шару RC (ring current) на рис. б та в) до зовнішнього кільця зони полярних сьйв, 3 – плазмовий шар. д) Зони втікень (плюси) та витікань (мінуси) поздовжніх струмів в/із іоносфери за даними супутника «Триад». е) Системи поздовжніх струмів і полярних електроструменів. ж) Система струмів полярної суббури із струмами розтікання в середні широти. [Рокитянський, Терешин, 2020]

ГЕК розміщене між твердою/рідкою земною поверхнею та іоносферою, тобто між двома провідниками, які розділені погано провідними в середньому нейтральними шарами тропосфери і стратосфери. Безпосередні зміни показують, що біля поверхні Землі вертикальна компонента електричного поля E_z за ясної погоди має величину близько 100 В/м і спрямована вниз, тобто Земля заряджена від'ємно. Із висотою E_z швидко зменшується: на висоті 2 км у 2 рази, на висоті 13 км в 20 разів. Зумовлено це відповідним зменшенням питомого опору ρ повітря, максимального на рівні моря $\rho \approx 10^{14}$ Ом·м. Звідси узагальнена оцінка щільності вертикального струму в атмосфері $j_z = E_z/\rho \approx 2 \cdot 10^{-12}$ А/м². При інтегруванні по всій земній поверхні отримуємо сумарний струм близько 1000 А. Верхній позитивний заряд розподілений в 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, що утворений позитивно зарядженою електросферою та від'ємно зарядженою Землею, отримуємо $R \approx 1000$ Ом, $C \approx 0,1$ Ф, що дає сталу часу саморозряду глобального конденсатора із вибитком близько 100 с. Це електростатична оцінка.

Підтримка заряду електросфери здійснюється сторонніми силами, які реалізуються в грозових хмарах [Имянитов, Колоколов, 1976]. Грозові хмари виникають у тропосфері, яка містить холодне повітря у верхніх шарах і тепле вологе – у нижніх шарах (континент, літо, опівдні). Підчас підйому теплого повітря волога конденсується в крапельки води і частинки льоду, відбувається поділ зарядів: верхня частина хмари в більшості випадків заряджається позитивно, нижня – негативно. За даними прямих вимірювань 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.

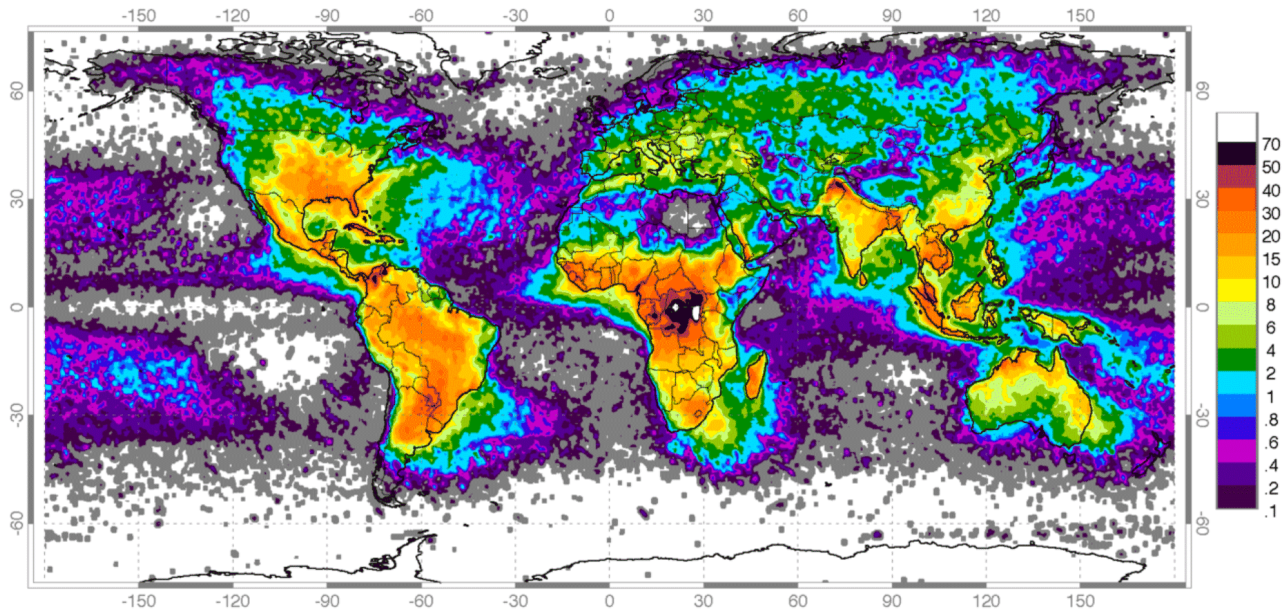


Рис.3.2. Розподіл спалахів блискавок на поверхні земної кулі за результатами спостережень із супутників OTD і LIS [Christian et al., 2003]. На кольоровій шкалі відкладено кількість спалахів на 1 кв. км земної поверхні за 1 рік.

Просторово-часовий розподіл блискавок на Землі доволі неоднорідний. На високих широтах, над океанами і пустелями блискавки рідко спостерігаються. Вони максимальні в тропічних країнах із вологим спекотним кліматом. Центральна Африка, Південно-східна Азія з Індонезією і обидві Америки – три головні центри грозової активності (Рис. 3.2). Переважання материків в північній півкулі призводить до глобального максимуму блискавок у липні-серпні і річній зміні заряду електросфери. Переважання гроз у Африці в порівнянні з іншими довготами призводить до добової варіації грозової активності в 13-14 годин UT і до унітарної варіації заряду і потенціалу електросфери. На регулярні добові і річні варіації накладається безліч нерегулярних варіацій від різних впливів зі сторони як зовнішніх, так і внутрішніх геосфер.

На рис. 3.3 показано як виверження вулкану на півдні Ісландії в квітні 2010 р. викинуло на висоти 5-15 км значну кількість попелу, на декілька тижнів призупинивши польоти літаків у північній половині Європи. На зменшення провідності повітря на вказаних висотах іоносфера відповіла позитивною

аномалією ТЕС, причому просторово-часовий аналіз розвитку і затухання цієї події може дати цікаву інформацію про параметри іоносфери і динаміку їх зміни.

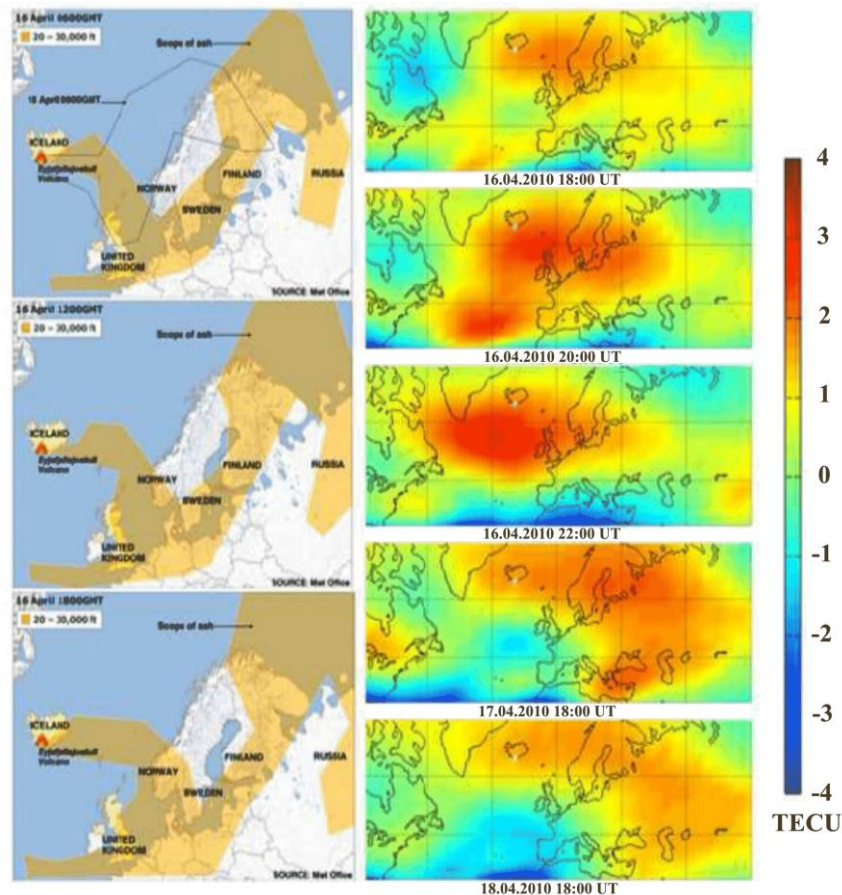


Рис.3.3. Три карти зліва описують послідовне положення хмари попелу на висоті 5-15 км, який був вивержений вулканом Е'яфьятлайокудль на півдні Ісландії. Справа в ці ж дні п'ять послідовних карт Євро-Атлантичного регіону показують позитивну аномалію диференційного ТЕС - повного електронного складу (Total Electron Content) іоносфери [Pulinets, Davidenko, 2014].

На Рис. 3.4. представлено відгук іоносфери на піщано-пилову бурю в пустелі Сахара на початку травня 2012 р. Хмара пилу розміщувалася на висоті 1,5-4 км (нижче ісландського попелу), і тому сильніше, ніж у попередньому прикладі, послаблювало вертикальний струм розрядки іоносфери. Багато конкретних прикладів, що пов'язані із процесами підготовки землетрусів, наведено в роботі [Pulinets & Davidenhko, 2019]. Результати глобальних супутникових спостережень параметрів іоносфери представлено в роботі [Olsen & Stolle, 2017] та посиланнях у ній.

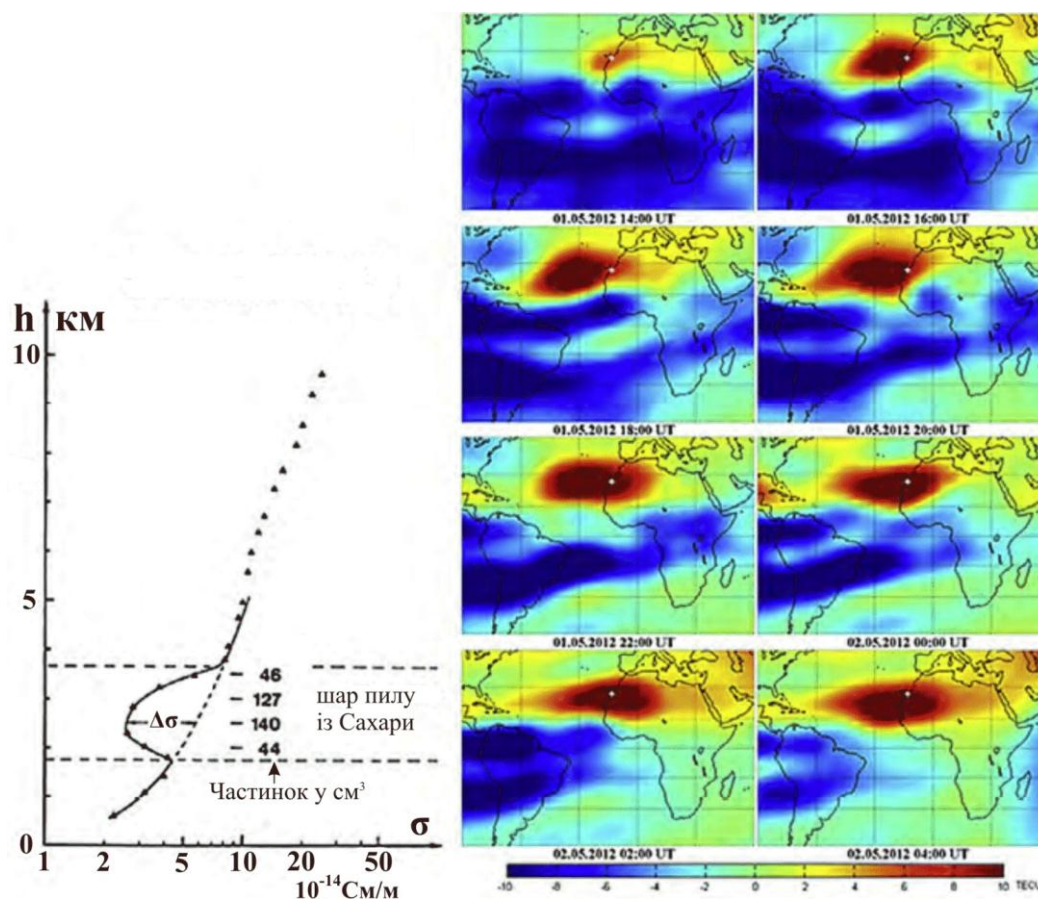


Рис.3.4. Варіація електропровідності повітря із висотою під час пилової бурі (трикутники і суцільна крива) за даними вимірів із балону, який був запущений на західному узбережжі Африки (біла точка на картах справа) (а), 8 послідовних диференційних карт ТЕС іоносфери під час сильної піщано-пилової бурі в Сахарі [Pulinets, Davidenko, 2014] (б).

Таким чином, ми бачимо, що іоносфера дуже неоднорідна, динамічна, схильна до сильних впливів як зверху (від різниці потенціалів 100-500 кВ, що вноситься сонячним вітром, і фокусується через касп на полярну іоносферу), так і знизу (від неоднорідно розподіленого грозового генератору, який безперервно підзаряджає нижню частину іоносфери до потенціалу $+250 \pm 100$ кВ відносно поверхні Землі). Локальні «пробої» нижньої атмосфери вертикальними струмами провідності безсумнівно існують, особливо в зоні полярних сьйв (силовий вплив зверху) і в зонах грозової активності (ініціація знизу). Таким чином, електрична мода на сферичній Землі не дорівнює нулю, вона присутня. Виникає проблема, як її виділити із повного спостережуваного поля. У літературі розповсюджено

думку, що експерименти дирекційного аналізу [Четаев, 1985] по реєстрації похилого і горизонтального розповсюдження ЕМ полів можна трактувати як підтвердження двомодальності. Автор вважає, що в дирекційному аналізі показано тільки те, що модель вертикально падаючої ЕМ хвилі, яка лежить у основі магнітотеллурики, у природі в багатьох випадках не виконується, а задача розділення мод у дирекційному аналізі відсутня. Звісно ж, виконати необхідне розділення полів може аналіз варіацій за мережею геомагнітних обсерваторій.

3.2. Морфологія електромагнітного поля Землі

При використанні природного електромагнітного поля для індукційних досліджень електропровідності земної кори і верхньої мантії важливо знати: а) амплітудний спектр поля і його зміни на протязі доби і року; б) просторову структуру первинного поля; в) вплив структури джерела поля на імпеданс, що вимірюється на поверхні Землі.

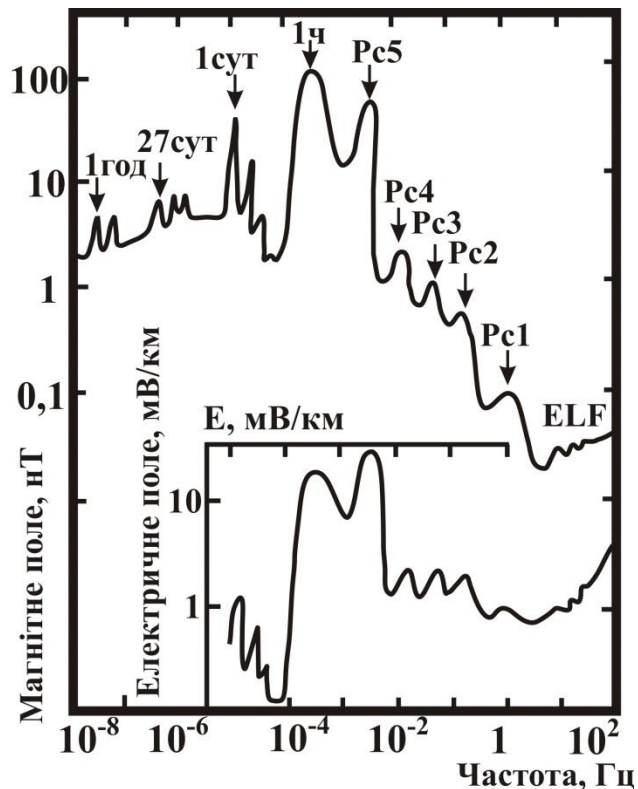


Рис.3.5. Типові амплітуди варіацій горизонтальної компоненти геомагнітного поля в середніх широтах (верхня крива) і відповідні їм амплітуди поля Е теллуричних струмів, що обчислені для моделі однорідної Землі із опором 20 Ом·м [Рокитянский, 1981].

Природні змінні електромагнітні поля, що використовуються для вивчення електропровідності земної кори і мантії, можна розділити на наступні основні класи:

- 1) Добові варіації ($T = 0,2 \div 1$ доби);
- 2) Збурення, у тому числі магнітні бурі та їх низькочастотні складові (T знаходиться в межах від частин години до 11 років);
- 3) Пульсації ($T = 0,2 \div 1000$ с);
- 4) Атмосферики (ELF) із $T = 0,2 \div 10^{-5}$ с.

Схематизований амплітудний спектр геомагнітних варіацій представлений на Рис. 3.5.

3.2.1.Добові варіації

У магнітоспокійні інтервали геомагнітне поле відчуває регулярні зміни із періодом, що дорівнює сонячній добі (Sq-варіації), і амплітудою в декілька десятків нанотесл. Еквівалентна іоносферна струмова система, що описує спостережувані на Землі Sq-варіації, складається із двох протилежно спрямованих вихрів у північній та південній півкулях із фокусами, що лежать на перетині полуденного меридіану із паралелями $\pm 30^\circ$ геомагнітної широти, повний струм кожного вихру складає $(1 \div 3) \cdot 10^5$ А. Варіації Sq мають чіткий сезонний хід: літом амплітуди приблизно удвічі більші, ніж взимку. У полярних областях (геомагнітна широта більше 60°) добові варіації мають іншу часову і просторову структури і позначаються S_q^p , їх амплітуда складає 100-400 нТл. Добові варіації схильні до безперервних досить значних змін день від дня, особливо сильним у високих широтах. Найбільші зміни добових варіацій спостерігаються в магнітозбурені періоди, коли структура поля S_q^p ефективно проникає в середні широти і переважає там. Тому в збурені періоди прийнято виділяти збурену варіацію S_D як різницю спостережуваної варіації і середньомісячного значення Sq. При розкладі добової варіації в ряд Фур'є головні члени – добова і напівдобова хвилі, третя і четверта гармоніки – у декілька разів менші ніж перші два члени за

амплітудою, але вираховуються доволі стабільно і використовуються нарівні із першими гармоніками при індукційних дослідженнях.

Добова варіація із періодом, що дорівнює місячній добі (L-варіація), має амплітуду на 1-1,5 порядки меншу, ніж амплітуда Sq-варіації. У результаті тривалого осереднення надійно виділяється напівдобова хвиля, амплітуда якої значно більша ніж в інших гармонік і складає ~ 1 нТл із максимумом влітку. У вузькій смузі біля магнітного екватору H-компонента Sq- та L-варіації збільшуються приблизно в два рази, а Z-компонента змінює знак і має різнополярні екстремуми амплітуди південніше і північніше екватору. Причиною аномалії є екваторіальний струм (електроджет), що тече в іоносфері [Рокитянский, 1981].

3.2.2. Збурення

Магнітні бурі поділяються на світові та полярні. Полярні бурі мають тривалість 2-5 годин і спостерігаються в середньому один – три рази на добу. За просторовою структурою полярні бурі складаються із двох компонент – DP1 і DP2. DP1 – це збурення, що пов'язане із інтенсифікацією полярного електроджету. У середніх і низьких широтах DP1 має форму бухти і зазвичай називається бухтоподібною варіацією. DP2 – збурення, що спостерігається в глобальному масштабі від полюсу до полюсу – із підсиленням на денній стороні в районі екватору. DP2 добре – корелює при запізнюванні на 10-15 хвилин із змінами південної компоненти магнітного поля сонячного вітру.

Світова буря утворюється при накладенні декількох інтенсивних полярних бур, однак вона має якісну різницю від останніх. Вона полягає в повільній глобальній зміні геомагнітного поля, яке називається варіацією шторм-тайм – Dst, тобто варіацією, відлічуваною від моменту початку бурі. Просторова структура Dst близька до однорідного поля і зумовлена частково кільцевим струмом, який тече в магнітосфері на відстані декількох земних радіусів – R_E . Наземне поле Dst асиметричне із максимумом у вечірні – близькі до опівночі години (18-22^h LT) і з мінімумом у ранкові – близькі до опівдня години.

Оскільки геомагнітна активність має сезонний хід (максимуми в періоди рівнодення), 27-денну і 11-річну повторюваність, повинні спостерігатись зміни геомагнітного поля із вказаними періодами. Амплітуди цих варіацій незначні, але в результаті ретельної статистичної обробки довгих рядів спостережень ці варіації виділені та використовуються для індукційного зондування Землі.

Окрім геомагнітних варіацій зовнішнього походження спостерігаються варіації, які пов'язані із конвективними рухами в ядрі Землі. Вони називаються віковими варіаціями і охоплюють періоди від багатьох століть приблизно до року. За їх спектром можна оцінити середню електропровідність нижньої мантії.

3.2.3. Пульсації.

Пульсації поділяються на дві великі групи: із стійким режимом коливань – pulsation continuous – Pc і з нестійким режимом – pulsation irregular – Pi. Всередині кожної групи пульсації розділяються за періодами. Стійкі пульсації Pc3-Pc4 з'являються в денні години майже щоденно і широко використовуються в дослідженнях магнітотеллуричними методами в діапазоні коротких періодів. Ці коливання найбільш інтенсивні в літні місяці, особливо в деякі інтервали бур і після них. Інший важливий для магнітотеллуричних методів тип – Pi2. Ці пульсації спостерігаються майже щодобово по декілька цугів у нічні години, зазвичай одночасно із збуреннями DP. Найбільш повний набір пульсацій спостерігається під час геомагнітної бурі.

Магнітні бурі навіть в середніх широтах мають багатий спектр коливань, що дозволяє швидко отримати частотну криву зондування і профілювання. Однак поле варіацій під час бурі характеризується більшою просторовою неоднорідністю, що збільшує похибку при використанні цих варіацій.

Висновки до розділу 3

У найбільш погано провідних сферичних оболонках Землі (тропосфера та особливо її нижній шар приземної атмосфери) електропровідність невелика, але,

все ж таки, не дорівнює нулю, тому вертикальні струми існують і електрична мода не дорівнює нулю і може бути виміряною.

Доказом цього є проведений в останні роки супутниковими системами моніторинг параметрів іоносфери, який 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 із горизонтальним магнітним полем.

Слід зазначити, що вертикальні струми на Землі розподілені неоднорідно. Їх максимальні величини слід очікувати в зонах полярних сяїв та при вторгненні інтенсивних космічних променів (зовнішнього впливу), а також у зонах максимальної грозової активності та зонах підвищеного виходу газів із надр Землі (внутрішній вплив). Всі ці фактори характеризуються просторово-часовою варіабельністю, включаючи наявність добового ходу.

Важливо підкреслити, що глибинні дослідження електропровідності базуються на теоретичній моделі магнітної моди, існування електричної моди заперечується, а фактично вона потрапляє в нерозпізнані завади, які в результаті використання сучасних методів обробки в значній мірі відсіюються і моделі електропровідності більш-менш правильно відображають реальну геоелектричну будову Землі, однак із можливими систематичними похибками. Врахування геосфер, зокрема врахування електричної моди, може підсилити геоелектромагнітні дослідження, за рахунок підвищення достовірності геоелектричних моделей.

Перелік використаних джерел до розділу 3

1. Аксенов, В.В. (1997), *Тороидальное поле в атмосфере Земли*. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 133 с.
2. Алексеев, И.И., Калегаев, В.В. “Магнитосфера Земли и магнитосферы планет-гигантов” [“Magnitosfera Zemli i magnitosfery planet-gigantov”], доступно на: <http://textarchive.ru/c-2624473-pall>

3. Бенькова, Н.П. (1941), *Спокойные солнечно-суточные вариации земного магнетизма* – М.; Л. - 75 с.
4. Имянитов, И.М., Колоколов, В.П. (1976), Проблема происхождения электрического поля атмосферы и современные представления об атмосферном электричестве – В кн.: *Атмосферное электричество*: Л.: Гидрометиздат, с. 5-22
5. Рокитянский, И.И, Терешин, А.В. (2020), Особенности исследования глубинной электропроводности Луны и Земли, *Геофизический журнал*, **42**, №2, с. 53-70
6. Четаев, Д.Н. (1985), *Дирекционный анализ магнитотеллурических наблюдений*. Москва: ИФЗ АН СССР, 203 с.
7. Chave, A.D., Jones, A.G. (2012), *The Magnetotelluric Method, Theory and Practice*. New York: Cambridge University Press. 552 p.
8. Christian, H.J., Blakeslee, R.J., Boccippio, D.J., Boeck, W.L., Buechler, D., Driscoll, K.T., Goodman, S.J., Hall, J.M., Koshak, W.J., Mach, D.M. (2003), Global Frequency and Distribution of Lightning as Observed from Space by the Optical Transient Detector. *J. Geophys. Res.* Vol. 108 (D1); doi:10.1029/2002JD002347
9. Olsen, N., Stolle, C. (2017), Magnetic Signatures of Ionospheric and Magnetospheric Current Systems During Geomagnetic Quiet Conditions—An Overview. *Space Science Reviews*, 206, 5—25. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0279-7>.
10. Pulinets, S., Davidenko, D. (2014), Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit. *J. Adv. Space Res.*, Vol. 53, № 5, 709-723. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>
11. Rapoport, Yu., Grimalsky, V., Krankowski, A., Pulinets, S., Fedorenko, A., Petrishchevskii, S. (2020), Algorithm for modeling electromagnetic channel of seismo-ionospheric coupling (SIC) and the variations in the electron concentration. *Acta Geophysica*, 68, 253—278. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00385-0>.

РОЗДІЛ 4

КІРОВОГРАДСЬКА ТА КАРПАТСЬКА АНОМАЛІЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ

4.1. Історія ранніх досліджень

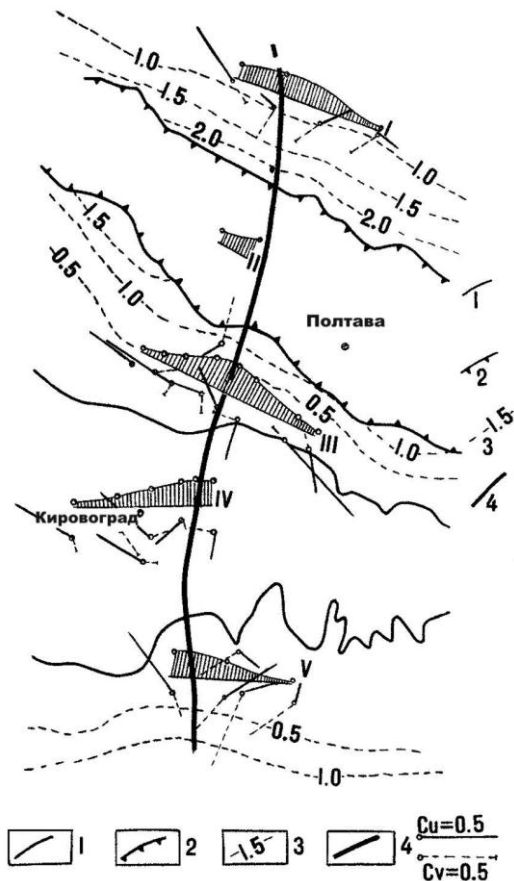


Рис. 4.1. Кіровоградська аномалія електропровідності. C_u і C_v – вектори індукції, графіки I–V – аномальні поля у східній компоненті, нормовані до обсерваторії Димер для періоду 30 хв.

