

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАРІАЦІЙ ГЕОЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ РЕГІОНУ АНТАРКТИЧНОГО ПІВОСТРОВА

В.Ю. Максимчук, В.М. Кобзова, Б.Т. Ладанівський, П.К. Мартюк, Л.Т. Гончарук

*Карпатське відділення Інституту геофізики НАН України, вул. Наукова, 3Б, 79060 Львів
E-mail: borys@cb-igph.lviv.ua*

Реферат. Метод фізичного моделювання застосовано для дослідження провідних структур Антарктичного півострова та його оточення. 3D масштабну модель регіону від 51,4°W до 68,6°W і від 60°S до 67,2°S в масштабі 1:200000 було створено в електролітичній ванні розміром 5×5×0,7 м у відповідності з картою батиметрії. Модель збуджувалась гармонічним магнітним полем в діапазоні 6,0–0,1 МГц, що відповідає 2200–130000 с у природних умовах. Магнітотелуричні та геомагнітні передавальні функції було одержано в 12 пунктах уздовж профілю, що перетинає модель Антарктичного півострова. 2D інверсія одержаних передавальних функцій порівнювалась із реальним геоелектричним розрізом, який достовірно відомий для масштабної моделі. Це порівняння дозволило оцінити вплив існуючих 3D ефектів на геоелектричні дослідження в регіоні.

Физическое моделирование вариаций геоэлектромагнитного поля Антарктического полуострова и прилегающего региона. В.Ю. Максимчук, В.М. Кобзова, Б.Т. Ладанивский, П.К. Мартюк, Л.Т. Гончарук.

Реферат. Метод физического моделирования использован для изучения проводящих структур Антарктического полуострова и его окружения. 3D масштабная модель региона от 51,4°W до 68,6°W и от 60°S до 67,2°S в масштабе 1:200000 была создана в электролитической ванне размером 5×5×0,7 м в соответствии с картой батиметрии. Модель возбуждалась гармоническим полем в диапазоне 6,0–0,1 МГц, что соответствует 2200–130000 с в природных условиях. Магнитотеллурические и геомагнитные передаточные функции были получены в 12 пунктах вдоль профиля, пересекающего модель Антарктического полуострова. 2D инверсия полученных передаточных функций сравнивалась с реальным геоэлектрическим разрезом, который достоверно известен для масштабной модели. Это сопоставление позволило оценить влияние существующих 3D эффектов на геоэлектрические исследования в регионе.

Physical modeling of geoelectromagnetic variations of Antarctic peninsula region. V.Yu. Maksymchuk, V.M. Kobzova, B.T. Ladanivskyi, P.K. Martyuk, L.T. Goncharuk. Carpathian Branch of Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Electromagnetic Methods, 79060, Naukova, 3b, Lviv, Ukraine.

Abstract. The method of analog physical modeling was applied to study conductivity structure of Antarctic Peninsula and adjacent regions. The 3D scale conductivity model of region from 51.4°W to 68.6°W and from 60°S to 67.2°S with factor 1:200000 was created in the electrolytic tank with dimension 5×5×0.7 m. according to a bathymetry map. The model was excited by the varying homogeneous magnetic field in the frequency band 6.0 – 0.1 MHz that corresponds to 2200 – 130000 s. band in natural conditions. The magnetotelluric and geomagnetic response functions was obtained at 12 point along profile across model of Antarctic Peninsula. 2D inversion of obtained response functions was compared with real geoelectric cross section which are reliable known for scale model. This comparison has allowed to estimate the influence of real 3D effects on geoelectric investigation in the region under study.

Key words: physical modeling, magnetotelluric field, Antarctic Peninsula

1. Вступ

В Антарктиді інтенсивного розвитку набувають геофізичні дослідження. Дані спостережень за геоелектромагнітним полем дають можливість застосувати магнітотелуричний (МТ) і магнітоваріаційний (МВ) методи для вивчення глибинної будови земної кори та верхньої мантії регіону. Ці методи найкраще підходять для важкодоступних регіонів, оскільки в якості джерела індукуючого поля використовують іоносферні та магнітосферні струми, що виникають при взаємодії сонячної та навколосемної плазми з геомагнітним полем. Крім того, частотний діапазон геоелектромагнітних варіацій практично необмежений, тому для МТ і МВ методів характерна велика глибинність.

Застереженням для використання цих методів у полярних регіонах є близькість до іоносферних джерел. В авроральній зоні існує велика ймовірність того, що поле варіацій суттєво відрізняється від плоско-однорідної електромагнітної (ЕМ) хвилі, яка є основним припущенням МТ методу. Теоретичний розрахунок (Vanuyn, 2002) та фізичне моделювання (Kobzova, 2003) свідчать про те, що вплив іоносферного джерела найсуттєвіший безпосередньо під замкнутим колом електроструменя. На значній віддалі (порядку 600 км) від осі електроструменя впливом джерела можна знехтувати й користуватись наближенням плоскої хвилі. По аналогії з північною півкулею можна припустити, що південний полярний струмінь знаходиться приблизно на геомагнітній широті 70° . Регіон Антарктичного півострова розташований на такій віддалі від епіцентру електроструменя, що впливом джерела можна знехтувати. Це обґрунтовує можливість використання МТ методу в цьому регіоні.

Ще одне застереження відносно глибинних МТ досліджень в Антарктичному регіоні. Складна 3D неоднорідність провідності поверхневого шару ускладнює інтерпретацію та погіршує достовірність отриманої інформації про глибинний геоелектричний розріз. Оцінити та врахувати вплив поверхневих неоднорідностей провідності на результати глибинних МТ і МВ зондувань – основна мета даної роботи.