1 - Границя Українського щита;

2 - Дніпровсько-Донецька западина;

3-Контури поверхні кристалічного фундаменту;

4-Вісь Кіровоградської аномалії електропровідності

Кіровоградська аномалія електропровідності (КірАЕ) була виявлена в 1967 р. за аномальним збільшенням амплітуд геомагнітних варіацій у одному пункті Українського щита (УЩ) і відразу було визначено простягання аномалії. У 1968 р. спостереження по профілю навхрест аномалії показали ширину зони збільшення східної компоненти горизонтального поля V_x та відсутність збільшення північної компоненти V_y , вертикальна компонента V_z змінювала знак у районі максимуму горизонтальної компоненти, і вони разом визначали положення вісі аномалії. У 1970 р. аномалія була простежена в південному напрямку до Херсона, у 1971 р. – у північному напрямку під ДДВ до виходу на Воронежський масив. Таким чином, аномалія була простежена на відстань 600 км із півдня на північ (Рис. 5.1), її параметри приблизно зберігались на всіх профілях, горизонтальне і вертикальне аномальні поля відповідали одне одному відповідно до перетворення Гільберта-Кертца, - все це підтверджувало двомірність аномалії. Ці результати були опубліковані в

узагальненому вигляді в роботах [Рокитянский та ін., 1974; Рокитянский, 1975], із яких взяті Рис. 4.1-4.2.

На Рис. 4.2 представлено, узагальнені за даними Рис. 4.1 [Рокитянский, 1975], профільні графіки аномального горизонтального і вертикального полів (зліва) і частотна характеристика h_x над віссю КіРАЕ (справа). Пунктиром показано межі похибки побудови найбільш вірогідної кривої, із якою співпало декілька теоретичних кривих, які розраховано для моделей, показаних в нижньому ряду. Розглянемо ці моделі: 2 – еліптичний циліндр (чим він ближче до поверхні, тим він ширше), 3 – круговий циліндр (причому його радіус r може змінюватися за умови збереження сумарної провідності $G = \pi r^2 \sigma$), 4 і 5 – сильно і помірно витягнуті сфероїди (3D), 1 і 1а – поверхневі провідники: 1 – прямокутний грабен шириною 70 км, аномалія h_z над грабеном майже не відрізняється від глибинних моделей, аномалія h_x сильно відрізняється (цей приклад показує різницю роздільної здатності горизонтальної і вертикальної компонент).

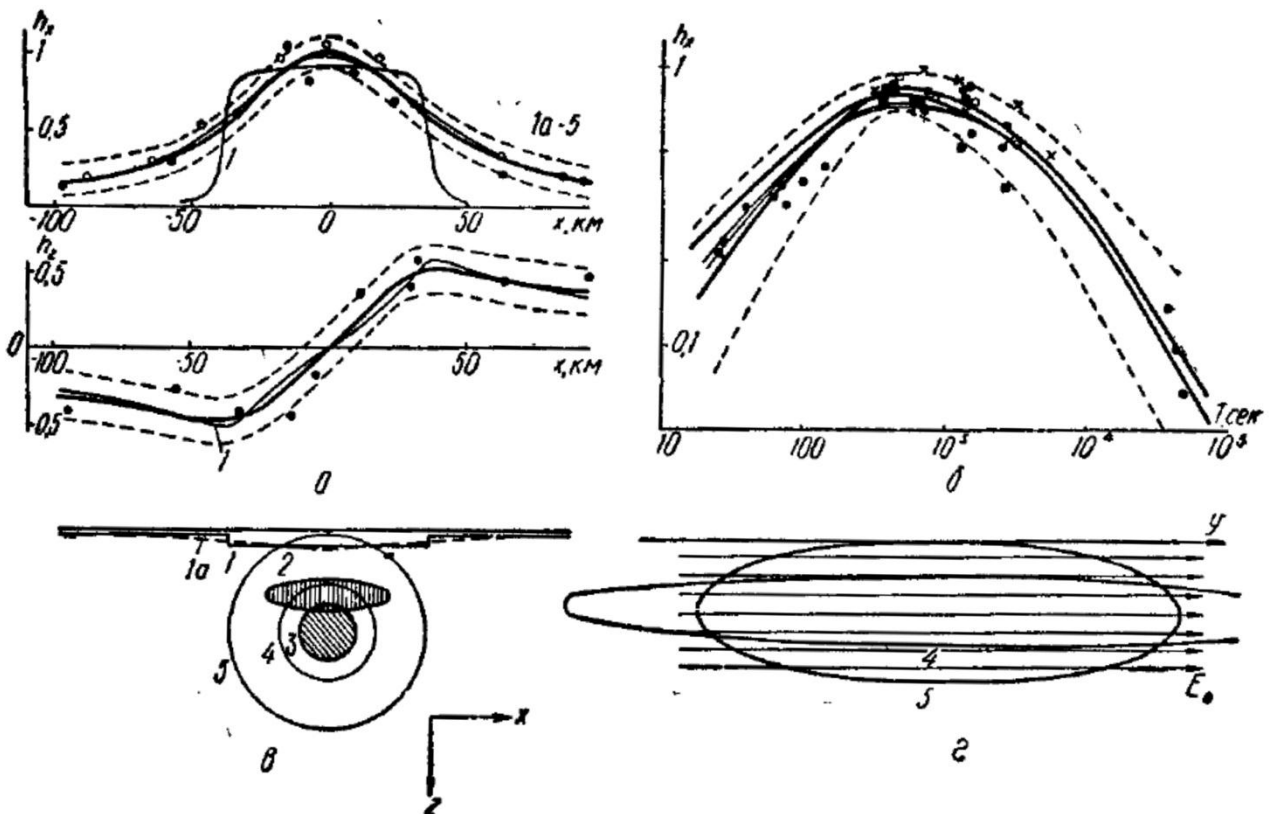


Рис.4.2. Профільні криві МВП і частотна характеристика аномального поля над КіРАЕ і безліч моделей, які відповідають отриманим даним спостереження (приклад наочно ілюструє багатозначність інтерпретації даних МВП).

Якщо ж борта грабену згладити (пунктирна крива 1а), то поверхнева і глибинна моделі покажуть практично однакові аномальні поля МВП. Для визначення глибини аномалії методами геоелектрики необхідні методи зондування. Після сильного землетрусу 1977 р. в районі Вранча (Румунія) Мінгео УРСР прийняло грандіозний проект МТЗ, в ході виконання якого на території України за 15 років цифровою апаратурою ЦЭС-2 було виконано більше 3000 глибинних МТЗ (Рис. 4.3,а) в інтервалі періодів 0,1-3000 с і близько 8000 МТЗ в інтервалі 0,1-100 с, майже половина із них на Українському щиті. Обробку було виконано за допомогою програм того часу і її результати накреслені на паперових носіях у товстих звітах. Перфокарти із результатами обробки не збереглись. Цифрові записи ЕМ-полів було записано на магнітну плівку, яка через 10 років зберігання розсипалась. Збережена обробка представляє собою дуже великий достатньо достовірний матеріал, місцями по настільки щільній мережі пунктів, що це (як не парадоксально) створює труднощі при інтерпретації даних МТЗ.

4.2. Аналіз результатів на ряді профілів Українського Щита

Для кращого розуміння результативності нещодавніх інтерпретацій було виконано аналіз/зіставлення результатів сучасної двомірної і квазітрьохмірної плівкової інтерпретації уздовж профілів, що пересікають КіРАЕ і Криворізько-Кременчуцький розлом (ККР), отриманих незалежно двома висококваліфікованими групами спеціалістів геоелектриків: 1) Кулик С.М., Бурахович Т.К. та інші (їх основна публікація по питанню, яке цікавить нас [Азаров та ін., 2006]) та 2) Логвинов І.М., [Логвинов, 2012; Ковачикова та ін., 2005; Логвинов, Тарасов, 2005].

На Рис.4.4 представлені псевдорозрізи уздовж чотирьох профілів, що представлені на (Рис.4.3, б), і позначені із правої сторони значеннями широт. На всіх псевдорозрізах видно перехід від високоомних (до 10^5 Ом·м і вище) порід Придніпровського мегаблоку до відносно гарно провідних порід на Інгульському мегаблочі і цей перехід відбувається на Криворізько-Кременчуцькому Розломі (ККР).

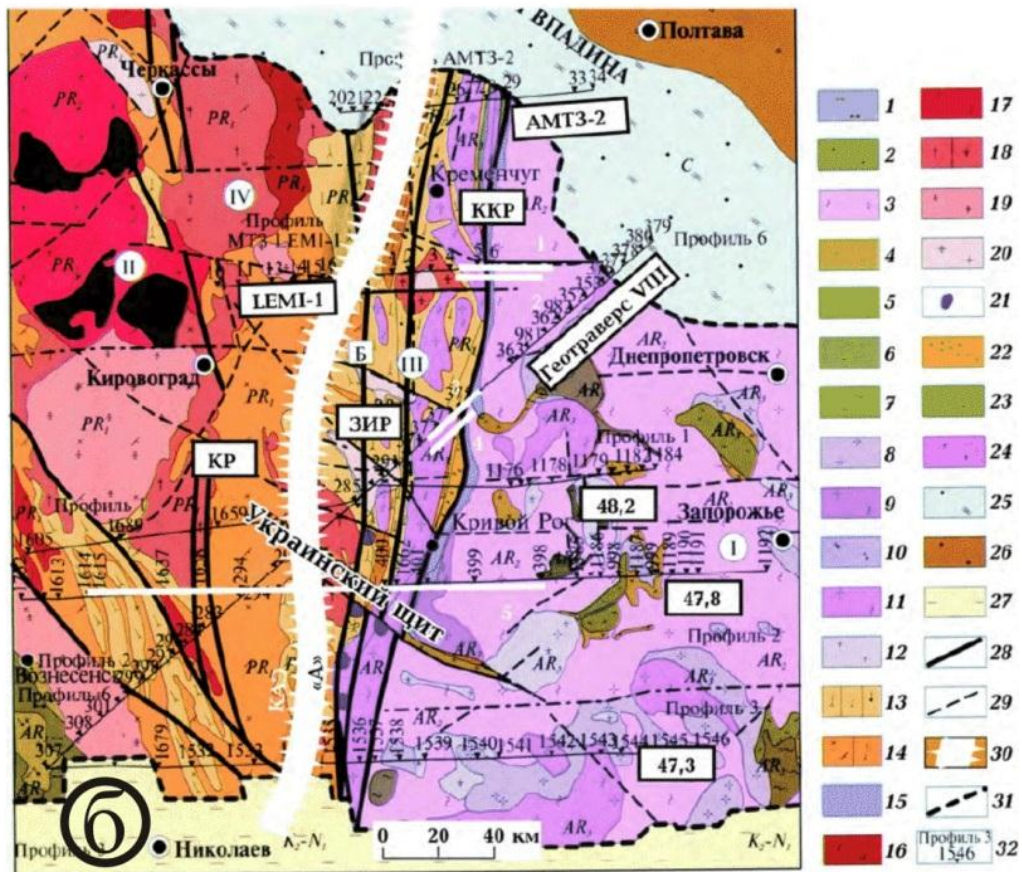
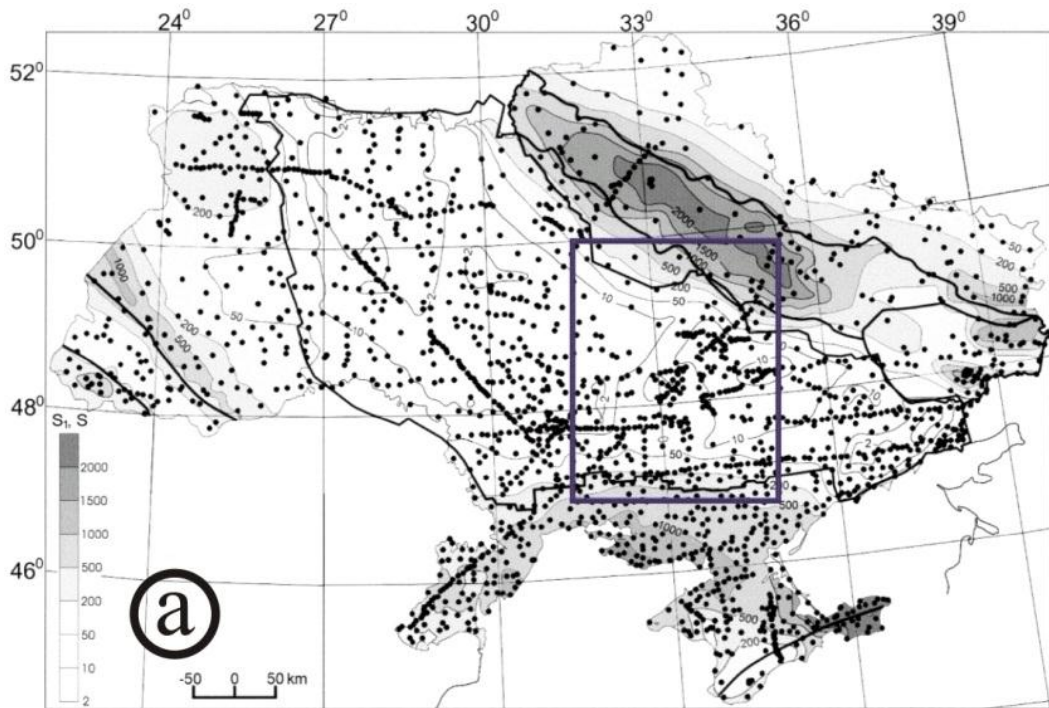


Рис. 4.3. а) Карта поздовжньої провідності осадів S1 із розташованими на ній точками МТЗ. б) Розташування профілів МТЗ у центральній частині УЩ. (адаптовано по [Азаров та ін., 2006, Рис. 6.1] із невеликими додаваннями і перейменуваннями). Мегаблоки і шовна зона (римські цифри у кружках): I – Середньопридніпровський, II – Інгульський, III – Західно-Інгулецько-

Криворізько-Кременчуцька шовна зона (ЗІККШЗ). Основні розломи: Криворізько-Кременчуцький (ККР), Західно-Інгулецький (ЗІР), Кіровоградський (КР). Геологічні формації 1-27 - див. надпис до Рис. 6.1 у [Азаров та ін., 2006]. 28 і 29 – регіональні та локальні розломи. 30 – вісь основного провідника КАЕ «А» за даними МВП на періодах 500-2000 с [Рокитянский, 1975; Рокитянский та ін., 2012] із невеликими уточненнями із недавніх робіт І.М.Логвинова (центр об'єкту «А» на рис. 4.5). 31 – межі УЩ. 32 – профілі і пункти МТЗ.

На Рис. 4.4 наведено також результати вимірів 2002-2003 років новою апаратурою LEMІ-410М системи Корепанова на профілі АМТЗ-2, який розташований на границі зчленування УЩ із Дніпровсько-Донецькою западиною. Автори дають геоелектричний розріз до глибини 30 км, на якому західніше ККР на глибині 3-7 км і до граничних 30 км показаний провідник із питомим опором менше 30 Ом·м (Рис. 4.4, верхній розріз «50,2° Пн.ш.»).

Приблизно в цьому місці проходить вісь КіРАЕ. Якщо інтерпретація правильна, то отримано важливий результат: глибина верхньої кромки аномалії всього приблизно 5 км. Нажаль, автори нічого не пишуть, за якими компонентами функції відгуку і як виконувалась інверсія, причому висока детальність отриманого розрізу не відповідає густоті пунктів спостереження.

Східніше ККР над Придніпровським мегаблоком автори фіксують високоомний розріз до десятків тисяч Ом·м, однак під двома найсхіднішими пунктами в товщі архейського Середньопридніпровського мегаблоку показано гарно провідні ділянки на глибині ≈ 15 км. Цей результат міг бути отриманий завдяки боковому впливу найближчих осадових товщ ДДЗ і провідністю більше 1000 См.

У роботі [Азаров та ін., 2006] представлено такі ж самі квазітрьохмірні моделі, що отримано за допомогою програми плівкового моделювання, однак достовірність представлених моделей викликає сумніви, бо отримані дані суперечать висловленим раніше, у тій же роботі, ідеям. І при побудові стартової моделі для розрахунку прямої задачі за допомогою 3D програми Маккі, після

трьох ітерацій підбору зближення даних розрахунку і спостереження призупинилось, що очевидно, вказує на внутрішню суперечливість/несумісність ансамблю використаних даних спостереження, можливо, також і апріорних даних (наприклад, прийнятого нормального розрізу).

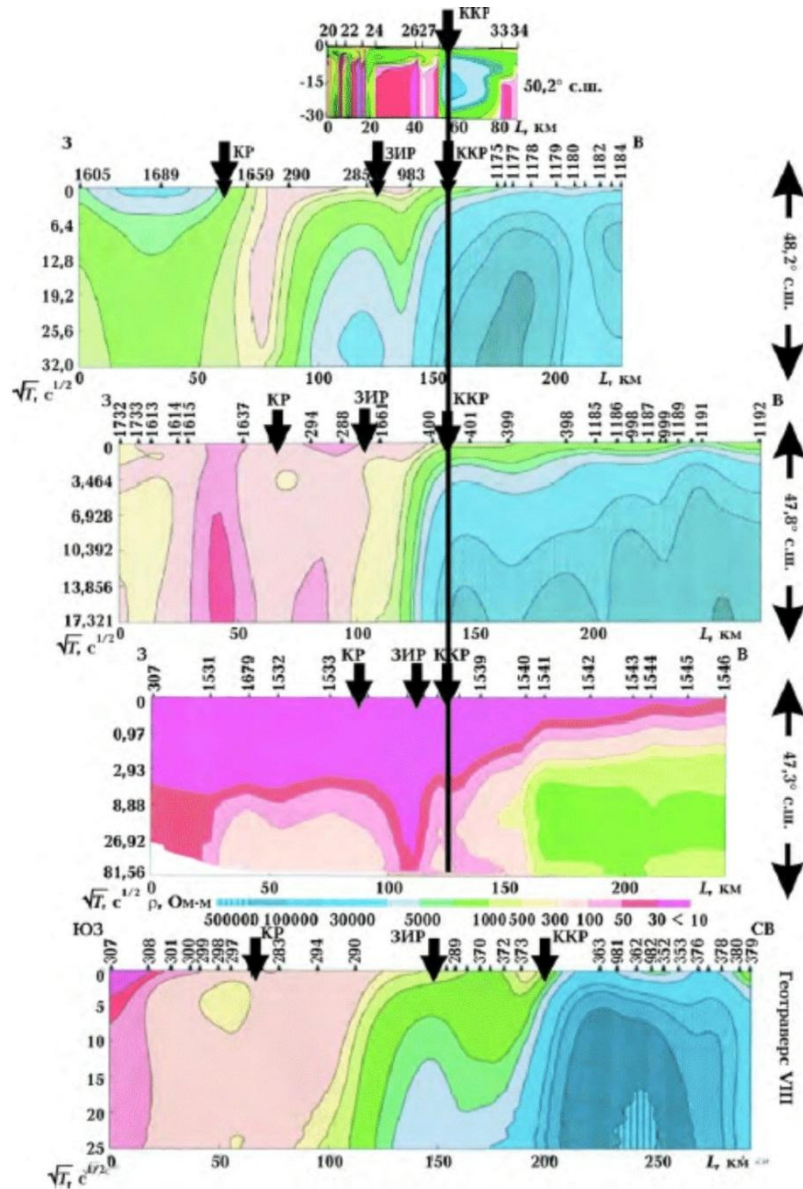


Рис. 4.4. Псевдорозрізи ефективного позірнього опору уздовж чотирьох регіональних профілів, що перетинають ККР - границю AR-PR. (Рисунки 6.3-6.6 із роботи [Азаров та ін., 2006]). Як і в оригіналі, на трьох верхніх розрізах корінь із періоду дано в логарифмічному масштабі, на нижньому – у лінійному. На самому верхньому рисунку «50,2° Пн. ш.» дано геоелектричний розріз уздовж профілю АМТЗ-2, глибини відкладені в км [Азаров та ін., 2006, рис. 6.19].

І.М. Логвинов із колегами зібрав велику базу даних у вигляді функцій відгуку, що отримані виробничими організаціями і в Академії. Для побудови геоелектричних моделей він використовує пряму інверсію даних. Для району, цікавого для нас результати конкретної інтерпретації групою І.М. Логвинова представлені в трьох головних роботах [Логвинов і Тарасов, 2005, Гордиенко та ін., 2005 і Логвинов, 2012]. Розглянемо деякі із наведених у них результатів. Складність і невизначеність 2D інверсії спочатку проілюструємо прикладами інтерпретації даних уздовж широтного профілю на 48.2° Пн. ш.

У декількох роботах (Гордиенко та ін., 2005; Логвинов і Тарасов, 2005) Кіровоградська аномалія представлена у вигляді двох частин: західної «А» і східної «Б», причому остання на десятки км висунута під Середньопридніпровський мегаблок архейського віку, що показує там великий провідник із опором менше 3 Ом·м. Хоча достовірних обґрунтувань наявності об'єкту «Б» у регіоні досліджень, у тексті статей, не наводиться. Наявність даного провідного об'єкту, в інтервалі глибин 28-42 км із G близько $1,9 \cdot 10^8$ См·м, представляється лише, як один із варіантів, які зменшують величину нев'язки в декількох пунктах дослідження [Логвинов і Тарасов, 2005]. Хоча, у цій же роботі відмічено, що за даними МТЗ цей об'єкт взагалі непомітний. Але об'єкт «Б» залишається у всіх результатах. У пізнішій роботі об'єкт «Б» представлено з іншими параметрами: глибина верхньої кромки – 9 км, $G=0,03 \cdot 10^8$ См·м [Логвинов, 2012, Табл.4.7 на стор.198]. Чому змінився результат ніде не пояснено. Нових спостережень МВП і МТЗ на цьому профілі не було.

У роботах 2005 року основний провідник КіРАЕ – об'єкт «А» добре визначається за даними МВП та 30 МТЗ і його поздовжня провідність G оцінюється величиною $4 \cdot 10^8$ См·м. Однак у 2012 висловлюється стурбованість складністю поведінки функцій відгуку МТЗ над віссю аномалії (над об'єктом «А») для цього профілю [Логвинов, 2012, стор. 184-186] і в таблиці на стр.198 значення G об'єкту «А» зменшено до $0,9 \cdot 10^8$ См·м, тобто у 4,5 рази. Хоча нових спостережень не було. Очевидно, автор зробив дещо інший вибір пунктів/кривих

МТЗ із наявної множини. Але це означає наявність суб'єктивного фактору в результатах 2D інверсії.

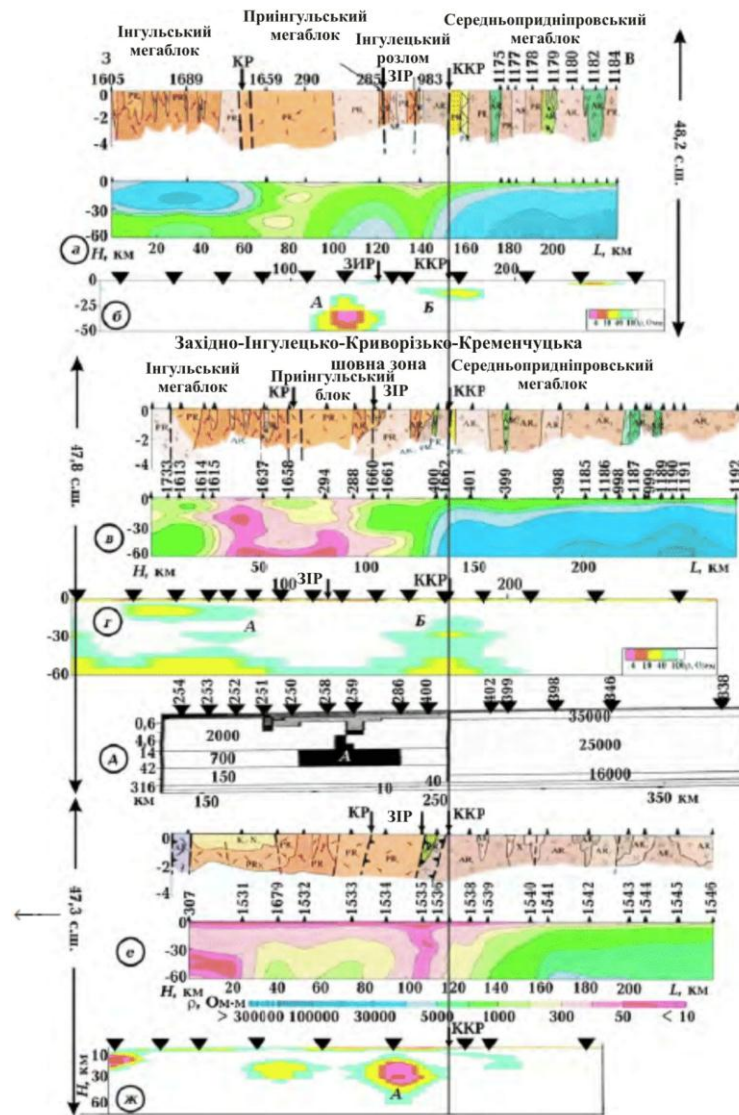


Рис.4.5. Результати моделювання уздовж 3 квазі-широтних профілів, що перетинають КіРАЕ, ЗІККШЗ та ККР на широтах $47,3^\circ$, $47,8^\circ$ і $48,2^\circ$ Пн.ш. за наступними джерелами: [Азаров та ін., 2006]: розрізи а, в і е; [Логвинов, 2012]: розрізи б, г і ж; [Гордиенко та ін., 2005]: розріз д. На розрізах а, в і е наведено також геологічні розрізи верхніх 3 км із зазначенням розломів і геологічних формацій. Геоелектричні розрізи дано до глибини 50 км. Загальна для трьох профілів а, в, е шкала питомих опорів дана тільки на нижньому профілі е. Над розрізами надписано номери пунктів МТЗ (дані Укргеології). На розрізах із роботи [Логвинов, 2012] виділено тільки гарно провідні утворення із питомим опором менше $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – це в першу чергу два провідники, із яких складається

КіраЕ: західний – об'єкт «А» - основний із великою сумарною провідністю ($G > 10^8$ См·м) і глибиною більше 15 км і східний – об'єкт «Б» - менш провідний і менш глибинний - за нашим припущенням відноситься до ККР. Поєднання усіх розрізів виконано за Криворізько-Кременчуцько-Крупецьким розломом (ККР), через який проведено суцільну лінію.

У роботах І.М. Логвинова двохмірна інверсія виконана уздовж трьох широтних профілів на Українському Щиті (УЩ) на широтах 47,3, 47,8 і 48,2 Пн. ш., тобто приблизно там же де проходять профілі 3, 2, 1 в роботі [Азаров та ін., 2006], що показані на (рис. 4.3, б). На рис. 4.5 дано підсумкові розрізи електропровідності уздовж трьох вказаних профілів, які отримано в цих двох роботах. Відмінності суттєві. По-перше, форма представлення: в Азарова детальна шкала опорів від 300000 до 10 Ом·м, у Логвинова від 100 до 4 Ом·м, тобто він показує тільки гарно провідні аномалії. По-друге, було використано не зовсім ідентичний матеріал: Логвинов використовував типпер, а також поперечні і поздовжні криві МТЗ, Азаров, очевидно (це в книзі прямо не сказано), використовував тільки ефективні криві МТЗ, інваріантні до вибору вісі двомірності, що спрощує і стабілізує інверсію, але залишає можливість отримання більш детальних, хоча і не завжди більш обґрунтованих результатів. Нарешті, вибір пунктів не однаковий: із множини пунктів МТЗ, що було отримано в Укргеології, кожна група дослідників або навіть одна група в різні роки дослідження (моделювання) обирали різні пункти (наприклад, пункти що здавались менш спотвореними завадами і геологічними неоднорідностями, причому вибір міг бути чисто суб'єктивним) для формування номінально ідентичних профілів (наприклад, уздовж деякої визначеної широти).

Отже, розглянемо рис 4.5. Всі наведені на ньому профілі перетинають КіраЕ і результати інверсії повинні узгоджено показувати цей об'єкт. Вони показують, але із нереальними зміщеннями в західному або східному напрямках. Такі зміщення спостерігаються для результатів обох груп авторів і за представленими матеріалами важко визначити, яка із робіт дає більш правильний результат. Уздовж профілю 47.8° І.М. Логвинов отримав результат 2D моделювання, який

спантеличив його самого, - ніякого зв'язку об'єкту «А» із ККР не спостерігалось, що суперечило даним моделювання на профілях, які розташовані північніше і південніше [Логвинов, 2012]. Цікаво відмітити, що в роботі [Гордиенко та ін., 2005, рис.2.7 на стор.36] І.М.Логвиновим була дана абсолютно інша інтерпретація того ж профілю, яка представлена на рис. 4.5-д: КіРАЕ вийшла у вигляді одного об'єкту «А» із центром на відстані всього 48 км від ККР, східніше якого породи Середньопридніпровського мегаблоку до глибини 100 км мають питомий опір більше 25000 Ом·м без яких-небудь гарно провідних включень. Це важливий результат, що характеризує геоелектричну модель архейського мегаблоку на УЩ.

Складність матеріалу, суперечливість поведінці функцій відгуку в найближчих пунктах, відсутність теоретично доведених точних критеріїв селекції даних у реальних трьохмірних ситуаціях – все це об'єктивні фактори, які ускладнюють отримання гарно обґрунтованих результатів інтерпретації матеріалів глибинної геоелектрики. При аналізі цих матеріалів необхідно пред'являти певні вимоги до якості даних і використовувати набір методик аналізу функцій відгуку для визначення ступеню їх відповідності 2D ідеалізації і придатності для 2D-інверсії, але й їх застосування не вирішує проблему вичерпно, що може бути проілюстровано на прикладі гарної роботи [Vaittinen et al., 2012].

Для уточнення глибини залягання КіРАЕ аномалії необхідні методи зондування – МТЗ, але з їх застосуванням можливі різноманітні ускладнення. Наприклад, екранування сигналу від глибинного провідника наростаючою товщею осадового чохла над поверхнею кристалічного фундаменту, який похило занурюється, і який буде описаний нижче. Подібні ефекти на щиті можливі на більш локальних ділянках. Глибини, що визначаються до провідного тіла КіРАЕ методом МТЗ, змінюються на УЩ від пункту до пункту, що зумовлено головним чином приповерхневими неоднорідностями. На цьому етапі, за даними старих МТЗ Укргеології більш надійно усереднювати глибини по групі пунктів і давати середній результат групового МТЗ для деякої ділянки КіРАЕ. Глибини верхньої кромки КіРАЕ, які отримано методом МТЗ, змінюються від 10 до 25 км. Середня глибина за оцінкою КіРАЕ визначається 18 км [Логвинов, 2012, стор. 198] і 15 км

[Рокитянский та ін., 2012], що в межах похибки співпадає. Характерне для КіраЕ на УЩ відсутність систематичної розбіжності поздовжніх і поперечних кривих можна пояснити складною структурою аномалії. У звіті [Ингеров та ін., 1990, рисунки 4.22-4.25] дано результати розрахунків декількох двовірних моделей, що описують характерні особливості кривих МТЗ над КіраЕ.

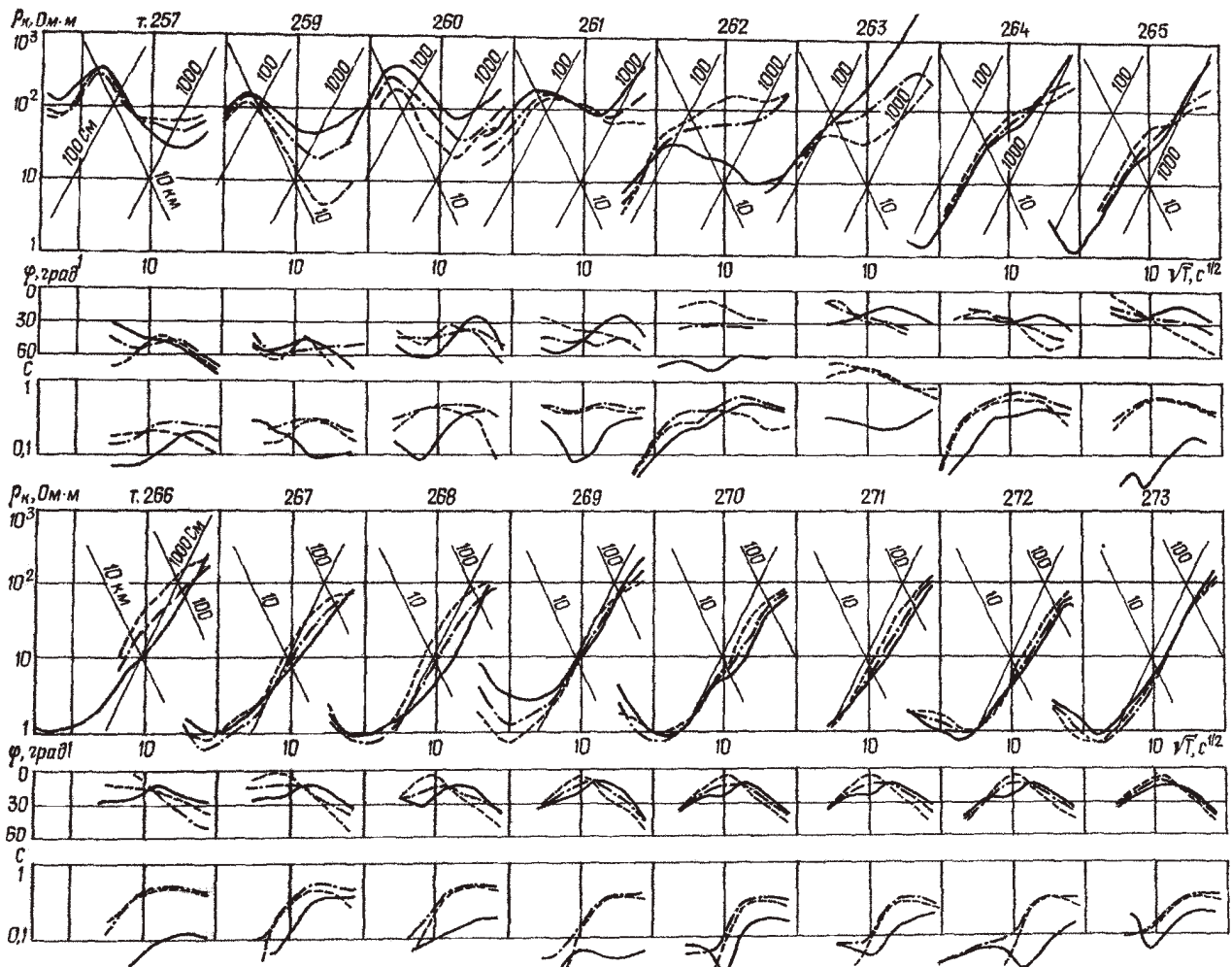


Рис.4.6. Криві МТЗ уздовж меридіонального профілю уздовж вісі Кіровоградської аномалії, від центру Українського щита до Чорного моря [Дьяконова та ін., 1986]. ρ_{xy} , ϕ_{xy} – суцільні лінії, ρ_{yx} , ϕ_{yx} – пунктир, x спрямовано на північ, ефективні криві і $C = (C_x^2 + C_y^2)^{1/2}$ - штрих-пунктир. Місцезнаходження пунктів див. на Рис. 4.11.

4.2.1. Український щит і його південний схил

На рис. 4.6 представлені дані обробки 16 пунктів МТЗ уздовж меридіонального профілю над віссю Кіровоградської аномалії. Над вузькими

аномаліями (Карпатська, Приільменська) поперечна крива «не відчуває» аномалію, а поздовжня дає шуканий результат - глибину. На перших чотирьох пунктах у межах щита криві не розходились і їх спадні ділянки «відбили» глибини 15, 10, 20, 13 км. Поздовжня провідність верхнього шару над кристалічними породами УЩ складає 8-15 См, утворюючи сідлоподібну структуру: в північному та південному напрямках ця провідність збільшувалась, у широтних напрямках – зменшувалась. Аби не заглиблюватися в аналіз можливих спотворень було запропоновано, що найбільш вірогідна глибина верхньої кромки Кіровоградської аномалії в районі пунктів 257-261 дорівнює 15 ± 8 км за припущення її сталості під усіма пунктами. Можливі відмінності глибини можуть бути вивчені за наявності більш детальних даних.

Наступні два пункти 262-263 знаходяться на початку схилу до Причорноморської западини, провідність S осадів збільшується до 50 і 80 См, криві складним чином розходяться і «відбивають» глибини близько 2-8 км. Далі на південь всі 10 МТЗ мають зростаючу гілку, в окремих пунктах із перегином, але за цими даними МТЗ ніяк не зробити висновок про наявність гарно провідної аномалії, яка із повною достовірністю установлена методом МВП. Така дія ефекту екранування [Бердичевский та ін., 1970].

4.3. Нові МВП-МТЗ, що виконані автором

Деякі дослідники виконали трьохмірне моделювання Кіровоградської аномалії (пряма задача) і, базуючись на конфігурації обраної моделі, стверджували, що аномалія закінчується, не досягаючи Чорного моря. Окрім того, криві МТЗ, виконані до самого узбережжя Чорного моря, не показували присутності аномалії, але дані МВП, що закінчувались поблизу межі Українського щита у 150 км північніше Чорного моря не показували, відповідно методики, яка була розвинута в роботі [Рокитянский, 1975], близького завершення аномалії. Та оскільки Кіровоградська аномалія привертає великий інтерес у геологів і геофізиків (для дослідження її північного продовження російські

геоелектрики виконали в останнє десятиліття більше 100 пунктів МТЗ), нами було вирішено виконати польові роботи у південній частині аномалії (Рис. 5.7).

4.3.1. Проведення спостережень. Методика і апаратура

У 2008-2009 рр. нами було виконано спостереження в північній частині Херсонської області за двома профілями. При проведенні польових робіт, було враховано всі вимоги методики проведення експериментальних досліджень методами МТЗ і МВП. Варіації природних електромагнітних полів реєструвались безперервно у кожній точці спостережень на протязі двох-трьох діб із частотою опитування 4 Гц.



Рис. 4.7. Карта району робіт 2008 (пункти 6-10) і 2009 (пункти 1-5) року на півдні Херсонської області по двом профілям, які на рисунках 4.10 і 4.11 спроектовані в один інтерпретаційний профіль. Стрілки - вектору індукції на періоді 1500 с в околі максимуму T_0 частотної характеристики, тому уявний вектор зовсім малий. Жирна лінія – вісь КірАЕ за результатам наших робіт.

Перед вибором місця проведення робіт проводилась рекогносцировка місцевості. Точки було обрано у віддалені від великих населених пунктів, а також із врахуванням відсутності джерел завад: ліній електропередач, сильномагнітних тіл, автомобільних трас і залізних доріг, особливо на постійному струмі.

Роботи 2008 року (пункти 6-10) було проведено по профілю, який перетинав очікуване південне продовження Кіровоградської аномалії електропровідності. Однак виявилось, що аномалія проходить західніше, ніж очікувалось. Тому у 2009 році пункти поставили в основному західніше вісі аномалії (щоб отримати двохстороннє спадання профільних кривих аномального поля) і за умовами місцевості на 40 кілометрів північніше першого профілю.

Реєстрація варіацій геомагнітного поля проводилась за допомогою довгоперіодної 5-компонентної (три компоненти магнітного поля і дві компоненти електричного поля) цифрової магнітотеллуричної станції LEMI-417 (Рис. 4.8), яка розроблена у «Львовському Інституті космічних досліджень» [Корепанов, Трегубенко, 2009]. Ця станція має чутливість компонент магнітного поля V_x , V_y , V_z до 0,01 нТл, для компонент геоелектричного поля E_x , E_y , до 0.5 мкВ. Обсерваторія Київ, на якій реєстрація проводилась із використанням аналогічної станції, була обрана віддаленою базою для розв'язку задач синхронної обробки даних.

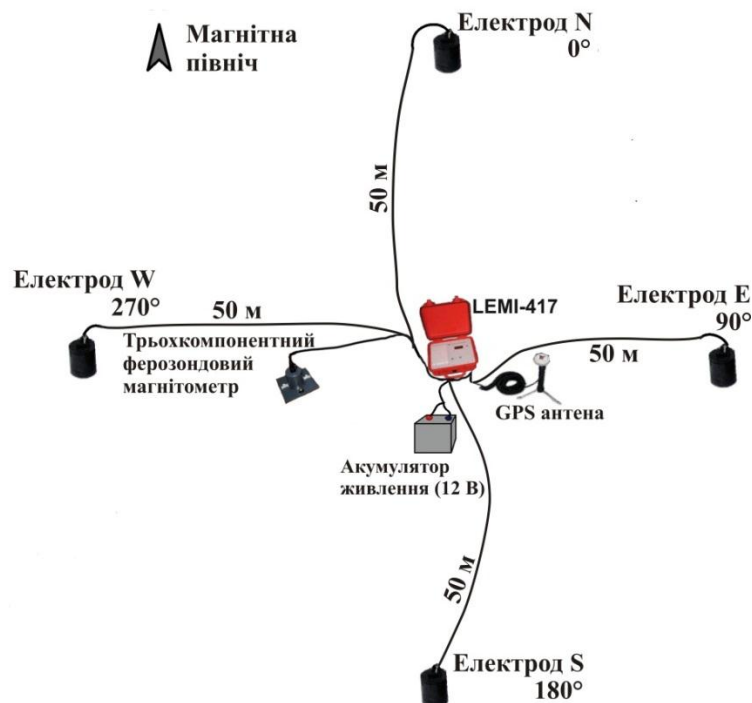


Рис. 4.8. Схематичне розміщення усіх елементів установки Lemi-417

Датчики горизонтальних компонент магнітотеллуричного (МТ) поля були орієнтовані по осям прямокутної системи координат x , y , z із віссю x

спрямованою на геомагнітну північ. Довжина електричних ліній знаходилась в інтервалі 70–100 м (Рис. 4.8). Для дослідження електричного поля використовувались неполяризовані електроди (що містять CuSO_4) львівського виробництва [Корепанов, Свенсон, 2007]. Часові мітки початку і кінця записів, а також координати польових пунктів зондування визначались за допомогою GPS модуля. На десяти польових пунктах отримано достатньо якісні записи всіх п'яти компонент МТ поля загальною довжиною на кожному пункті більше 3 діб у 2008 році і приблизно 2,5 діб у 2009. Тривалість досліджень лімітувалася запланованими термінами і бюджетом.

4.3.2. Результати геоелектромагнітних досліджень та їх аналіз

Під час польових робіт було отримано часові серії компонент МТ поля, із яких, на наступному етапі обробки, за допомогою програмного комплексу, що розроблений І.М. Варенцовим (PRC_MTMV), було отримано МТ і магнітоваріаційні (МВ) функції відгуку для діапазону періодів 10-4000 с. Синхронна обробка для обчислення горизонтального тензору і додаткові remote reference (RR) оцінки в деяких польових пунктах виконувались із залученням записів геомагнітної обсерваторії Київ (Димер). Результати цієї обробки представлено на Рис. 4.9.

Для південного схилу Українського щита і Причорноморської западини, МТ криві мають вигляд, який характерний для кривих над потужною осадовою товщею – зростаюча крива, яка у відповідності із фазовими даними наближається до максимуму (як відомо, фазові криві несуть інформацію про глибинні об'єкти на більш коротких періодах у порівнянні із амплітудними кривими). Спостерігається гарна узгодженість фазових та амплітудних МТ кривих, що свідчить про відсутність значних джерел завад різного походження в даному регіоні (свідченням цього є також узгодженість максимумів реальних частин і зміни знаку уявних частин векторів індукції у всіх наших польових точках).

Побудова МТ функцій відгуку у районі досліджень, характеризується значно меншими похибками в порівнянні із даними, що отримано на щиті.

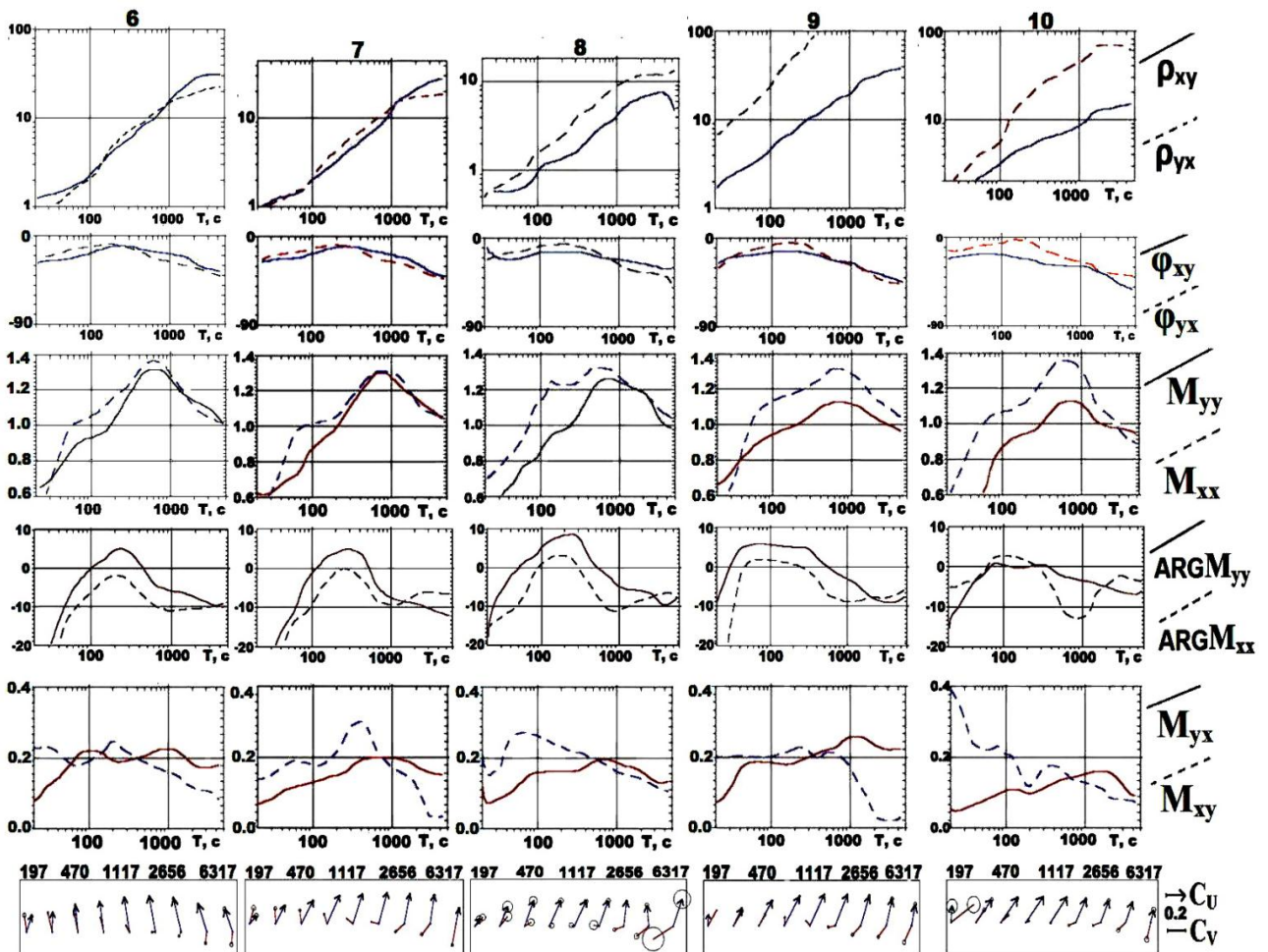
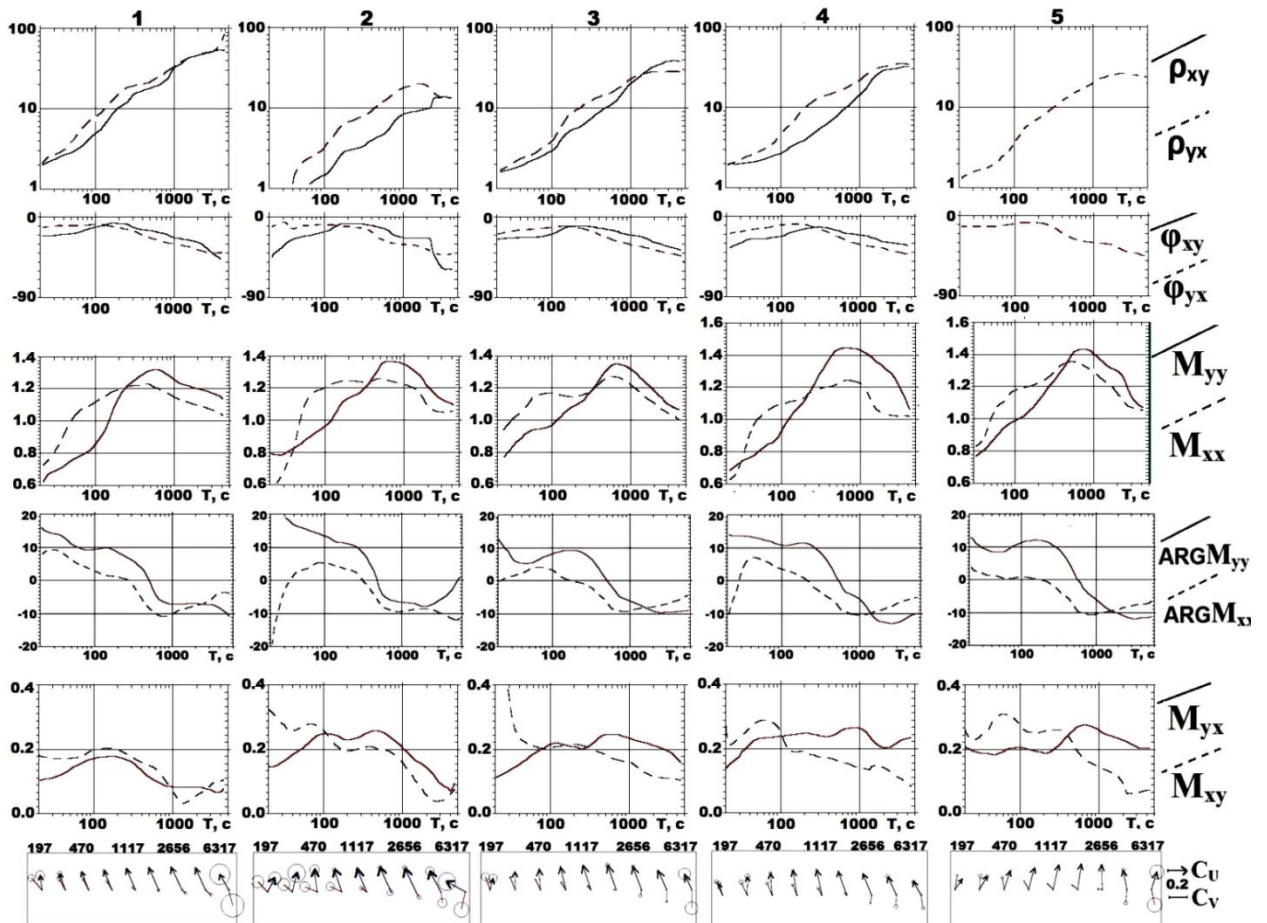


Рис. 4.9. Результати обробки даних 2009 року (верхній блок) і 2008 року (нижній блок). Зверху вниз: позірний опір ρ_{xy} , ρ_{yx} ; фаза імпедансу φ_{xy} , φ_{yx} ; компоненти тензору горизонтального аномального поля: головні компоненти M_{yy} , M_{xx} , їх фази, нижче додаткові компоненти M_{yx} , M_{xy} ; із самого низу вектори індукції для 9 періодів, круги навколо кінчиків векторів показують похибку їх визначення. x – спрямовано на північ, y – на схід. Перші компоненти у всіх парах відповідають поляризації електричного поля на північ, вони позначені суцільною лінією, другі (східна поляризація електричного поля) – пунктиром.

Поряд із цим, відомо, що Причорноморська моноклиналь містить високоомні шари/прошарки, які значно екранують сигнал від провідних об'єктів у товщі фундаменту, навіть коли поздовжня провідність осадів складає всього десятки - перші сотні Сіменсів. Тому в районі досліджень глибинна інформація про наявність тут Кіровоградської аномалії практично не відображається на кривих МТЗ, що чітко видно на обох профілях (Рис. 4.9), як це було отримано і в 1980-ті (Рис. 4.6). У зв'язку із сказаним вище, головну ставку, при постановці польових робіт, ми покладали на магнітоваріаційні дані.

Вертикальна компонента МВ поля (див. вектори індукції на Рис. 4.7) відчуває всі відомі в широкій окрузі провідні об'єкти: Кіровоградську аномалію, осадові породи південного схилу Українського щита і Причорноморської западини, води Чорного моря. У результаті суперпозиції всіх полів вищеописаних провідних структур вектори індукції мають переважно північний напрямок, а складові векторів у широтному напрямку на Схід і на Захід від КіРАЕ досить невеликі. Це означає, що осадові породи Причорноморської западини і морської води мають велику сумарну провідність у широтному напрямку, ніж інші вище названі провідні утворення. Максимум частотної характеристики векторів індукції лежить в інтервалі 1400-2000 с. Довжина векторів складає переважно 0,5-0,6. Для ідентифікації Кіровоградської аномалії розглянемо поведінку східної складової векторів. На рис. 4.7 для періоду T_0 і на рис. 4.9 для всіх періодів видно: у 1-4 точках вектори нахилені у північно-західному напрямку, а в точці 5 – у північно-

східному. Аналогічну ситуацію можна побачити на профілі 2008 року між точками 6 і 7. Така поведінка векторів показує що, аномалія електропровідності проходить саме між цими польовими пунктами, як це і показано на рис. 4.7. На Рис. 4.10 обидва профілі суміщені в один так, що абсциса 0 знаходилась над віссю аномалії.

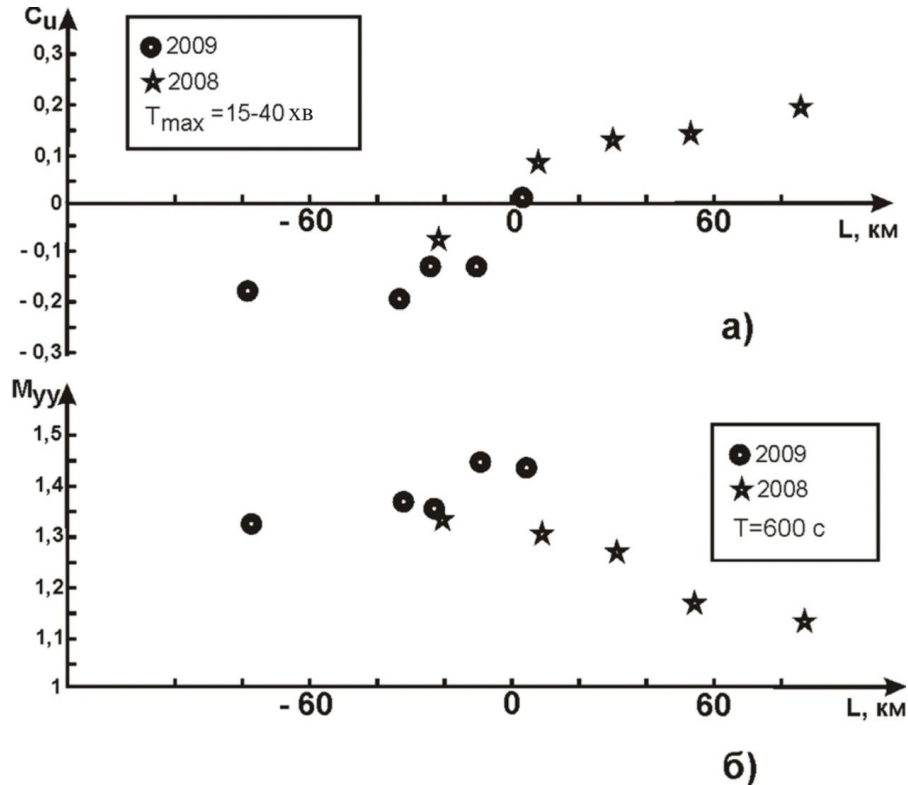


Рис. 4.10. а) Східна компонента реальної частини векторів індукції C_{uy} за профілями (2008-2009 років); б) Значення східної компоненти магнітного тензору M_{yy} по профілям (2008-2009 років).

Максимум компоненти M_{yy} тензору горизонтального аномального поля, який виникає під дією аномальних струмів меридіонального напрямку і, отже, містить інформацію про Кіровоградську аномалію електропровідності, у кожній точці зондування лежить в одному і тому ж інтервалі періодів 600-1000 секунд. Це свідчить про відсутність впливу сторонніх локальних аномальних полів на горизонтальну компоненту. В пунктах 4 і 5 значення M_{yy} досягають значень 1.46 і 1.45, а в точках 6 і 7 – 1.33 і 1.3 відповідно. В інших польових точках, які віддалені від знайденої вісі аномалії, значення тензору не опускаються нижче 1,25 (Рис. 4.9).

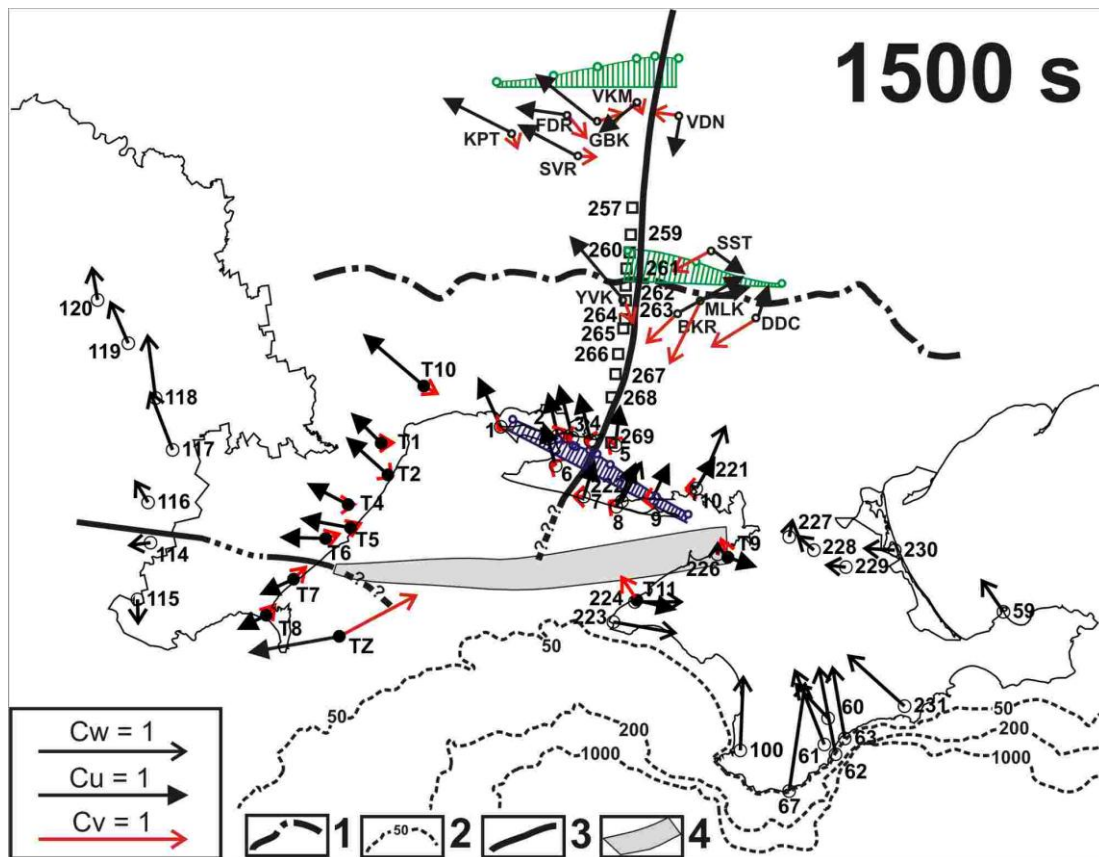


Рис. 4.11. Карта Південної частини Кіровоградської аномалії електропровідності. C_u – реальна компонента вектору індукції, C_v – уявна компонента вектору індукції, C_w – вектор Візе для періоду $T = 1500$ сек. Пусті кружечки – пункти МВП, що отримані працівниками Інституту геофізики; зафарбовані кружечки із буквою «Т» – пункти МВП отримані В.І. Трегубенко; пусті квадрати – точки МТЗ уздовж вісі аномалії, які представлені на Рис.4.6. На зелених і синіх профільних графіках показано східну компоненту горизонтального аномального магнітного тензору: зелені графіки - два старих профілі, синій – новий профіль (див. Рис.4.9). **1** – границя Українського щита; **2** – ізолінії глибин Чорного моря; **3** – вісі аномалій електропровідності; **4** – Причорноморська западина.

Отже, після обробки і аналізу отриманих МВ даних, за максимумами реальної компоненти вектору Візе (для інтервалу періодів 15-40 хв.) і горизонтального аномального тензору (на періоді 600 с), було побудовано профільні графіки (Рис. 4.10). За допомогою них ми можемо точно визначити,

місце залягання вісі Кіровоградської аномалії електропровідності. На місце розташування аномалії вказує зміна знаку реальної частини східної компоненти вектору індукції C_u , (Рис. 4.10, а), що позначена як точка 0, а також положення максимуму M_{yy} компоненти тензору горизонтального аномального поля (Рис. 4.10, б), який, знаходиться над центром аномалії. На представленому графіку видно, що східна компонента горизонтального аномального поля має пологий максимум над віссю, який спадає у східному напрямку (напівширина 40 км), у західному напрямку спад більш повільний. Всі ці факти показують, що наші припущення про продовження Кіровоградської аномалії в цьому регіоні підтвердились. На це ж вказує вся сукупність векторів індукції, яка представлена на Рис. 4.11. Вектори на західному і східному берегах Каркінітської затоки і особливо на острові Зміїний (пункт «TZ») показують, що аномальні струми Кіровоградської аномалії простягаються далеко на південь під водами Чорного моря.

4.4. Північне продовження КірАЕ

Виявлена на Українському щиті Кіровоградська аномалія електропровідності суттєво змінила загальноприйняті уявлення про домінують погано провідних кристалічних порід у докембрійських провінціях. Другим яскравим підтвердженням існування великих контрастів електропровідності у фундаменті Східно-Європейського кратону, (СЄК) стала відкрита через 10 років після КірАЕ і подібна їй за величиною Ладозька аномалія електропровідності (ЛАЕ) [Рокитянский та ін., 1982], що розташована на північному і південному берегах Ладозького озера, на границі Карельського і Свекофенського геоблоків Балтійського щита.

4.4.1. Ладозька аномалія електропровідності

Подальше розповсюдження геоелектромагнітних досліджень показало, що подібні аномалії зустрічаються і на інших щитах (див. огляд у [Жамалетдинов,

Кулик, 2012]), маючи тенденцію розташовуватись у межах протерозойських областей (PR), поблизу границі із областями, що складені переважно архейськими комплексами (AR). Зчленування відбувається уздовж великих шовних зон, які відрізняються великими запасами мінеральних ресурсів і унікальною збереженістю структур докембрійської тектоніки. У зв'язку із цим всебічне вивчення цих зон, включаючи і маркуючі їх аномалії корової електропровідності, має великий теоретичний і практичний інтерес.

Прийнято вважати, що Схіно-Європейський кратон (СЄК) складається із трьох літосферних сегментів – Фенноскандії, Сарматії і Волго-Уралії (вставка на Рис. 4.12). На Українському щиті виділяють 5 мегаблоків, три із яких (Білоцерківсько-Середньобугський, Середньопридніпровський і Приазовський) складені, головним чином, архейськими породами [Очерки геодинамики України, 2018 та ін.]. На Балтійському щиті у напрямку із Пн.Сх. на Пд.Зх. змінюються наступні геоструктурні домени: переважно архейське, стабільне ядро щита – Кола-Карельський мегаблок, Свекофенський палеопротерозойський колізійний ороген і розміщений на самій західній межі Фенноскандії - Свеконорвезький каледонський ороген [Хаин, 2001]. Більш давня Пн.Сх. частина щита відділена від області Свекофенського орогену Ладого-Ботнічеською рухомою зоною (в іншій термінології – Раахе-Ладозькою сутурою) [Korja et al., 2002; Mints et al., 2015]. До мегаблоків протерозойського віку на УЩ відносять Інгульський мегаблок.

Нижче буде перераховано основні загальні риси та відмінності КірАЕ і ЛАЕ, що виявлені в результаті зіставлення їх геоелектричних параметрів і локалізації в кожній із них областей максимальної концентрації теллуричних струмів відносно зон зчленування AR і PR доменів.

У протерозойських геоблоках обох аномальних зон на відстані 50-100 км від «AR-PR контакту» визначено інтенсивні глибинні аномалії електропровідності «А» із максимумом (T_0) частотної характеристики аномального поля МВП на періоді $T_0 \approx 1-2$ тисячі секунд, що дає оцінку сумарної поздовжньої провідності КірАЕ і ЛАЕ $G \approx (1-3) \cdot 10^8 \text{ См} \cdot \text{м}$. Однак, глибина верхньої кромки Кіровоградської

аномалії складає 15 ± 5 км за даними більше 10 пунктів МТЗ над віссю аномалії. Цей факт у сукупності із іншими геофізичними даними дозволяє допускати можливість флюїдної природи КіРАЕ і припускати процес сучасної тектонічної активізації в якості її джерела. Глибина верхньої кромки Ладозької аномалії електропровідності (ЛАЕ) на профілі Выборг-Суоярві варіює від перших кілометрів до сотень метрів, включаючи виходи на поверхню електроннопровідних порід [Соколова и др., 2017; Жамалетдинов и др., 2018]. Подібний результат отримано і в центральній Фінляндії [Vaittinen et al., 2012]. Причому в обох випадках провідник простягається до глибини не менше 20 км. Припускати на таких глибинах існування достатньо потужного (для забезпечення спостережуваних значень S) реологічно ослабленого флюїдонасиченого «шару» важко, особливо в умовах доволі низького теплового потоку [Artemieva, Shulgin, 2015]. Переважною є гіпотеза про електронну природу ЛАЕ, яка вже має геотектонічне обґрунтування [Минц, Соколова, 2018].

Визначено наявність другої аномалії «Б», квазіпаралельної вищеописаної аномалії «А», безпосередньо в розломній зоні AR-PR контакту і біля нього. Це Яніс'ярвинський розлом (ЯЯР) на БЩ і Криворізько-Кременчуцький розлом (ККР) на УЩ. T_0 аномалії поблизу ЯЯР дорівнює 100-150 с, через ККР виконано декілька профілів і величина T_0 отримана із значним розкидом, але у середньому такого ж порядку. Аномалія «Б» вийшла близькою за величиною поздовжньої провідності аномалії «А» (10^4 См за даними МТЗ) у центральній Фінляндії і близько $(5-7) \cdot 10^3$ См у Північному Приладожжі. Вважаючи графіто/сульфідну природу аномалій від виходів на поверхню до їх глибинних частин, отримуємо свідчення про структурний каркас земної кори – матеріал для побудови мінерагенічних і геодинамічних моделей докембрію, особливо цінний в областях відсутності сучасних сейсмічних даних і вже використовуваний, наприклад, у [Минц, Соколова, 2018].

Також в архейських провінціях БЩ, у зонах поблизу контакту AR-PR, на всіх розрізах у верхній корі до глибин 10-20 км отримано питомі електричні опори (пео), що перевищують 10^4 Ом·м, а на великих глибинах в середній і нижній корі

пео зменшується до значень близько 10^3 Ом·м. На Середньопридніпровському архейському мегаблоці УЩ отримано більш високі пео, що, можливо, пов'язано із викривляючим впливом регіонального ефекту S при перетіканні меридіональних струмів із ДДВ у Причорноморську западину через витягнутий по широті Український щит (див. результати плівкового моделювання у роботі [Рокитянский и др., 2012]). Можливо це пов'язано із недостатньою фільтрацією сильних у цьому індустріальному районі завад. А можливо і дійсно: архейський Середньопридніпровський мегаблок має більш високе пео, ніж його аналоги на Балтійському щіті. Але щоб довести це, необхідні сучасні високоякісні спостереження і обробка, а також моделювання можливих регіональних викривлень.

4.4.2. Транс-Європейська аномалія електропровідності.

У літературі, на основі аналізу геологічних, геофізичних і космогеологічних матеріалів висловлюються ідеї про існування стародавнього транс-регіонального тектонічного лінеаменту, що простягається від Балтійського щита до Українського щита і навіть до Середземного моря [Быстревская и др., 1985; Грачев, 1987; Глубинное строение..., 2004; Орлюк, Пашкевич, 2012; Пигулевский, 2012; Жамалетдинов, Кулик, 2012]. Виявлення транс-регіонального ланцюга аномалій електропровідності, зокрема, пов'язаних із зонами зчленування архейських і протерозойських блоків могло б бути цінним внеском в розробку цієї ідеї. Нижче представлено свідчення про продовження аномально провідних об'єктів ЛАЕ і КіРАЕ за межі їх початково відкритих ланок (Рис. 4.12).

Карти інтегральної корової електропровідності Балтійського щита і поведінка векторів індукції на прилеглий до Північного Приладожжя території Фінляндії ([Рајунраа, 1987]) спільно із аналізом геологічних даних дозволили [Минц, Соколова, 2018] виявити зв'язок провідника «А» ЛАЕ також із інтенсивною Південо-Фінляндською (ПФ) аномалією, що відгалужується від нього, і є асоційованою із Південно-Фінляндським гранулітовим поясом, а також

чорносланцевим поясом Тампере Свекофенського аккреційного орогену (загальною довжиною близько 500 км).

За матеріалами роботи [Рокитянский та ін., 1982] було побудовано еліпси аномальних струмів, які найбільш чітко показують, що на Пд.Сх. від Ладозького озера в районі 60° Пн. ш. ЛАЕ розгалужується на дві аномалії: одна уходить на схід, друга – круто повернувши на південний-захід, імовірно, направляєється до озера Ільмень. Ільменська аномалія (І) встановлена дуже надійно: зміна знаку векторів Візе, збільшення східної компоненти горизонтального геомагнітного поля на 30-40% в трьох пунктах над віськовою зоною. Над віською аномалії виконано успішне МТЗ, завдяки якому на глибині 8 км було проведено вузький провідник меридіонального простягання із поздовжньою провідністю S більше 4000 См.

Існує гіпотеза про подальше продовження Ільменської аномалії на південь. Тут знаходиться Валдайський грабен із поздовжньою провідністю більше 2000 См, над віською якого вектори індукції змінюють напрямок. При наближенні до меридіану 32° Сх. д. відчувається складне накладення двох (або більше) аномалій. Гіпотетичні варіанти продовження аномалії та її з'єднання із Московсько-Тамбовською (МТ) аномалією показані пунктиром із знаками питання (Рис. 4.12). Таке з'єднання не суперечить поведінці дійсних векторів у пунктах спостережень, що описані в роботі [Варенцов та ін., 2012]. Сукупність векторів індукції і магнітний тензор у самій північній частині Барятинської аномалії (БАР) показує наявність порівняно невеликого аномального струму в Пн.-Пн.Зх. напрямку до можливого південного продовження Ільменської аномалії. Горизонтальний тензор M підтверджує таку можливість і виявляє разом із векторами індукції злегка звивисту трасу Барятинської аномалії від 55° до 52.8° Пн. ш. Далі на південь вона роздвоюється на дві значно більш інтенсивні аномалії: Курську (К), яка уходить на південний-схід, і після зсуву на 1 градус довготи на захід – північне продовження Кіровоградської аномалії (КіРАЕ), яке продовжується на Південь під осадовий чохол Дніпрово-Донецького Прогину (ДДП) і переходить далі у відому КіРАЕ, яка тягнеться до Чорного моря.

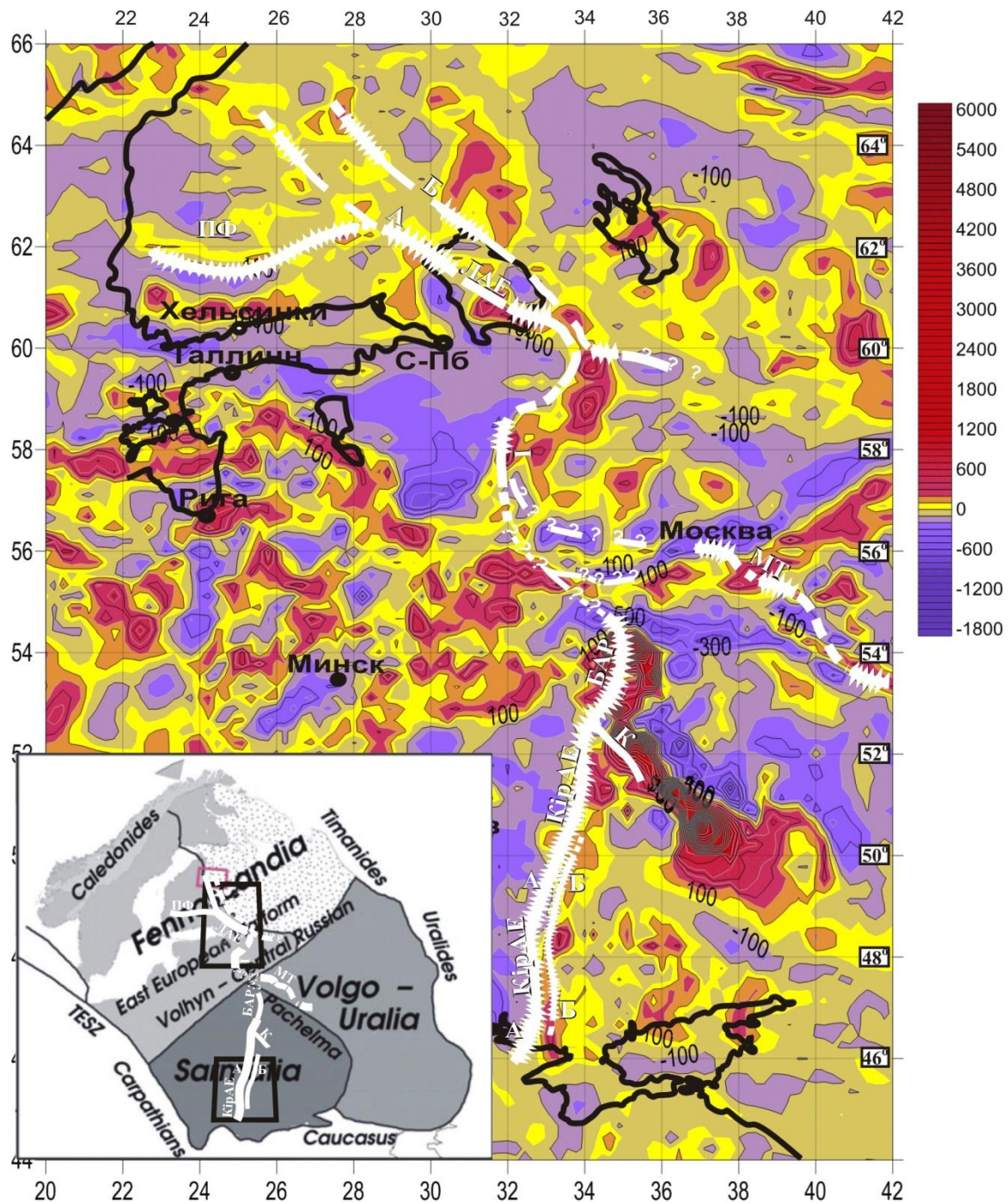


Рис.4.12. Транс-Європейський ланцюг аномалій електропровідності (ТЄЛАЕ) (дано білим кольором): Кіровоградська (КіРАЕ, провідники А і Б), Бяратинська (БАР із відгалуженнями К – Курська аномалія), Ладозько-Ільменська (ЛАЕ-І), Московсько-Тамбовська (МТ) і Південно-Фінляндська (ПФ) представлені на фоні карти аномалій постійного магнітного поля. На врізці зліва ТЄЛАЕ на фоні трьох сегментної карти Східно-Європейського кратону (СЄК), яка була запропонована С.В. Богдановою (адаптована із роботи [Vaittinen et al., 2012]). Двома трапеціями оконтурені зони залягання КіРАЕ і ЛАЕ.

4.4.3. Зіставлення із аномаліями постійного магнітного поля

Отриманий вище Транс-Європейський ланцюг аномалій (ТЄЛАЕ), що нанесений приблизно на трьохсегментну карту СЄК (вставка зліва на Рис. 4.12) і на карту аномалій постійного магнітного поля (Рис. 4.12). Карти побудовано в суттєво різних проєкціях, тому не можна очікувати повної подібності форм аномалій. У місцях, що забезпечені гарними спостереженнями, вони представлені суцільною безперервною лінією (на Рис. 4.12 – лінією із зазубринами). Там, де аномалії проведено приблизно, використовувались переривчасті лінії і у найбільш невизначених випадках – ряд знаків питання.

Аналіз просторового положення аномалій електропровідності по відношенню до аномалій постійного геомагнітного поля показує, що КірАЕ та дещо менш чітко ЛАЕ+І розміщуються в зоні переходу від позитивних аномалій постійного поля на сході до від'ємних аномалій на заході. Аномалії електропровідності слідує транс-кратонному лінеаменту аномального магнітного поля, який виділяється низкою дослідників у субмеридіональній смузі $\sim 30^\circ\text{-}34^\circ$ Сх. д. і простежується від Балтійського щита до Чорного моря [Глубинное строение..., 2004; Орлюк, Пашкевич, 2012]. Феномен асоціації магнітних аномалій із аномаліями електропровідності, пов'язаний із тектономагматичними процесами докембрійського минулого і визначається структурно-матеріальними комплексами, що сформовані в їх результаті. Можна припустити сполучення північної ланки аномалій електропровідності із південним за лінією градієнту магнітних лінеаментів і під областю Осницько-Мікашевичи-Московським вулканічним поясом, як це відбувається під Дніпрово-Донецьким перегином із КірАЕ і БАР. Це припущення виглядає певною мірою виправданим в рамках гіпотези [Алексанова та ін., 2011; Соколова и рабочая группа LADOGA, 2017; Минц, Соколова, 2018] про зв'язки провідників «А» ЛАЕ і БАР із графітизованими комплексами, які виділяють у [Mints et al., 2014, 2015] Вітебсько-Торопецькому та Брянському гранулітових поясах.

4.5. Карпатська аномалія електропровідності

Карпати покриті щільною мережею спостережень МВП, і більше ніж у 300 пунктах побудовано вектори індукції (Рис. 4.13). Ця карта добре відображає і сучасний стан вивченості регіону методом МВП. В останні 20 років на Карпатах виконано невелику кількість нових спостережень, причому деякі із них недоступні, оскільки окремі автори та організації «засекречують» дані спостережень.

Проаналізувавши представлену нижче карту можна зробити висновок про вивченість Карпатської аномалії методом МВП. Західні і Східні Карпати на території Словаччини (Чехословаччини), Польщі і України покриті мережею профілів із синхронними спостереженнями. Відстань між пунктами спостережень на профілях порядку 10 км, між профілями 30-50 км, що дозволяє трасувати вісь аномалії із похибкою 2-5 км на профілях і до 10 км між профілями. При цьому використовуються як вектори індукції, так і синхронні спостереження. У цілому на цій території геометричні параметри аномалії геомагнітних варіацій носять простий квазидвовірний характер. У Румунії пункти спостережень віддалені одне від одного на 20-50 км, у цих умовах похибка проведення вісі аномалії складає 10-25 км. На двох ділянках у районі зчленування Східних та Південних Карпат (зона Вранча) вектори ведуть себе суперечливо, що може бути зумовлено складною геоелектричною будовою або похибкою вимірів. Слід мати на увазі і мінливість векторів Візе в часі [Харин, 1981], особливо помітну в тектонічно активних регіонах при підготовці землетрусів, інтенсивних у цьому районі. На рис.4.13 Карпатська аномалія в зоні Вранча і північніше від неї проведена приблизно двома переривчастими лініями, у роботах [Stanika et al., 1999 та ін.] Карпатська аномалія представлена із розривом: південна частина зміщена від північної на 100 км на схід.

Слід зазначити, що для деяких профілів синхронних спостережень було виконано розділення поля на внутрішню і зовнішню частини за формулами Кертца і визначено положення еквівалентного лінійного струму, середня глибина

якого вийшла рівною 21 км (ця цифра є оцінкою максимально можливої глибини h_{\max} залягання центру аномальних струмів).

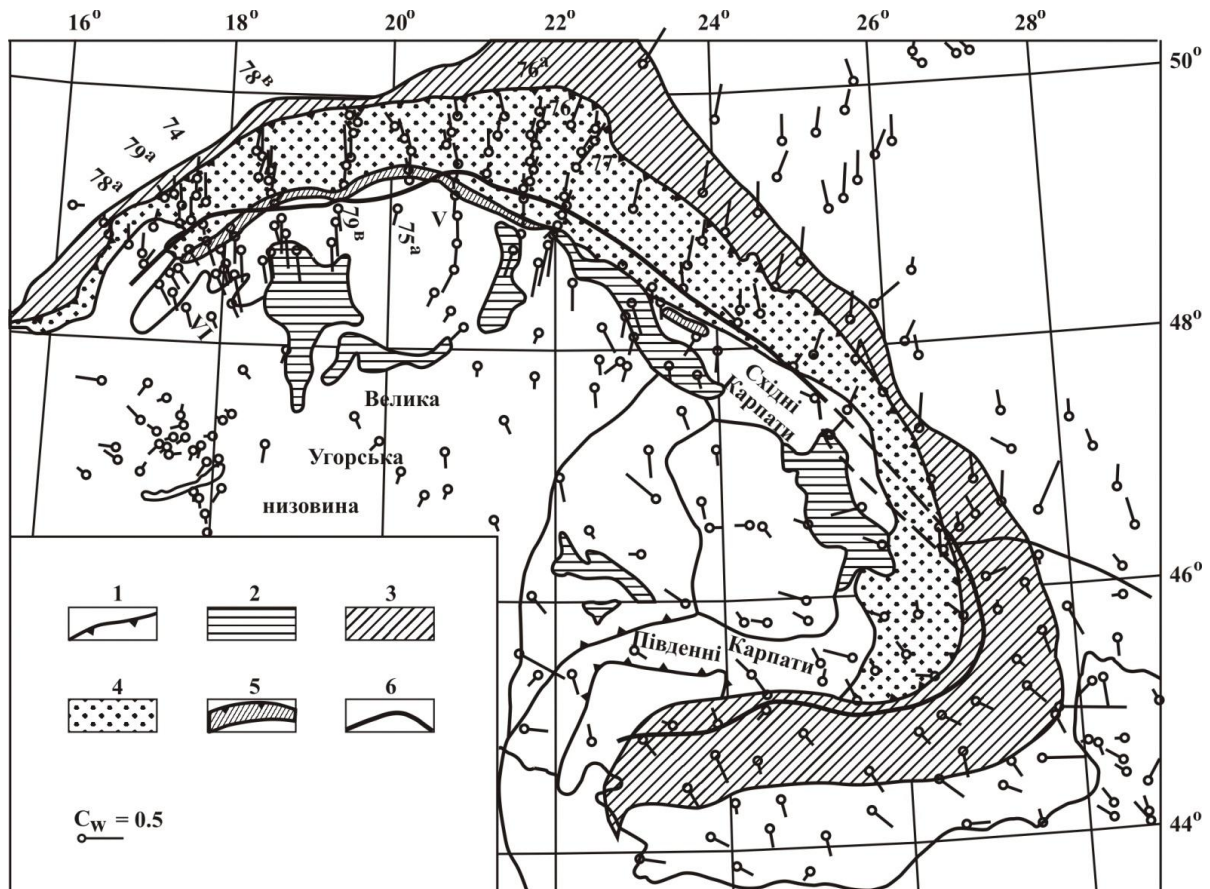


Рис. 4.13. Вектори індукції C_u (або вектори Візе C_w) на періоді 1800 с (інтервал 900 – 3600 с) і КАЕ на тектонічній схемі регіону: 1 – насуви; 2 – виходи неогенових вулканічних порід; 3 – Передкарпатський прогин; 4 – Зовнішні (флішеві) Карпати; 5 – Піенінський і Мармарошський стрімчаковий пояс; 6 – вісь Карпатської аномалії електропровідності. Профілі синхронних спостережень МВП позначені двома цифрами, що вказують рік спостережень, римські цифри – номери міжнародних геотраверсів.

Графіки зміни проекції вектору Візе на профілі, ортогональні простяганню Карпатської аномалії електропровідності, опубліковані в ряді робіт, зокрема [Рокитянский, Ингеров, 1999]. На профілях Західних і Північних Карпат спостерігається асиметрія кривих – північна гілка нижче південної. Першою причиною асиметрії є накладення аномального поля від Північно-Германсько-Польської аномалії геомагнітних варіацій, яка розміщена північніше, і від

Мораво-Сілезької аномалії, яка розміщена північно-західніше. Другою причиною є асиметрія прилеглих осадових утворень, більш провідних північніше аномалії в Передкарпатському прогині. На південному-сході Польщі в полосі 50-60 км виробничими організаціями виконано сотні магнітотеллуричних зондувань [Zytko, 1997; Stefaniuk et al., 2009], які показали, що докембрійський фундамент заглиблюється в південному напрямку із 5-7 км до 20 км. Сумарна поздовжня провідність осадових відкладень, які містять і шари вугленосних утворень, збільшується від перших сотень сіменсів у північній частині до перших тисяч сіменсів на південній границі виконаних робіт. Подібний результат отримано за даними МТЗ-МВП у Східних Карпатах в Україні [Рокитянский, Ингеров, 1999]. На профілях Берегово – Корець, Рахів – Корець і Селятин – Чернівці (рис. 4.14) в Українських Карпатах аномальне поле, що характеризується векторами Візе, спадає в північному напрямку дуже повільно, що, очевидно, зумовлено двома причинами: накладенням аномальних полів від осадових порід Передкарпатського прогину і більш провідною астеносферою в південно-західній частині профілів під Угорської западиною.

На Рис. 4.14 можна помітити, що відстань від точки зміни знаку (вісі аномалії) до різнополярних екстремумів складає приблизно 20-25 км, тоді як для Кіровоградської аномалії воно дорівнює 30-35 км (див. Рис. 4.2). Ця величина визначає максимально можливу глибину залягання аномалії. Для КіРАЕ більш ймовірна її електроно-провідна природа. КАЕ знаходиться в Альпійському орогені, в якому активні тектонічні процеси, пов'язані із вулканізмом відбувалися зовсім нещодавно, можуть продовжуватися і зараз, наприклад, у вигляді регіонального метаморфізму [Рокитянский, 1975]. Для цієї аномалії більш вірогідна 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.

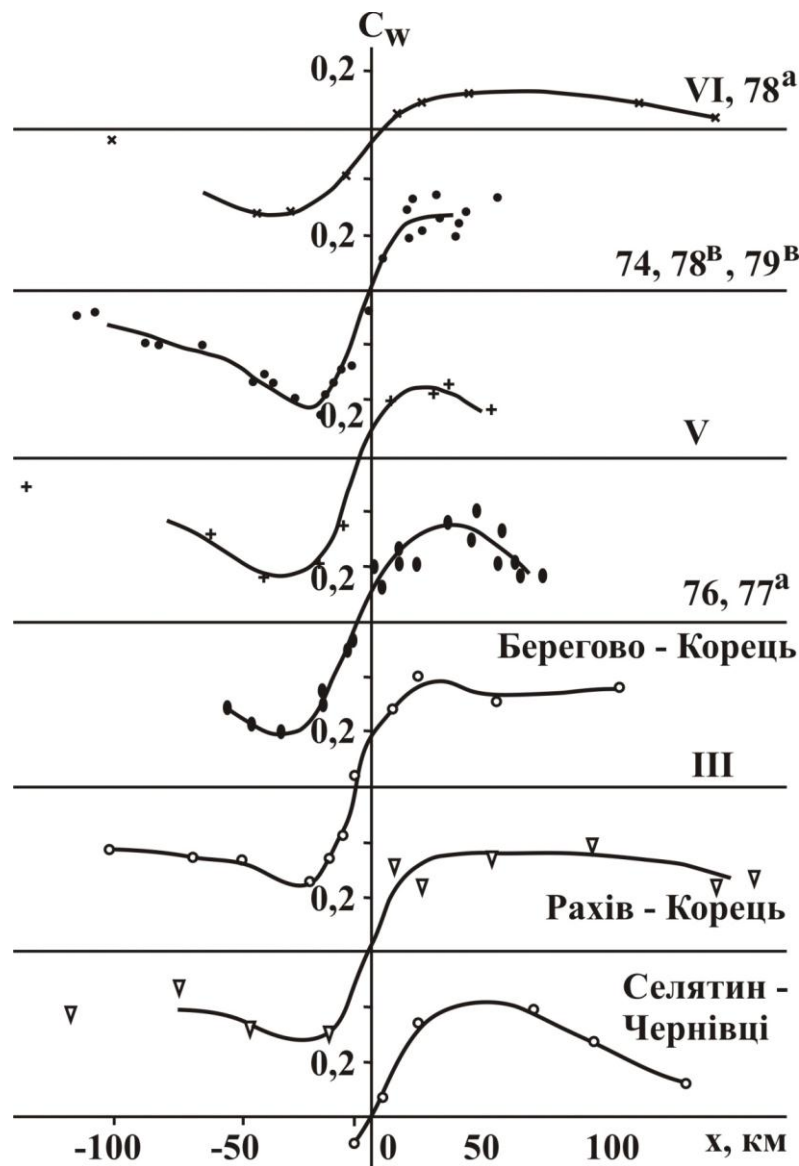


Рис. 4.14. Профільні графіки проєкцій векторів Візе на напрямки профілів, перпендикулярних до вісі Карпатської аномалії на періоді 1800 с. Позначення профілів як на рис. 4.13. (Рокитянский и Ингеро́в, 1999).

4.5.1. МТЗ над осью зоною Карпатської аномалії

Для формування більш обґрунтованих суджень про фізико-хімічну природу аномалій електропровідності, її геологічної інтерпретації і оцінки перспектив практичного використання принципове значення має визначення істинної глибини залягання, що може бути виконано методами зондування: МТЗ, ЧЗ (частотне зондування), ВЕЗ (вертикальне електричне зондування), ДЕЗ (дипольне електричне зондування). МТЗ над віссю КАЕ, що виконано в трьох країнах: (Чехо)Словаччині, Україні, Румунії. Розглянемо їх.

Словаччина. Уздовж міжнародного геотраверсу VI в кінці 1960-их було виконано МТЗ із кроком 30-35 км. Один із пунктів попав на вісь аномалії (рис. 4.15-а). Розходження рівня і форми кривих МТЗ в різних азимутах тут виявилось відносно невеликим, на періодах 25-150 с спостерігається спадна ділянка кривих МТЗ, по якій визначається провідний шар на глибині 20 км з інтегральною провідністю близько 1000 См. Коровий провідник на цій же глибині спостерігався і в інших пунктах геотраверсу VI [Praus, 1971]. Магнітоваріаційні дані в районі геотраверсу VI свідчать про протікання аномального струму у відносно вузькій полосі (максимально можливі глибина - 25 км, ефективна ширина – 50 км [Jankowski et al., 1985], магнітотеллуричні дані в пунктах, що розміщені із рідкісним для кінцевих висновків кроком, дають більш широкий відносно ізотропний провідник.

Українські Карпати. І.І. Рокитянський ще на початку 1970-х років розглядав проведення зондувань над віссю КАЕ як пріоритетну задачу геоелектрики, однак ця ідея не отримала підтримки через труднощі її реалізації. Вісь аномалії проходить по гірським Карпатам, що характеризуються розвинутим поперечним розчленуванням, глибокими вузькими долинами струмків і рік, крутими сильно зволженими схилами, слабо розвиненою мережею проїзних доріг.

Перші МТЗ в Українських Карпатах було отримано у 1973 і 1976 рр. аналоговою апаратурою. Поздовжні криві будувались легко, поперечні мали значний розкид. Виявилось, що в інтервалі періодів 50-2000 с поздовжні і поперечні криві ведуть себе дзеркально протилежно: поздовжня крива має глибокий мінімум, а поперечна – високий максимум, причому різниця за ρ_k перевищує порядок (рис. 4.15-в). Із практики магнітотеллуричної обробки відомо, що максимальні криві зазвичай будуються легше і стійкіше. Над віссю Карпатської аномалії спостерігається протилежна картина. Стійкість повздовжньої кривої ми пояснюємо стійкістю струму у аномалії, який формується на великій території (ефект регіонального згладжування в «області значущості» [Рокитянский, 1975]), а нестійкість поперечної кривої локальним формуванням

електричного поля і його сильною залежністю від поляризації варіацій. У 1987-1988 рр. було виконано спостереження цифровою апаратурою, які підтвердили і доповнили отримані раніше результати, всі вони описані у роботі [Рокитянский, Ингеро́в, 1999]. Аналіз кривих показав їх чітко виражену зональність, причому границі зон паралельні генеральному простяганню Карпат і обмежені в основному відомими тектонічними границями. 30 кривих МТЗ згруповано по шести поздовжнім зонам, із яких третя – від Закарпатського глибинного розлому до вісі КАЕ – розділена на чотири підзони, які представлені на рис. 4.15-в. Поздовжні криві МТЗ несуть інформацію про глибину корового провідника і його сумарну поздовжню провідність, поперечні криві майже не відчують корового провідника, тобто останній є поперечно-прозорим [Рокитянский, 1988]. За сукупністю 12 поздовжніх кривих рис. 4.15-в визначено середню глибину верхньої кромки основного провідного тіла КАЕ в південно-східній частині Українських Карпат, що дорівнює 12 ± 4 км. У роботі [Рокитянский, Ингеро́в, 1999] підібрано модель, яка задовільно описує усю сукупність даних МВП-МТЗ.

Румунія. МТЗ виконувались із кінця 1970-их до 1990-их по ряду профілів, із яких не менше 8 перетинали КАЕ (рис. 8-а). Результати описано частинами у багатьох статтях, в яких робиться акцент на тектонічні висновки, а отримані МТЗ дані представлені фрагментарно. Автори [Stanica et al., 1990] пишуть, що використовували цифрову реєстрацію і обробку із відбракуванням результатів за коефіцієнтами когерентності, однак фазові дані ми не бачили ні в одній статті. На одному із детальних профілів п'ять пунктів МТЗ (номери 5-9) автори [Pinna et al., 1992] позначили як ті, що лежать над КАЕ. Ці криві показано на рис. 4.15-г. Всі вони окрім кривих у пункті 9 мають довгі спадні гілки, що вказують на існування корового провідника на глибині близько 10 км із сумарною поздовжньою провідністю більше 5000 См. Пункт 2 також слід вважати таким, що лежить над КАЕ. Відсутність систематичного розходження поперечних та поздовжніх кривих над осьовою зоною інтенсивної аномалії МВП здається дещо дивним.

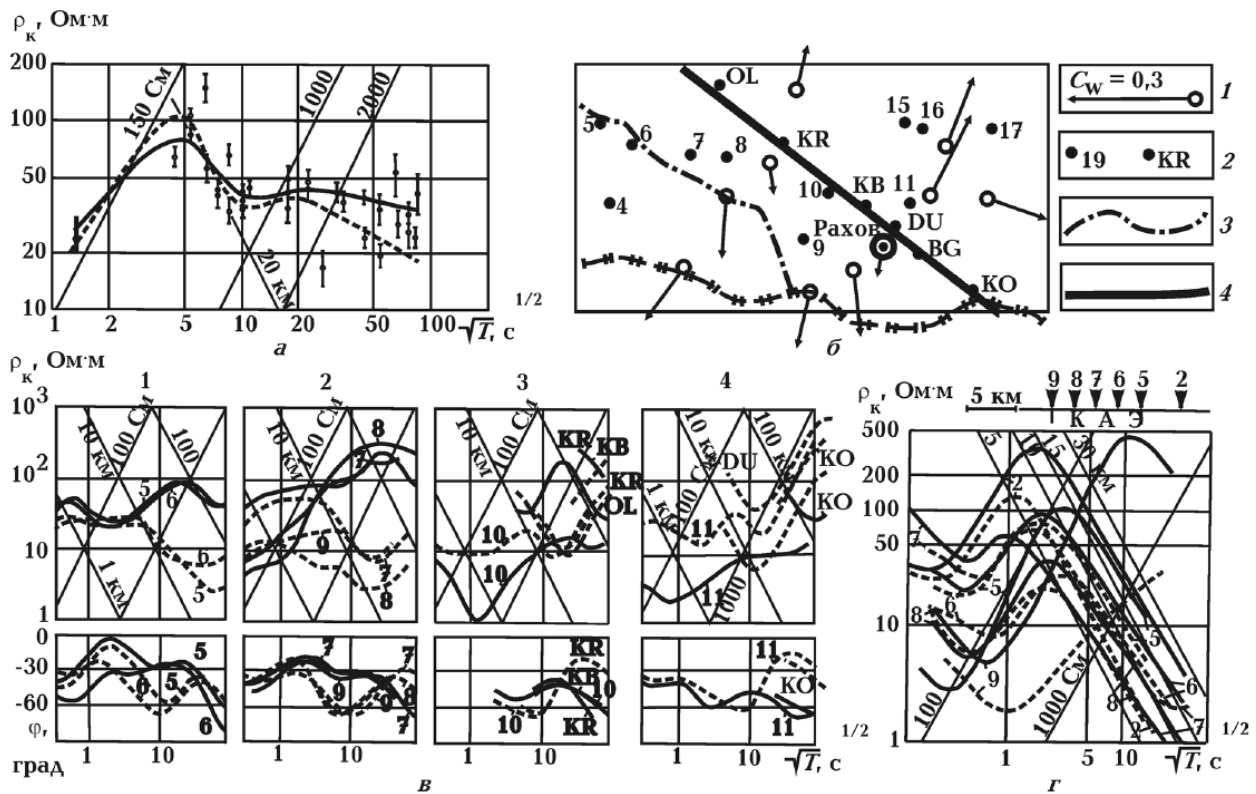


Рис. 4.15. Результати МТЗ на Карпатській аномалії. Суцільні лінії – поперечна поляризація, пунктир – поздовжня. а) Західні Карпати, геотраверс VI [Praus, 1971]. б) Карта частини Українських Карпат: 1 – пункти МВП і вектори V_{ize} ; 2 – пункти МТЗ, цифрами позначено цифрові спостереження ЦЕС-2, буквами – аналогові спостереження; 3 – Закарпатський глибинний розлом; 4 – вісь КАЕ. в) Криві МТЗ на Українських Карпатах [Рокитянский, Ингеров, 1999]. г) Криві МТЗ над осьовою зоною КАЕ в Румунії [Pinna et al., 1992].

Розглядаючи задачі майбутніх досліджень, слід охарактеризувати зроблене. Векторів індукції отримано багато, їх вимірювання розтягнуто більш ніж на півстоліття. Обчислення аномального поля в горизонтальних компонентах майже не проводилось, ймовірно, через відсутність загальноприйнятої базисної обсерваторії. Головною задачею майбутніх досліджень є дослідження глибини КАЕ методами зондування. На Українських Карпатах над віссю КАЕ виконано 11 МТЗ, за сукупністю поздовжніх кривих визначена глибина верхньої кромки аномалії 12 ± 4 км. Поперечні криві не «відчувають» аномалію («поперечно-прозора аномалія»), що пояснюється тим, що ширина аномалії менша ніж глибина на ділянці вимірів. Ще 5 МТЗ над віссю КАЕ виконано в Румунії [Pinna et al.,

1992], було отримано глибину 10 ± 5 км і оцінка сумарної провідності більше 5000 См. Для розгортання вимірювань глибини до верхньої кромки КАЕ у 2016 році нами було обґрунтовано міжнародний проект SECAD (Study of the Electrical Conductivity Anomaly Depth), представлений на ЕМІВ-2016. Проект було розглянуто, але асигнування ще не виділено.

Висновки до розділу 4

1. Детальний аналіз результатів інтерпретації магнітотеллуричних даних, що виконано раніше в межах Кіровоградської аномалії, показав наявність у них розходжень і протиріч. Причинами цього є складність об'єкту дослідження, неповнота даних спостережень і перебільшення можливостей двомірного і трьохмірного моделювання, яке призвело, у деяких випадках, до не зовсім обґрунтованих модельних представлень, які не слідують із спостережень.

2. Враховуючи складність геоелектричної будови Землі і використовуваного електромагнітного поля та багатозначність оберненої задачі, а також виходячи із фізико-математичного аналізу можливостей різних модифікацій геоелектрики, в даному розділі пріоритет віддається даним МВП (у комплексі із відомими даними МВЗ і МТЗ), що достовірно визначають існування та місцезнаходження аномалії, а також деякі її параметри. Метод МТЗ у межах його можливостей націлений на визначення глибини аномалії, і на дослідження слабоаномальних горизонтально-шарованих структур.

3. Цілеспрямовано виконані спостереження довели продовження Кіровоградської аномалії на південь під води Чорного моря.

4. Зіставлення Кіровоградської аномалії електропровідності із аномаліями постійного магнітного поля показало їх певний зв'язок. Для визначення ступеню універсальності отриманого взаємозв'язку було проаналізовано аномалії Східноєвропейської платформи до Балтійського щита включно. Вийшов ланцюг коротких аномалій (що перекриваються екрануючими осадовими басейнами) із двома довгими, гарно вивченими схожими аномаліями на кінцях – Кіровоградською і Ладозькою. Цей матеріал дав підставу для припущення про

існування (можливо тільки в минулому) єдиної Транс-Європейської аномалії електропровідності. Ця ідея прийнята тектоністами докембрію як одна із підстав для опису геологічних процесів у далекому минулому.

5. Виконано огляд ЕМ досліджень Карпатської аномалії і обґрунтовано задачі подальших робіт. Враховуючи можливе практичне використання Карпатської аномалії, необхідне детальне дослідження глибини її верхньої кромки методами зондування – МТЗ, про що було складено Проект міжнародних досліджень SECAD (Study of the Electrical Conductivity Anomaly Depth).

Перелік використаних джерел до розділу 4

1. Азаров, Н.Я., Анциферов, А.В., Шеремет, Е.М., Глевасский, Е.Б., Есипчук, К.Е., Кулик, С.Н., Бурахович, Т.К., Пигулевский, П.И., Николаев, Ю.И., Николаев, И.Ю., Сетая, Л.Д., Захаров, В.В., Курлов, Н.К. (2006), *Геолого-геофизическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита*. – Киев: Наук. думка, 196 с.

2. Алексанова, Е.Д., Баглаенко, Н.В., Варенцов, И.М., Куликов, В.А., Логвинов, И.М., Лозовский, И.Н., Пушкарев, П.Ю., Соколова, Е.Ю., Соколов, Н.С., Тарасов, В.Н., Шустов, Н.Л., Яковлев, А.Г., Яковлев, Д.В. (2011), Сопоставление геофизических полей в зоне Кировоградской и Курской аномалий электропроводности. *Тезисы докладов Международной конференции «Современное состояние наук о Земле» им. В.М. Хаина*, Москва, Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, с. 33-37.

3. Анциферов, А.В., Шеремет, Е.М., Глевасский, Е.Б., Кулик, С.Н., Есипчук, К.Е., Пигулевский, П.И., Кривдик, С.Г., Бурахович, Т.К., Анциферов, В.А., Сетая, Л.Д., Николаев, Ю.И., Николаев, И.Ю., Цымбал, С.Н., Клочков, В.М., Шварц, Г.А., Безвинный, В.П., Гаценко, В.А. (2008), *Геолого-геофизическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита*. Киев: Наук.думка, 305с.

4. Баглаенко, Н. В., Варенцов, И. М., Гордиенко, В. В., Жданов, М. С., Кулик, С. Н., Логвинов, И. М. (1996), Геоэлектрическая модель Кировоградской аномалии по геомагнитным данным. *Физика Земли*. №4. – С.87-98.

5. Белявский, В.В., Кулик, С.Н. (ред.) (1998), *Геоэлектрическая модель тектоносферы Евразийского складчатого пояса и сопредельных территорий.* – Киев: Знання, 264с.
6. Бердичевский, М.Н., Завадская, Т.Н., Чернявский, Г.А. (1970), Магнитотеллурическое зондирование в вытянутых впадинах. *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли.* №12. – С. 76-80.
7. Бурахович, Т.К., Кулик, С.Н. (2007), Трехмерная модель Кировоградской аномалии электропроводности. *Геофиз. журн.* **29**, №1. С.45-55.
8. Быстревская, С.С., Гавриш, В.К., Недошовенко, А.И. и др. (1985), Космотектоническая карта Украины и ее прогнозное значение. *Геол. Журн.* 45. № 6. С. 18-24.
9. Варенцов, Ив.М., Ковачикова, С., Куликов, В.А., Логвинов, И.М., Трегубенко, В.И., Яковлев, А.Г., Рабочая группа KIROVOGRAD. (2012), Синхронные магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования на западном склоне Воронежского массива. *Геофиз. журнал.* №4. 34. С. 90-107
10. Шаров, Н.В. (ред.) (2004), *Глубинное строение и сейсмичность Карело-Кольского региона и его обрамления*, Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 365С.
11. Гордиенко, В.В., Гордиенко, И.В., Завгородняя, О.В., Ковачикова, С., Логвинов, И.М., Тарасов, В.Н., Усенко, О.В. (2005), *Украинский щит (геофизика, глубинные процессы)*. Киев: ИГФ НАНУ. 210с.
12. Грачев, А.Ф. (1987), *Рифтовые зоны Земли*. М.: Недра. С. 285с.
13. Дьяконова, А.Г., Ингеров, А.И., Рокитянский, И.И. (1986), *Электромагнитные зондирования на Восточно-Европейской платформе и Урале.* – Киев: Наук. думка, 140 с.
14. Жамалетдинов, А.А., Колесников, В.Е., Скороходов, А.А., Шевцов, А.Н., Нилов, М.Ю., Рязанцев, П.А., Шаров, Н.В., Бируля, М.А., Киряков, И.А. (2018), Результаты электропрофилирования на постоянном токе в комплексе с АМТЗ по профилю, пересекающему Ладожскую аномалию. *Труды КарНЦ РАН.* №2. Сер. Геология Докембрия. С. 91-110. DOI: 10.17076/гео636 (РИНЦ)

15. Жамалетдинов, А.А., Кулик, С.Н. (2012), Крупнейшие аномалии электропроводности мира. *Геофиз. журнал*, Т. 34, № 4. С. 22–39.
16. Ингеров, А.И., Бугримов, Л.П. Рокитянский, И.И., Ромашкина, А.И. (1986), *Отчет об исследованиях МТЗ по изучению геоэлектрического разреза земной коры по геотраверсу VIII Килия – Кривой Рок – Харьков за 1984 – 85 гг.* Днепропетровск: С. 264.
17. Ингеров, А.И., Бугримов, Л.П., Колдунов, А.А., Попов, В.М., Рокитянский, И.И., Дзюба, К.И., Лысенко, Е.С., Рокитянская, Д.А. (1988), Результаты МТЗ на участке Килия – Кривой Рок – Харьков. *Мон.: Литосфера Центральной и Восточной Европы.* – Киев: Наук. думка, С. 145-150.
18. Ковачикова, С., Логвинов, И.М., Тарасов, В.Н. (2005), Кировоградская аномалия. В книге В.В. Гордиенко и др. *Украинский щит (геофизика, глубинные процессы).* – Киев: Корвін пресс, С. 39-51.
19. Корепанов, В.Е., Свенсон, А.Н. (2007), *Высокоточные неполяризуемые электроды для наземной геофизической разведки.* – Киев: Наукова думка, С. 98.
20. Корепанов, В.Е., Трегубенко, В.И. (2009), Особенности построения и тенденции развития современной аппаратуры для магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований. *Геофиз. журн.* **31**, №4. – С. 181-190
21. Логвинов, И.М. (2012), Геоэлектрические характеристики земной коры и мантии юго-запада Восточно-Европейской платформы и Карпат. *Диссертация на соискание ученой степени доктора геологических наук по специальности 04.00.22 – геофизика.* Киев: ИГФ НАНУ, 306 с.
22. Логвинов, И.М., Тарасов, В.Н. (2005), Геоэлектрическая 2D-модель Кировоградской аномалии электропроводности. *Геофиз. журн.* **27**, №5. – С. 754-769.
23. Минц, М.В., Соколова, Е.Ю., Рабочая группа LADOGA. (2018), Объемная модель глубинного строения Свекофеннского аккреционного орогена по данным МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования. *Труды Карельского НЦ РАН, Сер. Геология докембрия.* №2, С. 34-61. DOI: 10.17076/geo656

24. Орлюк, М.И., Пашкевич, И.К. (2012), Глубинные источники региональных магнитных аномалий и связь с трансоровыми разломами. *Геофиз. журнал*. №4, т.34. С.224-234.
25. Старостенко, В.И., Гинтов, О.Б. (ред.) (2018), *Очерки геодинамики Украины*. Киев: Институт геофизики НАНУ, 466 с
26. Пигулевский, П.И. (2012), Строение и минерагения земной коры и верхней мантии восточной части Украинского щита по результатам комплексных геолого-геофизических исследований. – *Рукопись Диссертация на соискание ученой степени доктора геологических наук по специальности 04.00.22 – геофизика*. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко. Киев.: 382с.
27. Рокитянский, И.И., Логвинов, И.М., Лугинина, Н.А. (1968), Магнитовариационное профилирование на Украинском щите. *Изв. АН СССР, Физика Земли*. №3. – С. 100-106.
28. Рокитянский, И.И., Кулик, С.Н., Логвинов, И.М., Шуман, В.Н. (1974), Аномалии электропроводности в центральной Украине. *Геофиз. сб. АН УССР*, вып. 60, 29-36.
29. Рокитянский, И.И. (1975), *Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования*. – Киев: Наук. думка. 279 с.
30. Рокитянский, И.И., Харченко, С.П. (1978), Опыт магнитотеллурического зондирования на пересечении Кировоградской аномалии с Днепровско-Донецкой Впадиной *Геофиз. сб. АН УССР*. 86. С.61-67.
31. Рокитянский, И.И., Кулик, С.Н., Логвинов, И.М., Рокитянская, Д.А. (1982), Аномалии геомагнитных вариаций на северо-западе Европейской части СССР. *Изв.АН СССР, Физика Земли*, №11, с. 101-106.
32. Рокитянский, И.И. (1988), Фундаментальные модели аномалий электропроводности (1-D, 2-D). *Геофиз. журн.* **10**, №3. – С. 21–28.

33. Рокитянский, И.И., Ингеров, А.И. (1999), Электромагнитные исследования Карпатской аномалии электропроводности. *Геофиз. журн.* **21**, №4. – С. 59–70.
34. Соколова, Е.Ю. и рабочая группа ЛАДОГА. (2017), Эксперимент синхронного МТ/МВ зондирования Ладожской аномалии электропроводности: новые свидетельства о структуре коры юго-востока Балтийского щита. В кн.: *Глубинное строение и геодинамика Приладожья. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Институт геологии Карельского научного центра РАН*. Петрозаводск. С. 205-214.
35. Хаин, В.Е. (2001), *Тектоника континентов и океанов (год 2000)*. Москва. Научный мир. 604 с.
36. Харин, Е.П. (1981), Изменчивость передаточных функций электромагнитного поля Земли во времени. *Геофиз. журн.* Вып. 87. – С. 65–67.
37. Artemieva, I.M., Shulgin, A. (2015), Is the Proterozoic Ladoga Rift (SE Baltic Shield) a rift? *Precambrian Research*. 259. 34–42
38. Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I., Tregubenko, V.I. (1999), Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth Planets Space*. **51** – P. 1127-1133.
39. Jankowski, J., Tarlovski, Z., Praus, O., Pecova, J., Petr, V. (1985), The results of deep geomagnetic sounding in the West Carpathians. *Geophes. J.R. Astr. Soc.*, **80**, P. 561–574.
40. Korja, T., Engels, M., Zhamaletdinov, A.A., Kovtun, A.A., Palshin, N.A., Smirnov, M.Yu., Tokarev, A., Asming, V.E., Vanyan, L.L., Vardaniants, I.L. & the BEAR Working Group. (2002), Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield. *Earth Planets Space*. 54. 535–558.
41. Mints, M.V., Bush, W.A., Ageev, S.N. (2014), Bryansk-Kursk-Voronezh intra-continental collisional orogen (East European craton). *Geodynamics and Tectonophysics* 5 (3), 717–742. doi:10.5800/GT-2014-5-3-0151.
42. Mints, M.V., Dokukina, K.A., Konilov, A.N., Philippova, I.B., Zlobin, V.L., Babayants, P.S., Belousova, E.A., Blokh, Yu.I., Bogina, M.M., Bush, W.A.,

Dokukin, P.A., Kaulina, T.V., Natapov, L.M., Piip, V.B., Stupak, V.M., Suleimanov, A.K., Trusov, A.A., Van, K.V., Zamozhniaya, N.G., (2015), *East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure*. Geological Society of America Special Paper, 510, 433 <http://dx.doi.org/10.1130/2015.2510>.

43. Pajunpaa, K. (1987), Conductivity anomalies in the Baltic Shield in Finland. *Geophys. J.R. astr. Soc.* 91, 657-666

44. Pinna, E., Soare, A., Stanica, D., Stanica, M. (1992), Carpathian conductivity anomaly and its relation to deep structure of the substratum. *Acta Geod. Geoph. Mont. Hung.*, **27**, №.1, P. 35–45.

45. Praus, O. (1971), Electric conductivity of the Earth in Czechoslovakia studied by magnetotelluric and geomagnetic methods. *Geophys. Final report XV Ass.IGGU*, Praha: Acad., P. 162–186.

46. Stanica, D., Stanica, M., Pinna, M. (1990), Magnetotelluric soundings in the Eastern Carpathians – Hurghita area. *Rev. roum. Geophysique, Bucarest*, **34**, P. 89-95.

47. Stanica, M., Stanica, D., Marin-Furnica, C. (1999), The placement of the Trans-European Suture Zone on the Romanian territory by electromagnetic arguments. *Earth Planets Space*, **51**, P. 1073–1078.

48. Stefaniuk, M., Ostrowski, G., Targosz, P., Wojdyla, M. (2009), Some problems of magnetotelluric and gravity structural investigations in the Polish Eastern Carpathians. *Geologia*, **35**, №.4/1, P. 7–46.

49. Vaitinen, K., Korja, T., Kaikkonen, P., Lahti, I., Smirnov, M.Yu. (2012), High-resolution magnetotelluric studies of the Archaean- Proterozoic border zone in the Fennoscandian Shield, Finland. *Geophys. J. Int.* 188. 908–924.

50. Zytka, K. (1997), Electrical conductivity anomaly of the Northern Carpathians and the deep structure of the orogen. *Ann. Soc. Geol. Polon.*, **67**, P.25-43.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ НА МІСЯЦІ

Із 1959 по 1976 р. на Місяць для наукових досліджень було відіслано 54 космічних кораблі, із них 18 здійснили м'яку посадку, на Землю доставлено 400 кг місячних порід, багато тисяч фотографій і телевізійних записів, великий об'єм записів сейсмографів, магнітометрів, вимірів гравітаційного поля і теплового потоку.

У середині 70-их років зусилля космічних держав переключились на дослідження Марсу, Венери, Юпітеру та його супутників, геофізичні виміри на Місяці було майже зупинено. Із початку 21 століття планується активізація досліджень на Місяці, в яких окрім США і Росії приймають участь Китай, Японія, Європейське космічне агентство, Індія.

У 2008 р. було оголошено про науковий проект «Луна-Глоб», реалізація якого повинна була здійснюватись під час запланованої експедиції космічного корабля на Місяць. Одна із складових проекту передбачала експериментальні магнітометричні дослідження. Для цього планувалось залучити філіал Львівського відділення Інституту космічних досліджень НАН України, як організацію, яка забезпечувала проект сучасними високоточними магнітометрами (автор В.Є.Корепанов), а також Інститут геофізики НАН України для уточнення методики місячних експериментальних магнітоваріаційних вимірів і подальшого аналізу даних – як організація, що має значний досвід подібних досліджень у земних умовах (проф. І.І. Рокитянський). Автору дисертаційної роботи, як аспіранту проф. І.І. Рокитянського, було запропоновано включити дослідження на Місяці в тематику дисертаційної роботи. До 2010 року відповідні дослідження було виконано, їх результати висвітлено у 2 наукових публікаціях і відіслано в Інститут космічних досліджень. Однак місячна місія була відкладена виконавцями на невизначений строк. Перед написанням дисертації результати, отримані у 2010 р., були доповнені новими даними та ідеями, все це представлено у даному розділі дисертаційної роботи.

5.1. Формування електромагнітних полів на Місяці

Для вивчення глибинної електропровідності Місяця, як і Землі, використовуються природні електромагнітні (ЕМ) поля, що збурюються сонячним вітром. Але на Місяці немає атмосфери і глобального магнітного поля, тому високопровідна плазма сонячного вітру безпосередньо зіштовхується із місячною поверхнею і поглинається нею. Сонячний вітер має дуже високу анізотропну електропровідність (близько 10 См/м – поперечна до магнітного поля компонента і 10^4 - 10^5 См/м – поздовжня) і електричне поле в ньому практично дорівнює нулю.

5.1.1. Електрична мода

У системі координат, що пов'язана із Місяцем, з'являється електричне поле $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e$. Вважаючи $V = 400$ км/с і $B_e = 5$ нТл, отримуємо $E \approx 0,002$ В/м, та інтегруючи по діаметру Місяця отримуємо різницю потенціалів ΔU , прикладену до Місяця, що дорівнює ≈ 7000 Вольт [Рокитянский, Терешин, 2010-а]. У концентрично шарованому Місяці виникає полоїдальна система струмів із відмінними від нуля радіальною та меридіональною компонентами (вісь симетрії системи спрямована уздовж вектору \mathbf{E}) і відповідно тороїдальне вторинне внутрішнє (індекс і) магнітне поле \mathbf{B}_{it} , що має тільки азимутальну компоненту (пунктир на рис. 5.1-а). Відповідно наявним даним і представленням [Космохимия, 1975; Галкин, 1978] найбільш високий питомий опір має верхній шар Місяця і саме він, будучи «підключеним» послідовно до внутрішніх більш провідних шарів, визначає сумарний полоїдальний струм електричної моди і \mathbf{B}_{it} , що утворене ним.

Нижче представлено наближені розрахунки тороїдального магнітного поля, яке можна очікувати за різного опору верхнього найбільш високоомного шару. Самий верхній шар Місяця – реголіт. Його зразки було доставлено на Землю і вивчено в лабораторіях, його питомий опір дорівнював $10^7 - 10^{10}$ Ом·м за різними оцінками, причому не можна виключити, що «in situ» ці значення

виявляться іншими. Потужність реголіту 2 - 12 метрів, нижче залягають брекчії, вивержені породи різного складу та віку. У всіх можна припустити високий опір. Швидкість сейсмічних хвиль у них різко зростає від унікально низьких 100 м/с в реголіті до 4-6 км/с в низах кори на глибині декількох десятків кілометрів і нижче кори до 6-9 км/с. Середня потужність кори 60 км [Галкин, 1978]. Нещодавній, 2012 року, політ 2х близнюків супутників GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory) із удосконаленою гравіметричною зйомкою показав, що потужність місячної кори коливається від 34 до 43 км. Зйомка також виявила багато мілкомасштабних (і, відповідно, неглибоких) гравітаційних аномалій, слабо корелюючих із поверхневою топографією [Wieczorek et al., 2013]. Природу цих аномалій ще не пояснено, але те, що вони свідчать про горизонтальні неоднородності кори і верхньої мантії Місяця, сумнівів не виникає. Яка температура, пористість, флюїдонасиченість порід місячної кори і верхньої мантії – певних даних про це немає.

Для попередньої оцінки порядку величини \mathbf{V}_{it} припустимо, що середній питомий опір верхнього $h_1 = 100$ км шару дорівнює $\rho_1 = 10^7$ Ом·м. (Це дуже великий опір. На Землі найвищі опори земної кори, що виявлено методами геоелектрики на стародавніх щитах, не перевищують 10^5 Ом·м). На Місяці породи глибше 100 км будемо вважати значно більш провідними в порівнянні із верхнім шаром і, відповідно, не впливаючими помітним чином на формування сумарного струму. Поперечний (радіальний) опір такого шару $\rho_{r1} = \int \rho_1 \cdot dr \approx \rho_1 h_1 = 10^{12}$ Ом·м², і після ділення на площу шару ($2\pi a^2 = 1897 \cdot 10^{10}$ м², де $a = 1738$ км – радіус Місяця) отримуємо опір R двох послідовних напівсферичних шарів, що дорівнює всього близько 0,1 Ом. Звідси оцінка сумарного струму $J = \frac{\Delta U}{R} \approx \frac{7000\text{В}}{0.1\text{Ом}} = 70000$ А. Цей струм утворює на приєкваторіальній частині поверхні Місяця магнітне поле $\mathbf{V}_{it} = \mu_0 \frac{J}{2\pi a} \approx 8 \cdot \text{нТл}$. Вимірювані на Місяці магнітні поля приблизно такого ж порядку величини. Якщо середній питомий опір верхнього 100-кілометрового шару ρ_1 прийняти рівним 10^8 Ом·м, то тороїдальне магнітне поле складає 0,8нТл - також цілком вимірювана величина.

Якщо вдасться показати із спостережень, що тороїдальне поле менше деякої величини, то це відразу дасть нижню оцінку поперечного опору ρ_{r1} верхнього високоомного шару Місяця. Цей результат представляє великий науковий, і в майбутньому, ймовірно, і практичний інтерес.

Отже, за нашими оцінками вийшло, що тороїдальне поле може давати відчутний внесок у спостережене на Місяці магнітне поле, особливо, якщо існують локальні канали або зони пониженого опору, на існування яких вказують численні непрямі дані (неоднорідність шару реголіту, дані сейсмології про існування неоднорідного розподілу вогнищ землетрусів, як приливної, так і тектонічної природи, дані гравіметрії про наявність інтенсивних неоднорідностей щільності в корі і мантії Місяця, структура рельєфу, локальне витікання газів глибинного походження та інші явища).

5.1.2. Магнітна та електрична моди на різних ділянках місячної орбіти

Зміни міжпланетного магнітного поля $\Delta\mathbf{V}_e$ індукують у провідних шарах Місяця вихрові тороїдальні струми із їх вторинним внутрішнім полоїдальним магнітним полем \mathbf{V}_{ip} (Рис. 5.1-б) – магнітна мода TE. Віссю симетрії полів цієї моди є напрямок $\Delta\mathbf{V}_e$, який у загальному випадку не співпадає із напрямками \mathbf{V}_e і \mathbf{E} , тобто із віссю симетрії полів кондуктивної моди. Варіанти співвідношення симетрій двох мод на поверхні Місяця теоретично дуже різноманітні, - деякі із них представлені на Рис.5.2. Роздільно моди не спостерігались.

На Рис. 5.2 магнітні поля двох мод представлено разом. Вісь симетрії електричної моди і вектор \mathbf{E}_p на Рис. 5.1-а були спрямовані уверх, на Рис. 5.2 вони перпендикулярні площині рисунка (кружечок із точкою – до нас), поле $\Delta\mathbf{V}_e$ спрямовано довільно у площині малюнку, на Рис. 5.2 представлені 3 різні напрямки $\Delta\mathbf{V}_e$, всі у площині рисунка. На рисунку видно, що полоїдальне поле на одній стороні Місяця додається із тороїдальним полем, на іншій – віднімається, що призводить до додаткової асиметрії.

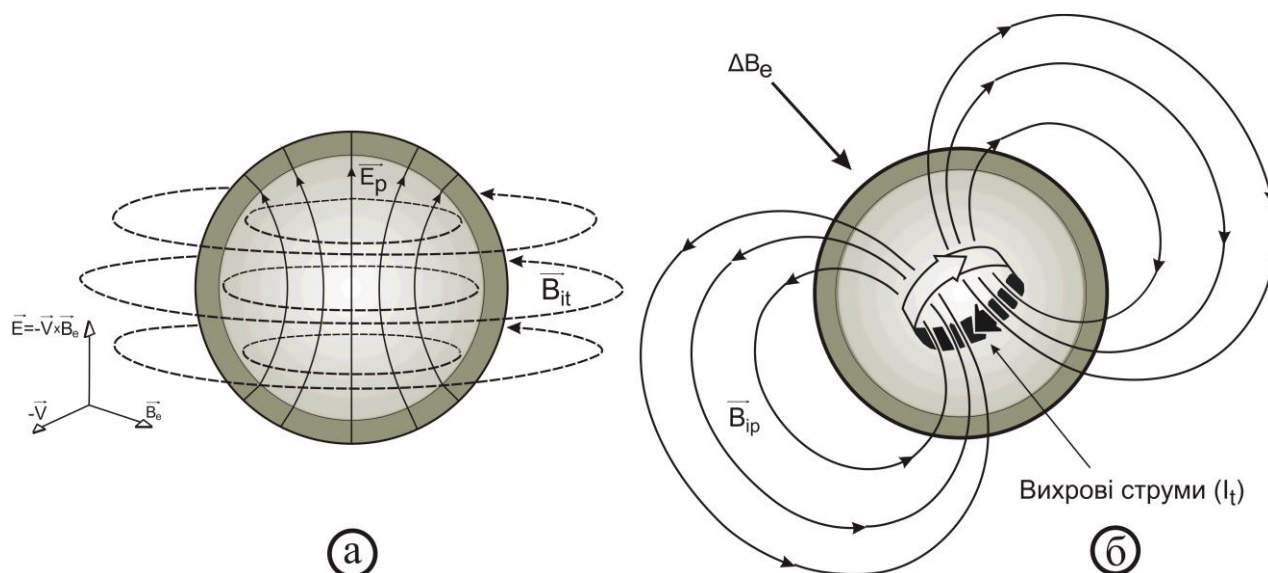


Рис. 5.1. Генерація змінних магнітних полів на концентрично шаруватому $\sigma = \sigma(r)$ Місяці: а) Тороїдальне \mathbf{B}_{it} магнітне поле струмів під дією полоїдального електричного поля $\mathbf{E}_p = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e$, яке виникає в результаті руху Місяця відносно магнітного поля \mathbf{B}_e набігаючого сонячного вітру (електрична або ТМ-мода). б) Полоїдальне поле \mathbf{B}_{ip} вихрових струмів \mathbf{I}_t , що індуковані змінами зовнішнього магнітного поля $\Delta \mathbf{B}_e$ (магнітна або ТЕ-мода) [Dyal, Parkin, 1971] (б). Поля зображені за припущення, що Місяць із всіх сторін оточений непровідним середовищем

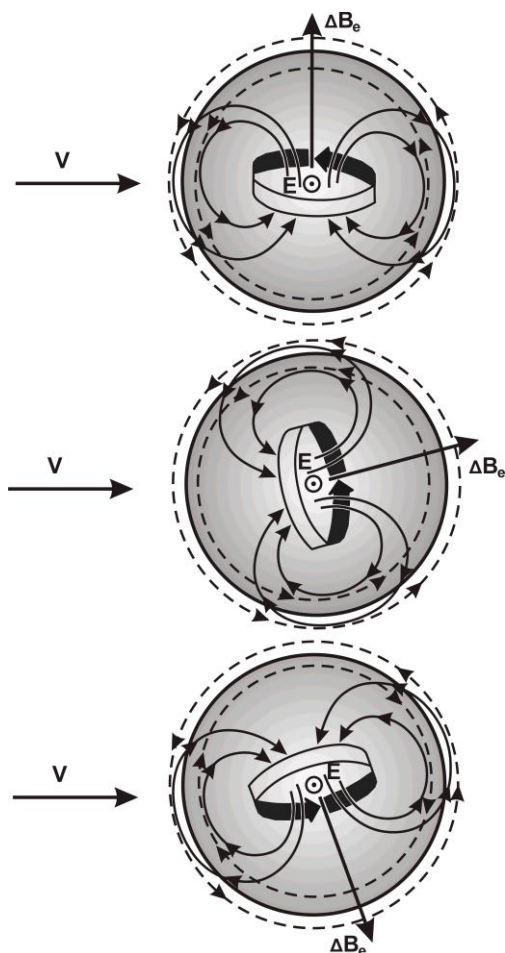


Рис.5.2. Суперпозиція магнітних полів електричної моди (кола, представлені пунктиром) і полоїдальних полів магнітної моди (суцільні лінії). Вісь симетрії електричної моди \mathbf{E} перпендикулярна площині рисунка, тобто зображено окремі випадки, коли \mathbf{B}_e і $\Delta \mathbf{B}_e$ лежать у площині рисунка. У протилежність Рис. 5.1 поля дано за припущення, що Місяць із усіх сторін оточений гарно провідним середовищем, що перешкоджає виходу магнітних полів внутрішнього походження далеко за межі місячної поверхні.

На Рис.5.1 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 складається з індукованим внутрішнім полем. У результаті нормальна до поверхні Місяця компонента внутрішнього магнітного поля прямує до нуля, а тангенційна підсилюється. Все це перешкоджає виходу магнітного поля у зовнішній простір. Це явище називають «обтисненням» внутрішнього поля сонячним вітром. На Рис.5.2 внутрішні магнітні поля практично не виходять за поверхню Місяця, що відповідає симетричному всебічному «обтисненню» і тільки для такого випадку виконано кількісні оцінки ефекту «обтиснення». Однак, сонячний вітер налітає із одного боку і ефективно «обтиснення» відбувається тільки на оберненій до Сонця стороні Місяця, як це показано на Рис. 5.3.

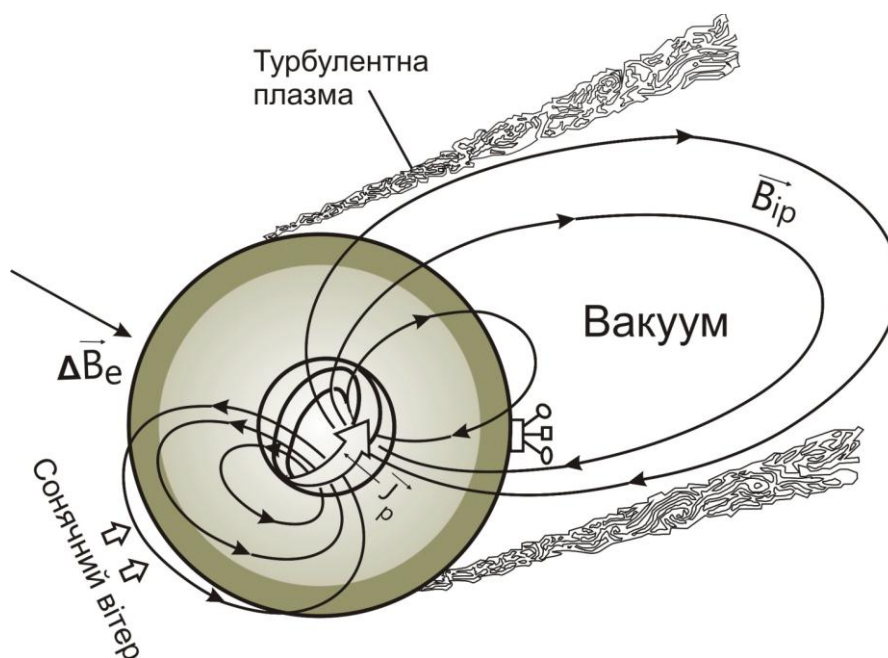


Рис.5.3 Полоїдальне поле вихрової моди в реалістичних умовах асиметричного «обтиснення» сонячним вітром – якісна картина із [Dyal, Parkin, 1971]

На Рис.5.4 дано проекцію місячної орбіти на площину екліптики. Три тижні кожного місячного місяця Місяць знаходиться у зоні дії сонячного вітру і на

протязі тижня двічі проходить турбулентні області перехідного плазмового шару із середнім рівнем магнітного поля ~ 8 нТл і геомагнітний хвіст із полем ± 9 нТл.

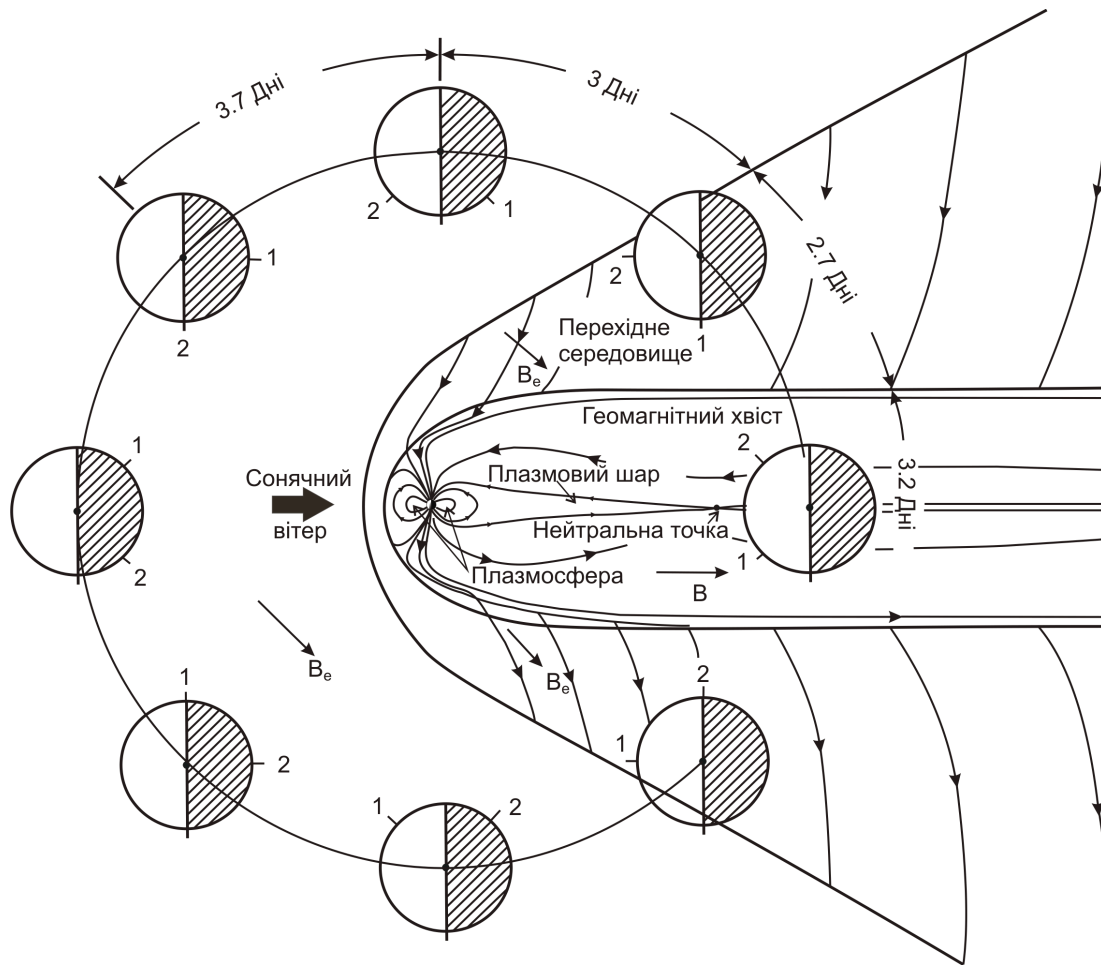


Рис.5.4. Кінематика руху Місяця навколо Землі. Майже 3 тижні він обдувається незбуреним сонячним вітром (із його несиметричним «обтисненням» і електричною модою), 3,2 дні знаходиться у відносно стабільному полі частин геомагнітного хвосту магнітосфери Землі (без «обтиснення» із його асиметрією, і без електричної моди). У рознесені пункти 1 і 2 на оберненій до Землі стороні Місяця було встановлено магнітометри.[Sill, Blank, 1970]

У залежності від положення Місяця відносно вище описаних зовнішніх полів і від положення магнітометра, зондування електропровідності має наступні різновиди:

1. Індукуючим полем є поле сонячного вітру, місячний день. Індуковане поле затиснуте сонячним вітром у порожнину, яка обмежена із денної сторони

поверхнею Місяця (Рис. 5.2 і 5.3). 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, утворена за Місяцем порожнина розглядається як вакуум, в який внутрішні поля проникають безперешкодно (Рис.5.1-б і 5.3).

3. Струми у Місяці індують магнітне поле геомагнітного хвосту. Воно стабільніше ніж поле сонячного вітру, у ньому ефекти плазмового «обтиснення» мінімальні, розгляд індукваного поля у вакуумі більш виправданий, і головне, електрична мода практично не виникає. Правда, час прольоту Місяця через геомагнітний хвіст всього близько 3 діб. При роботі в гармонійному режимі така тривалість буває недостатньою для набору варіацій у широкому діапазоні частот, що необхідні для зондування. Якщо вдасться зареєструвати інтенсивний квазі-прямокутний імпульс, то використовуючи методику перехідних процесів вся крива зондування може бути отримана із одного імпульсу.

Використання конфігурації Рис.5.2 для денної сторони і конфігурації Рис.5.1-б для нічної сторони є доволі грубим описом реальної ситуації (Рис.5.3), яке може призвести до значних помилок в оцінці електропровідності.

Інше ймовірне джерело великої похибки – зневажання електричною модою. Правильним було б знайти із даних обидві моди. Однак для розділення мод одної станції на поверхні Місяця не достатньо, потрібні як мінімум 3 синхронно працюючих магнітометри.

5.2. Фізичні основи зондувань Місяця

У всіх роботах по електропровідності Місяця (і Землі) використовувалась тільки магнітна або індукційна мода, яка містить найбільш цікаву інформацію про провідності глибоких надр.

Теорія електромагнітної індукції на сфері для зондування Землі розвинена в кінці 19-го – початку 20-го століття. Вона представляє магнітне поле у вигляді розкладу в ряд по сферичним гармонікам і встановлює співвідношення між

компонентами поля на поверхні сфери: відношення амплітуди вертикальної компоненти до амплітуди горизонтальних для сферичних гармонік порядку n і часової гармоніки із циклічною частотою ω визначається [Рокитянский, 1981, с. 46-51] виразом:

$$W = \frac{B_{r0}}{B_{\theta0}} = \frac{B_{r0}}{B_{\varphi0}} = \frac{n(n+1)}{r} R(\omega, \sigma(r)), \quad (5.1)$$

де $R(\omega, \sigma(r))$ - функція відгуку концентрично шарованої сфери, яка має розмірність довжини. Вона характеризує ефективну глибину проникнення поля заданої циклічної частоти ω за виконання умов частотного зондування (1.23):

$$\frac{n(n+1)}{r^2} \ll k^2 = i\omega\mu\sigma, \quad (5.2)$$

Коли умова (5.2) не виконується, магнітне поле втрачає зв'язок із електропровідністю. Виконання цієї умови залежить від розподілу електропровідності із глибиною. Із збільшенням глибини дослідження до електромагнітного поглинання поля додається його геометричне загасання, яке залежить від порядку n гармоніки. При сильному невиконанні (5.2): $\frac{n(n+1)}{r^2} > k^2$ вторинне індуковане змінне магнітне поле на поверхні планети складає малу долю первинного поля і не може бути надійно виміряне. Найбільш важливою для зондування Місяця і Землі є гармоніка $n = 1$, яка відповідає однорідному полю. На Землі вдається виділити варіації $n = 1$ в діапазоні часових періодів від частин доби до 11 років і всі вони, як показує побудова кривих позірною опорю, також як і гармоніки S_q ($n = 2 \div 5$) задовольняють умові (5.2). Пояснюється це високою електропровідністю Землі і її інтенсивним зростанням із глибиною [Рокитянский, 1981, с. 117, 160, 167]. Електропровідність надр Місяця, достовірним чином ще не вивчена, більшість дослідників вважають її значно меншою, ніж у Землі, у будь-якому випадку необхідна перевірка виконання умови (5.2) при інтерпретації даних.

Міжпланетне магнітне поле сонячного вітру неоднорідне, але на «невеликих» відстанях у декілька тисяч кілометрів, де пролітав навколomisячний супутник із

магнітометром на борту, його за необхідності приймали за однорідне, щоб виміряне на орбіті поле, прирівняти полю \mathbf{V}_e , що індукує вихрові струми в провідних шарах Місяця. З іншого боку, індукуючий ефект створює не постійне поле \mathbf{V}_e , а його варіація $\Delta\mathbf{V}_e$ і ці два поля не паралельні. Тут відчувається деяке протиріччя.

На думку більшості дослідників магнітометр на навколomisячній орбіті, перебуваючи в сонячному вітрі, реєструє те саме \mathbf{V}_e , флуктуації якого проникають у Місяць та індукують у його провідних шарах вихрові струми і полоїдальне магнітне поле \mathbf{V}_{ip} . [Dyal & Parkin, 1971; Sill & Blank, 1970; Sonett, 1975]. Ці автори вважають, що якщо просторові неоднорідності сонячного вітру характеризувати спектром із параметром λ (довжина хвилі), то для місячного спостерігача вони будуть сприйматися як часові варіації із періодом λ/V . Неоднорідність із λ рівним діаметру Місяця (≈ 3500 км) відповідає періоду $\approx 0,01$ с, неоднорідність дорівнює відстані від Місяця до Землі (у середньому 384400 км) – періоду 1 с. Для довгоперіодних варіацій $T > 1$ с зовнішнє індукуюче поле \mathbf{V}_e можна вважати однорідним у навколomisячному просторі, де знаходяться орбіти запущених туди супутників.

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 в півтора рази (властивість сферичної геометрії!) для першої гармоніки $n = 1$. На поверхні кулі-ізолятора 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 при однорідному збуджуючому полі $n = 1$ повинні спостерігатись проміжні значення між розглянутими крайніми випадками. Запишемо сказане у вигляді нерівностей:

Для вертикальної компоненти:

$$0 < (B_{er} + B_{ir})/B_{er} < 1, \quad (5.3)$$

Для горизонтальних компонент:

$$1 < (B_{e\theta} + B_{i\theta})/B_{e\theta} < 1,5, \quad (5.4)$$

$$1 < (B_{e\varphi} + B_{i\varphi})/B_{e\varphi} < 1,5.$$

Нерівності (5.3-5.4) отримані для провідної кулі, яка обмежена непровідною середою, вони є наслідком сферичної геометрії і загальноприйнятого, але не очевидного припущення про збурення електромагнітної індукції однорідним у межах розглянутого небесного тіла полем. Виконання (5.3-5.4) є необхідною умовою застосування методики МВЗ для вивчення електропровідності.

Однак, величини, що стоять у чисельнику 5.3-5.4, нам не відомі. Те, що там написано, - є результатом інтерпретації спостережуваного поля. Тому більш конструктивно записати умови 5.3 і 5.4 через спостережувані поля в наступному вигляді:

$$0 < \mathbf{B}_{\text{нaбл.}}/B_{ne} < 1, \quad (5.5)$$

$$1 < \mathbf{B}_{\text{тaбл.}}/B_{te} < 1,5. \quad (5.6)$$

де індекси n і t позначають нормальну і тангенційну до поверхні Місяця компоненти геомагнітного поля. Магнітні поля, які написані в знаменнику – це первинні зовнішні поля, які викликають у надрах Місяця вихрові струми. Прийнято вважати, що на їх місце можна поставити поля, які виміряні орбітальним магнітометром. Тут виникають два питання:

а) Індукуючим полем є вектор варіацій $\Delta \mathbf{B}_e$, який і визначає симетрію полоїдального магнітного поля магнітної моди.

б) Вектори \mathbf{B}_e і $\Delta \mathbf{B}_e$ не паралельні. Отже, використовуючи в якості індукуючого однорідного поля \mathbf{B}_e , ми очікуємо симетрію вторинного поля такою ж, а насправді вісь симетрії вторинного поля паралельна $\Delta \mathbf{B}_e$ і кут між ними ніде не фігурує і не враховується.

Як було відмічено вище: велику частину місячного місяця Місяць «обдувається» сонячним вітром, який, завдяки високій провідності, екранує магнітні поля внутрішнього походження; тому вважається, що магнітометр на навколomisячній орбіті, перебуваючи в сонячному вітрі, реєструє \mathbf{B}_e у чистому вигляді [Dyal & Parkin, 1971; Sill & Blank, 1970; Sonett, 1975]. Віднімаючи його із

поля на поверхні Місяця, отримуємо індуковане поле \mathbf{V}_i . Однак, екранування сонячним вітром суттєво спотворює полоїдальні поля. На денній стороні силові лінії магнітного поля стиснуті струмами, індукованими в сонячному вітрі так, що вертикальна компонента перетворюється в нуль на поверхні Місяця, а горизонтальна може підсилюватись у декілька разів у порівнянні із вільним простором (Рис. 5.1б, Рис. 5.3). У зону місячної тіні сонячний вітер практично не проникає і там провідність достатньо низька, так що нічну порожнину Місяця прийнято розглядати як вакуум, що і робилось при інтерпретації спостережень на нічній стороні Місяця, однак замість витягнутої від Місяця порожнини, властивостями вакууму наділявся весь простір поза Місяцем. Таким чином, для денної і нічної сторін вирішувались сферично симетричні задачі, які є доволі грубим наближенням, що може спотворити результати зондування.

Другим можливим джерелом похибки індукованого зондування, як зазначалось вище, є накладення електричної моди. Рис. 5.2 ілюструє, як може виникати додаткова асиметрія спостережуваного поля при суперпозиції мод.

5.3. Деякі результати зондувань Місяця в 1970-ті роки

Обробка часових рядів, записаних магнітометрами, виконувалась за допомогою гармонічного аналізу (перетворення Фур'є) [Ваньян та ін., 1973; Sonett, 1975, 1977] або аналізу перехідних характеристик (перетворення Лапласа) [Ваньян та ін., 1973; Дайел та ін., 1975; Sonett, 1975]. Останній спосіб потребує значно більш коротку реалізацію довжиною всього 5-15 хвилин, яка містить виразний імпульс зовнішнього поля, в ідеалі сходинкоподібної форми. Розв'язок рівнянь Максвелла на провідній сфері при сходинковій зміні однорідного зовнішнього магнітного поля $\Delta\mathbf{V}_e$ для спрощеної концентрично шарованої моделі Місяця описано в роботі [Dyal, Parkin, 1971] і представлено на Рис. 4.5, із якого видно, що для радіальної компоненти вторинне індуковане поле віднімається із первинного (під час перехідного процесу), а для тангенційної компоненти складається із ним. Максимально можлива величина тангенційного полоїдального поля дорівнює $1/2 \Delta\mathbf{V}_e$ при $R_i = a$. Із збільшенням глибини до провідного шару

Місяця вторинне поле на його поверхні зменшується (геометричне загасання), наприклад, при $R_i = a/2$ зменшується в 8 разів і стає практично важко вимірюваним (Рис. 5.5). Залежність амплітуди індукованого поля від часу близька до експоненти. Якщо провідність Місяця зростає із глибиною, ця залежність описується накладенням експонент. На Рис.5.6 представлені записи сходинкоподібної варіації зовнішнього поля \mathbf{V}_e , записаного на навколomisячному супутнику Експлорер 35, і синхронні записи $\mathbf{V}_e + \mathbf{V}_i$ станції Аполло-12 на місячній поверхні. На рисунку видно, що сходинка на горизонтальній компоненті на поверхні Місяця майже удвічі більша, ніж на орбіті, хоча теоретично для прийнятої моделі різниця не може перевищувати 0,5 – порушується умова 5.4-5.6.

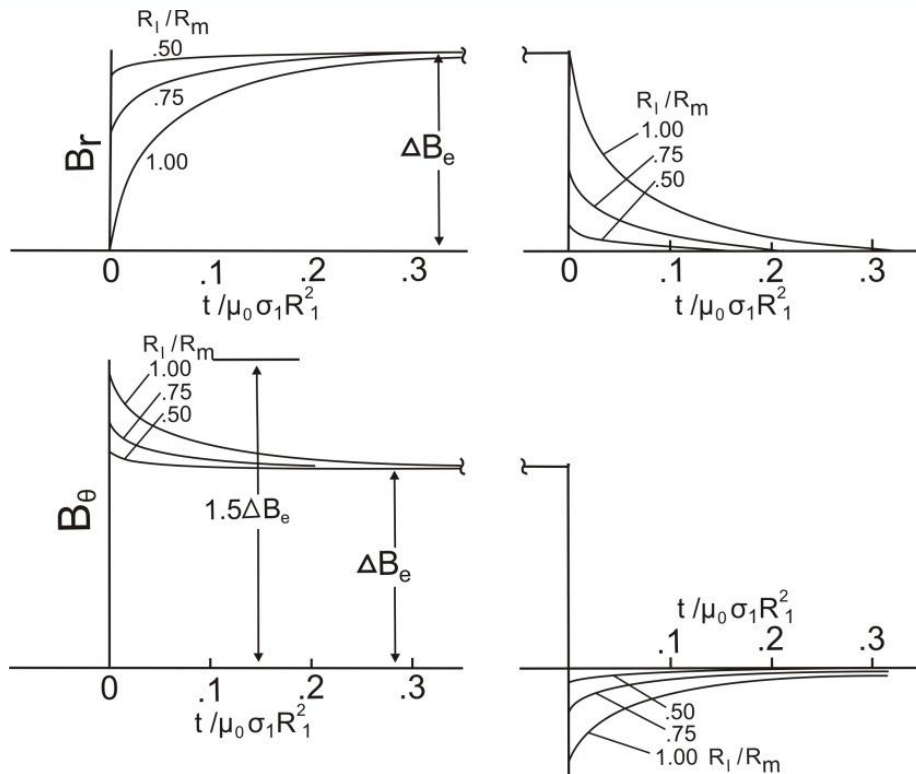


Рис. 5.5. Відгук двохшарової моделі Місяця (верхній шар — ізолятор, нижній - однорідний провідник радіуса R_1 і провідності σ) на сходинкоподібну зміну зовнішнього поля $\Delta \mathbf{V}_e$. Полярна вісь сферичної системи (r, θ, ϕ) напрямлена уздовж $\Delta \mathbf{V}_e$ [Dyal, Parkin, 1971]. Цифри біля кривих - значення R_1/R_m , де $R_m = a$ - радіус Місяця.

Виміри виконано на нічній стороні Місяця в полі геомагнітного шлейфу і автори (Dyal and Parkin, 1971) прийняли простір над поверхнею Місяця за вакуум, що, очевидно, не зовсім точно. Ефект повного «обтиснення» сонячним вітром пологоїдалного поля в рамках сферично симетричної моделі розраховувався окремими авторами, які використовували спостереження на денній стороні Місяця. Результат розрахунків: вертикальна компонента індукованого поля на поверхні Місяця перетворюється на нуль, горизонтальна «підсилюється» приблизно у 3-5 разів за рахунок стиснення внутрішнього поля сонячним вітром на денній стороні» [Дайел и др., 1975]. Були і спроби [Ваньян и др., 1973] наближеної оцінки асиметрії «обтиснення» (рис. 5.3) пологоїдалного поля, однак вони були недостатньо жорсткими і точними.

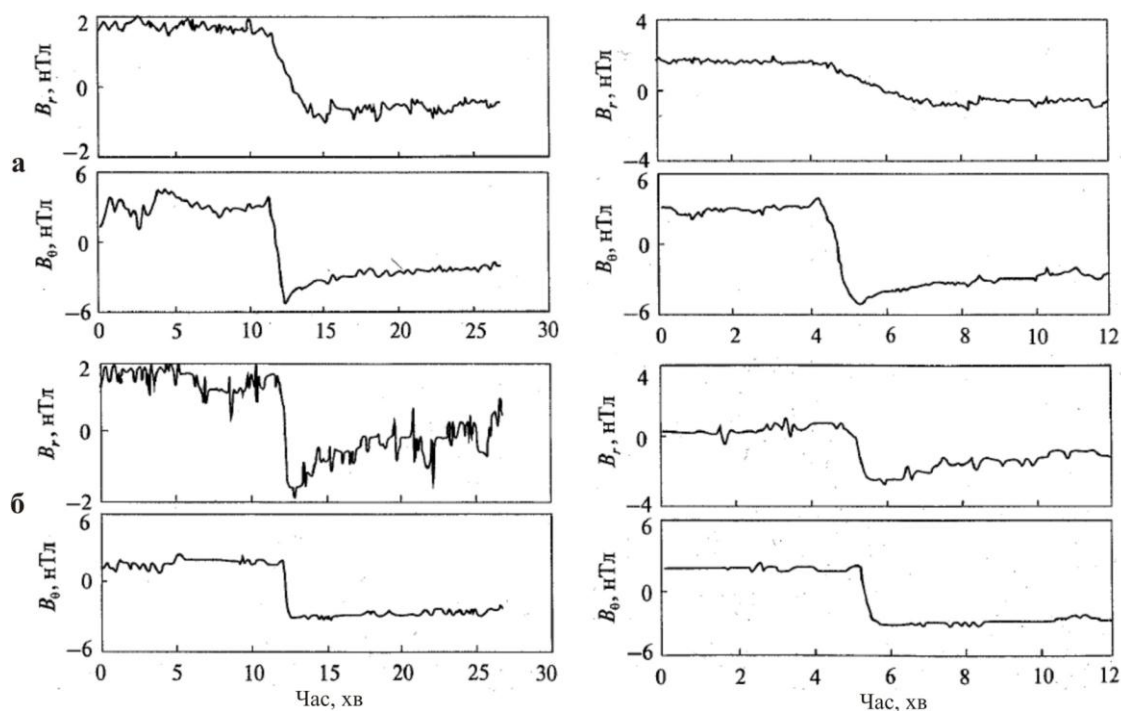


Рис. 5.6. Відгук (як припущено авторами, $\mathbf{V}_e + \mathbf{V}_i$) реального Місяця, що виміряний на її поверхні місяєю «Аполло-12» (а) на квазисходинкову зміну зовнішнього поля \mathbf{V}_e , синхронно записане 8 грудня 1969 р. на навколomisячному супутнику «Експлорер 35» (б) [Dyal, Parkin, 1971]. Лівий і правий стовбці представляють імпульс у різних амплітудно-часових масштабах.

Із Рис. 5.6 видно, що зовнішнє індукуюче поле відрізняється по формі від

ідеального прямокутного імпульсу, тому для отримання функції відгуку, вільної від форми зовнішнього індукуючого поля, необхідна спеціальна обробка, яка розвинена для аналізу перехідних процесів.

Вхідний сигнал - індукуюче поле $\Delta \mathbf{B}_e(t)$ при $t < 0$ приймається рівним нулю, функція відгуку надр Місяця $R(t)$ (це може бути магнітне співвідношення, імпеданс або позірний опір) і вихідний сигнал (синхронно записане на поверхні Місяця індуковане поле $\mathbf{B}_i(t)$) пов'язані співвідношенням згортки, яке розглядається як інтегральне рівняння відносно $R(t)$ – імпульсної перехідної характеристики надр Місяця $\int_0^t B_e(t - \tau)R(\tau)d\tau = B_i$ [Светов, 1984].

У всіх наведених прикладах є порушення умов 5.3 – 5.6, тобто спостережувані поля не відповідали теоретичній моделі, по якій виконувалась інтерпретація. Розглянемо більш детально опубліковані дані спостережень у частотній області, зібрані в докладній оглядовій роботі [Sonett, 1977]. На Рис. 5.8 представлено функції відгуку, які отримано в чотирьох різних ситуаціях проходження Місяцем своєї орбіти (див. рис 5.4): сонячний вітер, прилад на денній стороні; сонячний вітер, прилад на нічній стороні; Місяць у перехідному плазмовому шарі; Місяць у частинах геомагнітного хвосту. Обертання функцій відгуку виявляє їх анізотропію, напрямок максимуму співпадає із постійним магнітним полем у точці спостереження Аполло-12. Sonett передбачає, що збільшення функцій відгуку в цьому напрямку зумовлено взаємодією сонячного вітру із цим полем і вибирає для знаходження моделі електропровідності місячних надр мінімальну криву, вважаючи її менш схильною до завад. Тут виникає ряд сумнівів. По-перше, як може впливати постійне поле на змінне в умовах малих полів Місяця, по-друге, як зазначає і Sonett, анізотропія спостерігається і на нічній стороні, у плазмовому шарі і геомагнітному хвості, де немає впливу сонячного вітру. У земних умовах анізотропія функцій відгуку зазвичай зумовлена великими неоднорідностями в розподілі електропровідності, подібні неоднорідності цілком можливі і на Місяці, причому вони повинні виявляти себе за характерною частотною залежністю функцій відгуку, однак

високий рівень можливих завад у наявних зараз місячних даних робить такий аналіз передчасним.

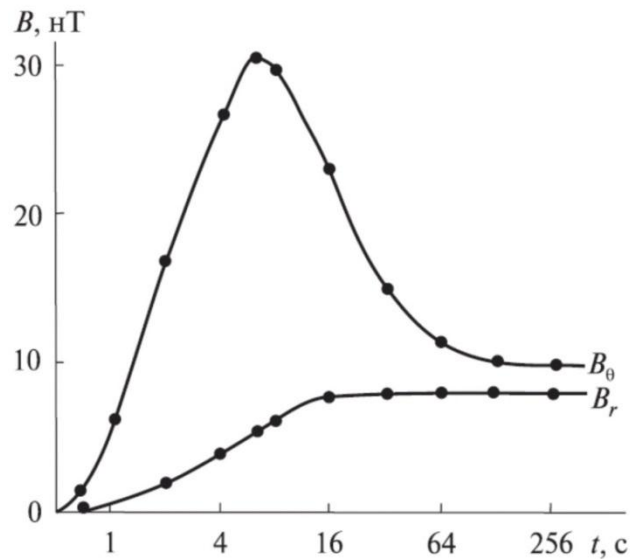


Рис. 5.7. Інтенсивний (30 нТл) імпульс, зареєстрований «Луноходом-2» 23.03.1973. Шкала часу дана у логарифмічному масштабі! Нижня крива – вертикальна компонента, верхня – горизонтальна, її амплітуда перевищує рівень, що накладається умовою 5.4-5.6. Швидкість сонячного вітру під час імпульсу перевищує 730 км/с. По одному цьому імпульсу виконано зондування Місяця [Долгинов та ін., 1975]

Розглянемо більш уважно криві, що представлені на Рис. 5.8. В оригіналі криві, отримані на денній і нічній сторонах Місяця, коли вона знаходиться в зоні дії сонячного вітру, представлені в різних масштабах. Для зручності порівняння ми перекреслили їх в однаковому масштабі (Рис. 5.8, правий графік) і відразу побачили, що нічні дані гарно сполучаються із денними на довгих періодах. Тепер необхідно перевірити відповідність результатів спостережень умовам 5.3-5.6, які в прийнятих тут позначеннях мають вигляд

$$0 < A_x < 1, \quad (5.7)$$

$$1 < A_{y,z} < 1,5. \quad (5.8)$$

На Рис. 5.8 видно, що вертикальна компонента A_x задовольняє умові (5.7) у трьох зонах і не задовольняє при спостереженні на нічній стороні Місяця, що не бомбардується сонячним вітром. Останнє може бути пояснено неточністю

орієнтації, при якій різко підсилене «обтисненням» горизонтальне поле може дати внесок у вертикальну компоненту, спостережувана частотна залежність не протирічить цьому поясненню.

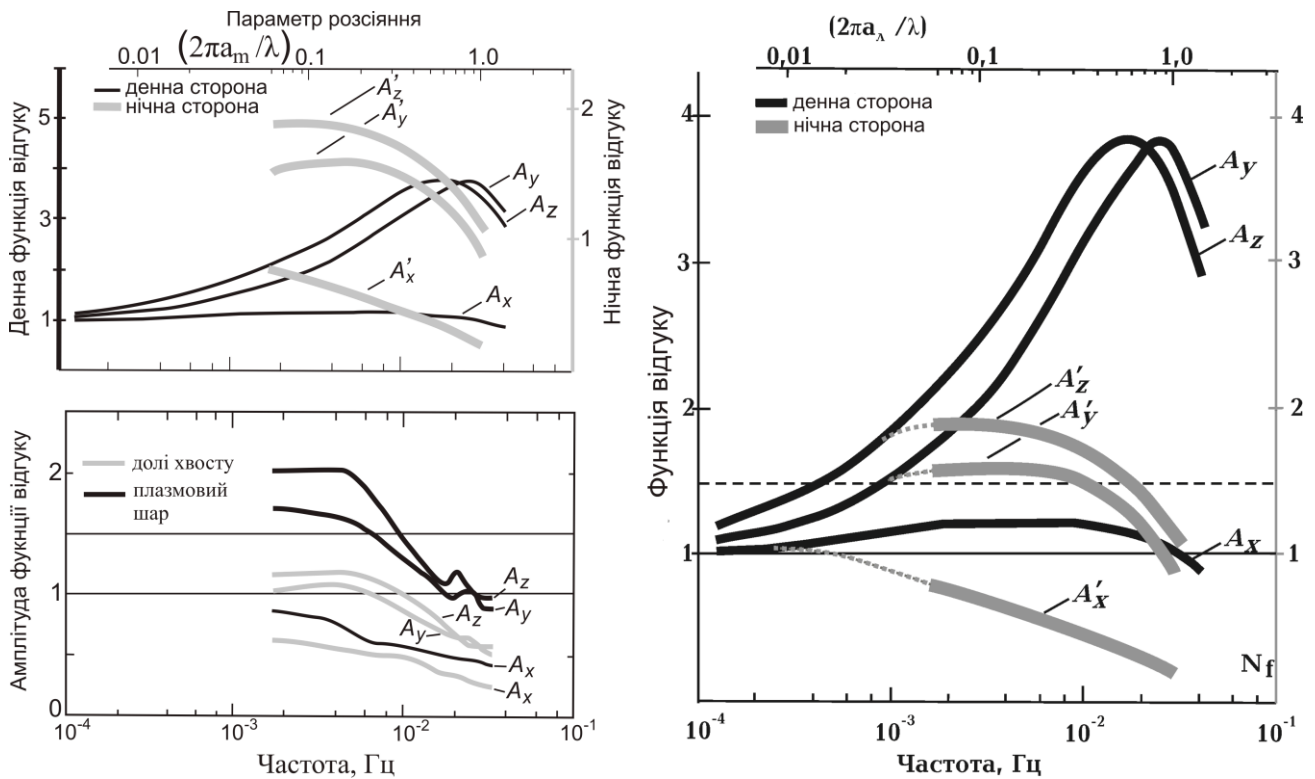


Рис.5.8. Функції відгуку Місяця $A_i(f) = \{B_{\text{exti}}(f) + B_{\text{inti}}(f)\} / B_{\text{exti}}(f)$, де f – частота, i – одна із координат локальної системи (x, y, z) із центром у місці базування Аполло-12 на поверхні Місяця: орт x спрямований вгору, y – на схід, z – на північ). Ліва половина скопійована із роботи [Sonett, 1977]. На верхньому рисунку яскраві чорні криві отримано на денній стороні Місяця, бляклі (сірі) – на нічній, на нижньому рисунку - відповідно в плазмовому шарі і геомагнітному хвості. Правий рисунок повторює лівий верхній, але денні і нічні дані представлені в однаковому масштабі.

Горизонтальна компонента значно гірше відповідає своїм обмеженням (5.8), які передбачалися теорією. Якщо крива на денній стороні, що опромінюється сонячним вітром, підсилюється «обтисненням», то це підсилення повинно бути не менш, ніж у 3 рази, щоб її вихідна величина задовольняла умові (5,8). у трьох інших зонах горизонтальні компоненти функцій відгуку не задовольняють умові

(5,8): на нічній стороні в зоні сонячного вітру і в плазмовому шарі A_{yz} перевищує рівень 1,5 на низьких частотах, у геомагнітному хвості A_{yz} менше 1 на високих частотах. Причини описаних невідповідностей не зрозумілі, але цікаво відзначити, що частотна залежність горизонтальних функцій відгуку в трьох зонах виявляє пологі нечіткі максимуми приблизно на одній частоті $3 \cdot 10^{-3}$ Гц, тоді як у першій зоні (сонячний вітер, день) чіткий максимум зміщений майже на порядок ($2 \cdot 10^{-2}$ Гц), що при спробі інтерпретації дасть зовсім інший розподіл провідності надр Місяця.

На закінчення, напевно, слід зробити більш сильний висновок: Невиконання вимог 5.3-5.8 показує, що отримані із вимірів функції відгуку не попали в простір функцій відгуку, які відповідають прийнятій моделі: «індукція однорідним зовнішнім полем у сферично симетричному Місяці».

5.3.1. Горизонтальні неоднорідності всередині Місяця

Краще всього відомі неоднорідності щільності, що вивчаються за допомогою супутників, які обертаються по навколomisячним орбітам. Гравітаційне поле виявилось різко аномальним із десятками великих позитивних аномалій величиною 100-200 мГал із характерними розмірами 50-300 км, які відносять в основному до круглих морів. надлишкові маси, що відповідальні за аномалії, були названі масконами. Глибина їх залягання досягає сотень кілометрів, що свідчить про суттєву неоднорідність кори і верхньої мантії Місяця.

Також магнітометри, які пересувались по місячній поверхні, виявили великі ділянки Місяця із полями до 30-40 нТл, а в одному пункті - 327 нТл. Висока залишкова намагніченість була виявлена при дослідженні зразків місячного ґрунту. Її пояснюють існуванням у Місяця на ранній стадії еволюції магнітних полів високої інтенсивності.

Стратиграфія надр Місяця побудована за сейсмічними даними. У місячній корі швидкість поздовжніх хвиль різко змінюється із глибиною приблизно так, як показано в таблиці, яка складена за доволі суперечливими даними [Галкин, 1978; Adams, 2009 та ін.]:

Таблиця 5.1.

<i>Назва шару і його потужність</i>	<i>глибина</i>	<i>швидкість поздовжніх хвиль, км/с</i>
Реголіт 0-12 м	0	0,1
Брекчії ≈18-38 м	0-12 м	0,3
	200 м	0,5
	1,5 км	1
Низи місячної кори 0-107 км	≈60 км	4-6
Верхня мантія ≈60 км	60-300 км	6-9
Середня мантія – астеносфера	250-500 км	На 10% менше, ніж у вищележачому шарі

Потужність місячної кори в середньому складає 60 км, змінюючись від 0 під морем Криз до 107 км у північній частині кратеру Корольова на оберненій стороні Місяця. Параметри, що отримано в різних регіонах місячної поверхні, помітно відрізняються для одних і тих самих глибин, що вказує на латеральні неоднорідності швидкостей сейсмічних хвиль. У деяких оглядових джерелах астеносферу 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 пониження швидкостей сейсмічних хвиль на ≈10% [Adams, 2009] і підвищення електропровідності [Ваньян та ін., 1973].

Місяцетрясіння. Особливо цікаві і переконливі дані про розподіл двох основних типів місяцетрясінь (МТ). **Припливні** МТ відбуваються на глибині 800-1100 км, де передбачається контакт твердої і (напів)рідкої (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 більш сильні (очевидно, тому, що літосфера менш в'язка на цих глибинах і може

накопичувати великі напруження). Саме цікаве полягає в тому, що тектонічні МТ концентруються в тих же регіонах де відбуваються приливні МТ або на периферії цих регіонів. Спостерігається також деяка часова кореляція – тектонічні МТ виникають після активізації приливних МТ у прилеглому районі. Все це підводить до припущення, що на Місяці існують і можливо широко розповсюджені суб-вертикальні структури типу плюмів, по яким найбільш активно відбувається дегазація та винос теплової енергії, можливо, за участю вулканізму. Такі структури повинні володіти підвищеною електропровідністю і по ним можуть протікати вертикальні струми.

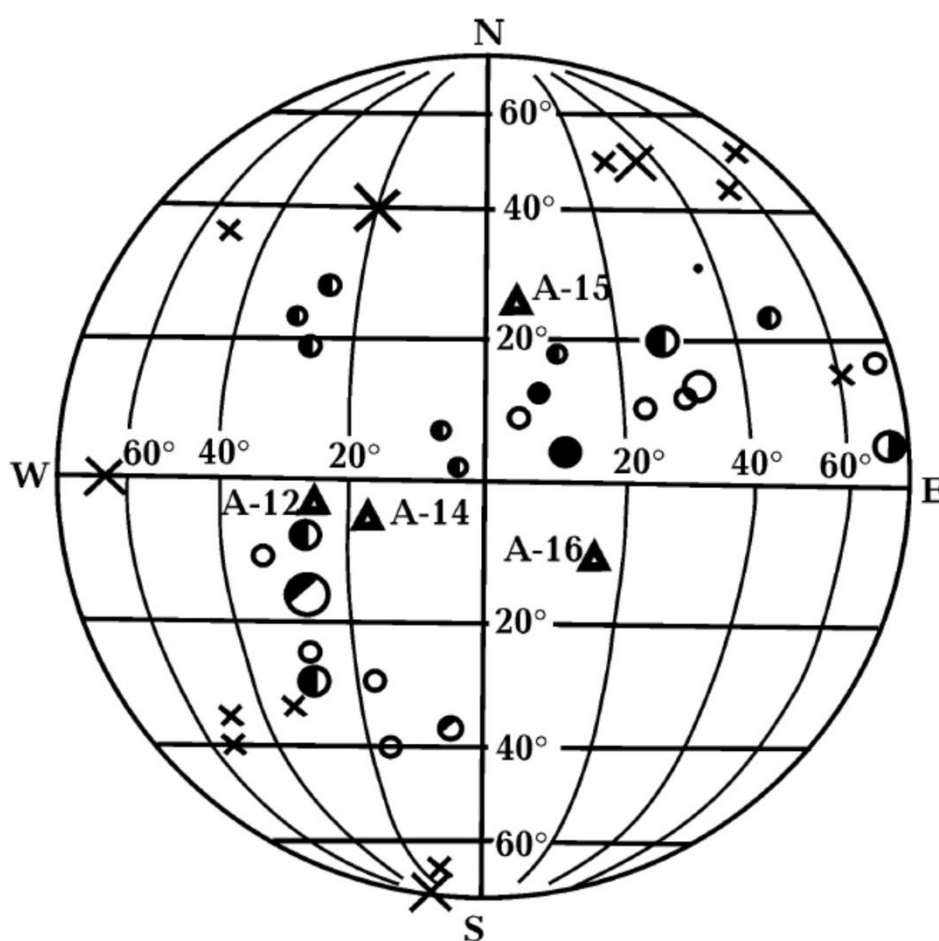


Рис. 5.9. Карта епіцентрів місяцетрясінь. Кола – приливні, хрестики – тектонічні, мале коло – число місяцетрясінь менше 5% від загального, середнє – менше 10%, велике – більше 10%, порожнє коло – глибина не визначена, залитий на чверть – глибина 800-900 км, залитий наполовину – 900-1000 км, залитий повністю – глибина 1000-1100 км. Трикутниками із відповідними номерами показано сейсмічні станції «Аполонів».

Отже, за описаною вище оцінкою вийшло, що тороїдальне поле може давати відчутний внесок у спостережуване на Місяці магнітне поле, особливо, якщо існують локальні канали або області пониженого опору, на існування яких вказують численні непрямі дані: неоднорідність шару реголіту, дані сейсмології про суттєво неоднорідний розподіл джерел землетрусів, як припливної, так і тектонічної природи, дані гравіметрії про наявність інтенсивних неоднорідностей щільності у корі і мантії Місяця.

Дослідження геоелектричних неоднорідностей майже не описано в зв'язку з малою кількістю синхронних спостережень і великою невизначеністю в виборі інтерпретаційних моделей. Заслуговує уваги коротка інформація солідного колективу авторів [Verdichevsky et al, 1979]: «Синхронні спостереження в районі кратерів Лемон'є і Декарта вказують на існування регіональних аномалій змінного магнітного поля, що пов'язані із підвищенням опору місячної матерії під круговими морями».

5.3.2. Вулканізм і дегазація Місяця

Найбільш переконливим доказом існування вертикальних каналів підвищеної електропровідності є дані про наявність вулканічної активності і дегазації із надр Місяця. Вулканічна активність на Місяці була відкрита Н.А. Козиревим шляхом цілеспрямованого (передбаченого їм у його причинній або несиметричній механіці) спостереження центрального піку кратеру Альфонс діаметром 120 км. Цей кратер був обраний тому, що він був розсічений широким розломом, із якого піднімався центральний пік висотою ≈ 1400 м і схилами схожими на земні вулкани. Після багаторазового наведення великого телескопу Кримської Астрофізичної Обсерваторії на центральний пік кратеру Альфонс Н.А. Козирев помітив аномальну зміну, записав її спектр і після ретельного аналізу (який включав аналіз спектрів земних вивержень і аналіз флюоресценції вивержених газів під дією жорсткої радіації сонячного вітру) навів беззаперечні докази вулканізму на Місяці [Козырев, 1959; Kozurev, 1963]. «Зранку 3 листопада 1958 р. в центральному піці кратеру Альфонс відбулося виверження: спочатку було

викинуто попіл, а потім, як звичайно, виділились гази із магми, що піднялась до поверхні (гази були адсорбовані на глибині за високого тиску)». Англійські астрономи П.Уілкінс і Ф.Бріюн 19 листопада 1958 р. на цьому ж піці спостерігали червону пляму, якої не було до листопада 1958 р. Очевидно, це була свіжовиливна магма.

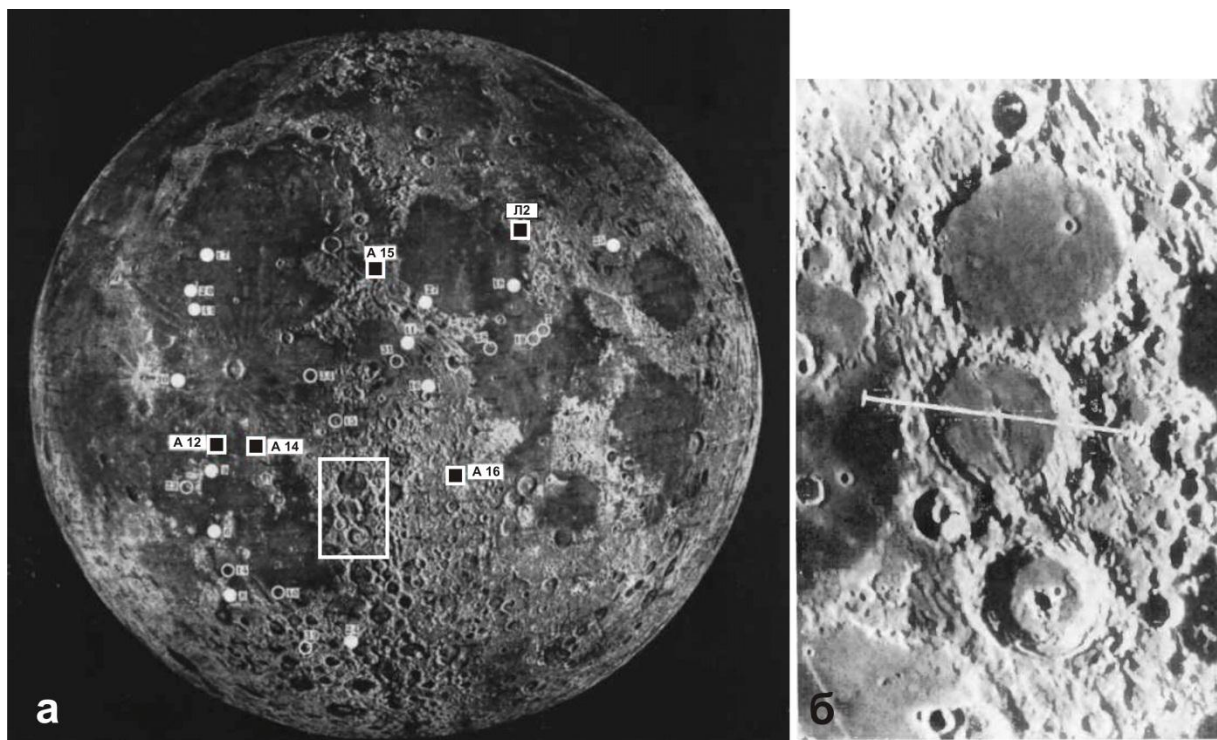


Рис. 5.10-а. Видима сторона Місяця із місячним рельєфом: темні великі рівнини – місячні «моря» і безліч кратерів із діаметром від частин метру до сотень кілометрів. Показані місця посадки і роботи магнітометрів на поверхні Місяця: місій Аполлон (А12, А14, А15 и А16) і Лунохода 2 (Л2). Світлим прямокутником виділені три кратери, які показані на правому рисунку. Рис. 5.5-б. Кратери зверху вниз Птолемей, Альфонс и Арзахель – всі стародавнього походження, але по ним проходить ряд молодих (не старше 200-400 млн. років [Shkuratov et al., 2018]) меридіональних розломів. Біла лінія – проекція щілини спектрографу на центральний пік кратера Альфонс при спостереженнях Н.А.Козирєва [Козырев, 1959; Kozyrev, 1963].

Ці швидко плінні місячні явища TLP (transient lunar phenomena) спостерігались рідко, оскільки в ХХ столітті і раніше моніторинг усієї місячної

поверхні із високою роздільною здатністю не проводився. Із початку XXI століття декілька орбітальних апаратів (NASA Clementine and Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), Japanese Selene (Kaguya), Indian Chandrayaan-1 missions та інші) проводять моніторинг місячної поверхні із більш високою роздільною здатністю і кількість повідомлень про TLP різко зросла [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 летючі речовини, включаючи воду. Відповідно до цього трактування місячна кора повинна містити флюїдомісткі вертикальні канали підвищеної електропровідності.

Наявність діючого вулканізму, ізотопний аналіз поверхневих утворень, властивості TLP та їх велика кількість однозначно свідчать про існування провідних каналів від поверхні Місяця в її надра і, відповідно, про існування полоїдальних струмів і тороїдального магнітного поля (електрична мода). Для оцінки величини цих струмів поки що даних не достатньо. Не зрозуміло також чи будуть магнітні поля цієї моди глобально згладженими або проявляться локальними квазі-круговими концентричними аномаліями магнітного поля навколо окремих найбільш гарно провідних каналів.

5.4. Пропозиції щодо нових досліджень електропровідності Місяця

Такі пропозиції було представлено в роботі [Рокитянский, Терешин, 2010-б]. Тут вони будуть коротко повторені з уточненнями і доповненнями, що витікають із представлених у даній роботі нових даних.

А. Удосконалення зондувань із використанням природних варіацій:

1. Магнітометри із більш високою чутливістю і частотою опитування.
2. Синхронні трьохкомпонентні магнітні спостереження на поверхні Місяця, бажано не менше, ніж у трьох пунктах.

3. При використанні орбітальних магнітометрів бажано мати 2-3 синхронно працюючих наколомісячних супутника із магнітометрами, щоб реєструвати ступінь однорідності поля сонячного вітру.

Б. Дослідження із використанням штучних ЕМ полів:

1. Дистанційне глобальне ЕМ зондування Місяця на різних частотах із борту навколomisячних супутників.

2. Локальні індукційні зондування із борту спеціалізованих місяцеходів, наприклад, за методикою «петля в петлі». Завдяки високому опору верхніх шарів Місяця і низькому рівню завад, глибинність зондувань може досягати сотень і тисяч метрів, а за наявності двох узгоджених рознесених установок і значно більше.

Роботи групи Б напевно дадуть цікаві достовірні нові результати.

У роботах групи А неминучі припущення, від яких буде залежати достовірність результату. Навіть робота трьох синхронних магнітометрів на поверхні Місяця не гарантує розділення двох мод (складне і проблематичне навіть на Землі), однак використання особливостей формування полів у 4 зонах Місячної орбіти може допомогти виконанню задачі. Повторення робіт Аполло (один орбітальний магнітометр і один на поверхні Місяця) не дасть нічого нового. Оскільки постановка багатьох магнітометрів силами однієї країни мало ймовірна, бажано організувати міжнародний проект.

Висновки до розділу 5

1. Що вважається відомим про електропровідність Місяця? Дуже високий опір ($10^7 - 10^{10}$ Ом·м за різними літературним джерелами) реголіту, потужність якого складає 2 – 12 м, причому заміри виконано всього на декількох зразках, які доставлені на Землю. Індукційні зондування відразу «провалюються» на глибину 100 – 200 км, оскільки функцій відгуку, отримані лише на частотах менше $4 \cdot 10^{-2}$ Гц, але і на цих частотах вони часто не задовольняють критеріям застосовності і дають суперечливі результати. Все це ставить під сумнів достовірність отриманих оцінок глибинної електропровідності.

2. Наявність діючого вулканізму, ізотопний аналіз поверхневих утворень, властивості TLP (transient lunar phenomena) і їх велика кількість однозначно свідчать про існування провідних каналів від поверхні Місяця в її надра і, відповідно, про існування полоїдальних струмів і тороїдального магнітного поля

(електрична мода). Для оцінки величини цих струмів поки даних не достатньо. Не ясно також чи будуть магнітні поля цієї моди глобально згладженими або проявляться локальними квазі-круговими концентричними аномаліями магнітного поля навколо окремих найбільш гарно провідних каналів.

3. Автор вважає конструктивним висловити скептичну оцінку наявним знанням про електропровідність Місяця: все, що написано про електропровідність Місяця, - це не знання, а припущення, включаючи і загальноприйнятту думку про те, що кора і мантія Місяця мають питомий опір на 1-3 порядки вищий, ніж на Землі. Адже він може бути і однаковим за порядком величини.

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

Перелік використаних джерел до розділу 5

1. Ваньян, Л.Л., Бердичевский, М.Н., Егоров, И.В., Красс, М.С., Окулесский, Б.А., Фадеев, В.Е. (1973), Кажущееся электрическое сопротивление Луны и его интерпретация // *Изв. АН СССР: Физика Земли*, № 11, С. 3—12.

2. Галкин, И.Н. (1978), *Геофизика Луны*. Москва. Наука, 176 с.

3. Дайел, П., Паркин, К., Дейли, В. (1975), Лунная электропроводность, магнитная проницаемость и температура по данным магнитных экспериментов экспедиций «Аполлон» // *Космохимия Луны и планет* / Под ред. А. П. Виноградова. — Москва: Наука, С. 323—340.

4. Долгинов, Ш.Ш., Ерошенко, Е.Г., Жузгов, Л.Н., Шарова, В.А., Внучков, Г.А., Окулесский, Б.А., Базилевский, А.Т., Ваньян, Л.Л., Егоров, И.В., Файнберг, Э.Б. (1975), Магнетизм и электропроводность Луны по данным «Лунохода-2» // *Космохимия Луны и планет* / Под ред. А. П. Виноградова. — Москва: Наука, С. 314—322.

5. Козырев, Н.А. (1959), Вулканическая деятельность на Луне. *Природа*, №3, с. 84-87.

6. Виноградов, А.П. (ред.) (1975), *Космохимия Луны и планет*, Москва: Наука.
7. Паркинсон, У. (1986), *Введение в геомагнетизм*. Москва: Мир, 527 с.
8. Рокитянский, И.И. (1981), *Индукционные зондирования Земли*. – Киев: «Наукова Думка», С. 297
9. Рокитянский, И.И., Терешин, А.В. (2010-а), Глубинное магнитовариационное зондирование Луны. *Космічна наука і технологія*. Т. 16, №4, с. 57-65.
10. Рокитянский, И.И., Терешин, А.В. (2010-б), Исследование электропроводности Луны (итоги и перспективы). *Геофиз. журн.* Т. 32, № 5, 69-81.
11. Светов, Б.С. (1984), *Электродинамические основы квазистационарной геоэлектрики*. М: ИЗМИРАН, 184 с.
12. Adams, J. (2009), “International lunar network update. NASA report 9.01.2009” [“Obnovlenie megdunarodnoi lunnoi seti. Otchet NASA 9.01.2009”], available at: <https://www.lpi.usra.edu/pss/jan92009/presentations/ilnStatuspss.pdf>
13. Basilevsky A. T., Abdrakhimov A. M., and Dorofeeva V. A. (2012) Water and Other Volatiles on the Moon: A Review. *Solar System Research*, Vol. 46, No. 2, pp. 89–107.
14. Berdichevsky M.N., Vanjan L.L., Dmitriev V.I., Zhdanov M.S., Fainberg E.B., Kharin E.P. (1979) International Symposium on electromagnetic induction in the Earth and Moon в журнале *Известия Академии Наук СССР. Серия Физика Земли*, №7, с. 103-110
15. Crotts, A.P.S. & Hummels, C. (2009), Lunar outgassing, transient phenomena, and the return to the moon. II. Predictions and tests for outgassing. *The Astrophysical Journal*, Vol. 707, №2. pp.1506-1523; doi:10.1088/0004-637X/707/2/1506
16. Dyal, P., Parkin, C.W. (1971), Electrical Conductivity and Temperature of the Lunar Interior from Magnetic Transient-Response Measurements // *J. Geophys. Res.* **76**, № 25. — P. 5947—5969.

17. Ivanov, A.V. (2014), Volatiles in Lunar Regolith Samples: A survey, *Sol Syst Res.* **48**, pp. 113–129. doi:10.1134/S0038094614020038
18. Kozyrev, N.A. (1963), Volcanic Phenomena on the Moon. *Nature.* Vol. 198, № 4884, pp. 979–980, doi:10.1038/198979a0
19. Shkuratov, Y.G., Ivanov, M.A., Korokhin, V.V., Kaydash, V.G., Basilevsky, A.T., Videen, G., Hradyska, L.V., Velikodsky, Y.I., Marchenko, G.P.(2018), Characterizing dark mantle deposits in the lunar crater Alphonsus *Planetary and Space Science.* Vol. 153, pp. 22-38. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.12.010>
20. Sill, W.R., Blank, J.L. (1970), Method for Estimating the Electrical Conductivity of the Lunar Interior. *J. Geophys. Res.* **75**, № 1. — P. 201—210.
21. Sonett, C.P. (1977), Some Consequences of Solar Wind Induction in the Moon. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* **285** — P. 537—547.
22. Sonett, C.P. (1975), Solar wind induction and lunar conductivity. *Phys. Earth Planet. Interior.* 10 – P.313—322.
23. Wieczorek, M., Neumann, G., Nimmo, F., Kiefer, W., Taylor, G.J., Melosh, H.J., Phillips, R.J., Solomon, S.C., Andrews-Hanna, J.C., Asmar, S.W., Konopliv, A.S., Lemoine, F.G., David, E., Smith, D.E., Watkins, M.M., Williams, J.G., Zuber, M.T. (2013), The Crust of the Moon as Seen by GRAIL. *Science.* V. 339. No. 6120. P. 671–675.

ВИСНОВКИ

1. Електрична мода присутня у природному електромагнітному полі Землі і Місяця. Ідея відома, дискусійна. Автор зібрав деякі додаткові дані, що 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 показує, що аномалія продовжується на південь і уходить під води Чорного моря. Результат не підтримав пануючу думку, що аномалія закінчується близько південної границі Українського щита. Думка базувалась на 3D-моделюванні, яке не було забезпечене адекватними даними спостережень.

3. Зіставлення Кіровоградської аномалії електропровідності із аномаліями постійного магнітного поля показало їх певний взаємозв'язок: східніше КірАЕ проходить позитивна аномалія постійного поля, західніше – негативна. Подібну відповідність було знайдено і для Ладозько-Ільменської аномалії.

Для визначення ступеню універсальності отриманого взаємозв'язку було проаналізовано аномалії Східноєвропейської платформи до Балтійського щита включно. Вийшов ланцюг коротких аномалій (що перекриваються осадовими басейнами, які екранують корові провідники) із двома довгими, гарно вивченими схожими аномаліями на кінцях – Кіровоградською і Ладозькою. Цей матеріал дав підставу для припущення про існування (можливо лише в минулому) єдиної Транс-Європейської аномалії електропровідності. Ця ідея прийнята тектоністами докембрію як одна із підстав для опису геологічних процесів у далекому минулому.

4. Показано необґрунтованість розповсюдженої думки про те, що шар реголіту не пропускає вертикальні струми на Місяці. Аналіз природи електропровідності гірських порід, огляд нещодавніх 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 автору не вистачає знань про властивості навколومیсячної плазми і фізики її взаємодії із Місяцем. Для експериментального розділення мод необхідні багатоточкові синхронні спостереження на поверхні Місяця і навколومیсячних орбітах, які у найближчі роки не плануються, а коли будуть виконані, успіх розділення не може бути гарантований.

5. Виписано умови, яким повинні задовольняти функції відгуку поставленої задачі зондувань Місяця (індукція магнітної моди під дією зовнішнього однорідного поля) і застосовано до спостережених даних. Виявилось, що більшість даних, що отримано в 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 і аналізу просторово-часового розподілу припливних і тектонічних місяцетрясінь висловлено гіпотезу про можливість існування у мантиї Місяця структур типу плюмів.

7. Пропозиції до наступного етапу дослідження Місяця. Враховуючи недостовірність результатів зондувань із природними полями на даному етапі, рекомендуються дослідження із використанням штучних ЕМ полів: а) Дистанційне глобальне ЕМ зондування Місяця на різних частотах із борту навколومیсячних супутників. б) Локальні індукційні зондування із борту спеціалізованих місяцеходів, наприклад, по методиці «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 напевно дадуть цікаві достовірні нові результати.

8. Обернена задача завжди багатозначна, тому знаходження однієї багатопараметричної моделі не є встановленим результатом, тобто новим знанням. Нове знання повинно бути оформлене у вигляді інваріантів, тобто

понять і величин із необхідністю («без варіантів») що слідує із наявних даних правильних вимірів. Розглянуто інваріанти методів МВП і МТЗ.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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., Ингерев, 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.0203-3 100.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. Рокитянский, И.И., **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, 20th 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. Рокитянский, И.И., **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. *9th 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*. 21st 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^{ая} 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. *22nd 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 Ладужской 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