2. Регіон досліджень

Для моделювання вибрано регіон, обмежений $51,4^\circ$ ч $68,6^\circ$ ЗД та 60° ч $67,2^\circ$ ПШ, який охоплює площу 640 тис. км^2 (800×800 км) (рис.1).

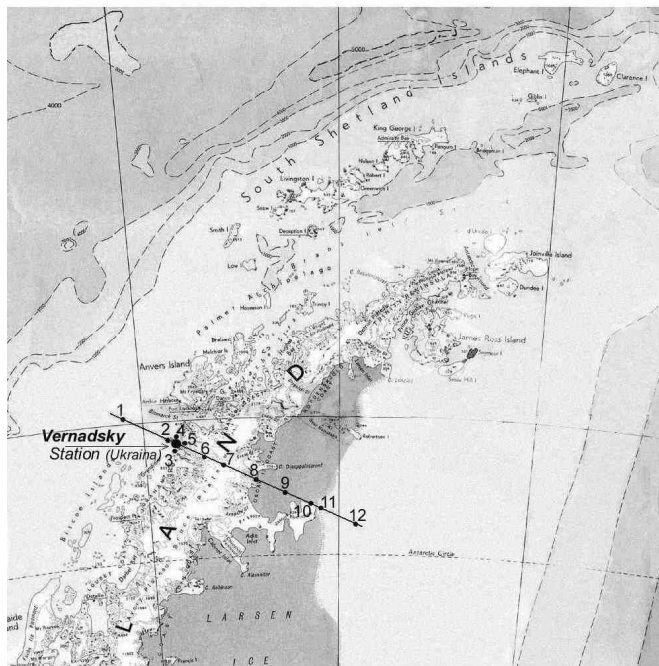


Рис. 1. Розташування профілю на карті регіону

Досліджуваний регіон географічно включає частину Антарктичного півострова з шельфовим льодовиком Ларсена, прилеглими островами (Шетландські, Пальмера, Біскайські, Росса, Джойнвілла та ін.), а також оточуючу акваторію з протоками Бренсфілд та Яаха, Шетландською западиною, морем Беллінсгаузена в Тихому океані на заході та морем Уделла на сході. Геоелектрична будова цього регіону відрізняється дуже значною та складною латеральною неоднорідністю електропровідності. Сушу Антарктичного півострова створюють кристалічні

породи з питомим опором близько 1000 Ом, лід на шельфі Ларсена товщиною 150–500 м (практично абсолютний діелектрик) і морська вода (0,3 Ом). Крім того, сумарну провідність поверхневого шару на площі всього регіону визначає складна топографія морського дна. Відносно глибинної будови цього регіону даних недостатньо.

3. Метод дослідження

Можливими методами визначення просторово-часової структури електромагнітного поля регіону із складною геоелектричною будовою можуть бути новітнє 3D математичне моделювання або лабораторне дослідження на фізичній моделі. При математичному моделюванні, яке допускає різноманітні спрощення, вихідні рівняння є в деякій мірі віртуальним наближенням і тому не завжди адекватні реальності. Для окремих ситуацій такі рівняння взагалі важко сформулювати. Можливості навіть найсучасніших комп'ютерів поки що недостатні для обчислення структур складної форми. У роботі, що пропонується, застосовано метод фізичного (аналогового) моделювання. Чому обрано цей метод?

Принципова відмінність фізичного моделювання полягає в тому, що на масштабних моделях вивчається реальне електромагнітне поле, яке розповсюджується тут по аналогії до природних умов. Електродинамічний процес моделюється в суцільному середовищі, а отже можливий дуже високий ступінь деталізації структур довільної форми. Фізичне та математичне моделювання дає розв'язки прямої задачі електродинаміки приблизно з однаковою точністю, хоча достовірність цих розв'язків може бути різною. Тому обидва методи можуть успішно доповнювати й контролювати один одного.

Основний принцип фізичного моделювання полягає в наступному: створюються зменшені в 10^4 – 10^6 разів масштабні моделі природних об'єктів та вивчається їхнє ЕМ поле, але в іншому частотному діапазоні, який, як правило, на 10^7 – 10^9 порядків вищий і визначається з закону подібності. При цьому зберігається абсолютна ідентичність електродинамічних процесів у природі й на моделі. Виходячи з закону подібності для гармонічних полів у немагнітних середовищах без урахування струмів зміщення, масштабні коефіцієнти розміру K_L , опору K_ρ і періоду K_T повинні відповідати співвідношенню $K^2_L = K_\rho \times K_T$. З урахуванням технічних можливостей установки та електричних опорів, застосованих при моделюванні матеріалів, для даної задачі вибрані коефіцієнти $K_L = 2 \times 10^5$, $K_c = 3$ і $K_T = 13 \times 10^9$. Згідно з цими коефіцієнтами було створено модель досліджуваного регіону.

4. Методика фізичного моделювання

Моделювання здійснено на спеціальній лабораторній установці (рис. 2) КВ ІГФ НАНУ, призначеній для моделювання ЕМ полів в неоднорідних середовищах (Бердичевский и др., 1987); (Мороз и др., 1999). Установка складається із антенної системи, яка створює однорідне гармонічне ЕМ поле в діапазоні 0,1–6 МГц; електролітичної ванни розміром 54540,7 м, що містить модель глибинного геоелектричного розрізу, й виміральної апаратури з цифровою реєстрацією п'яти компонент ЕМ поля в режимі частотного зондування та профілювання.

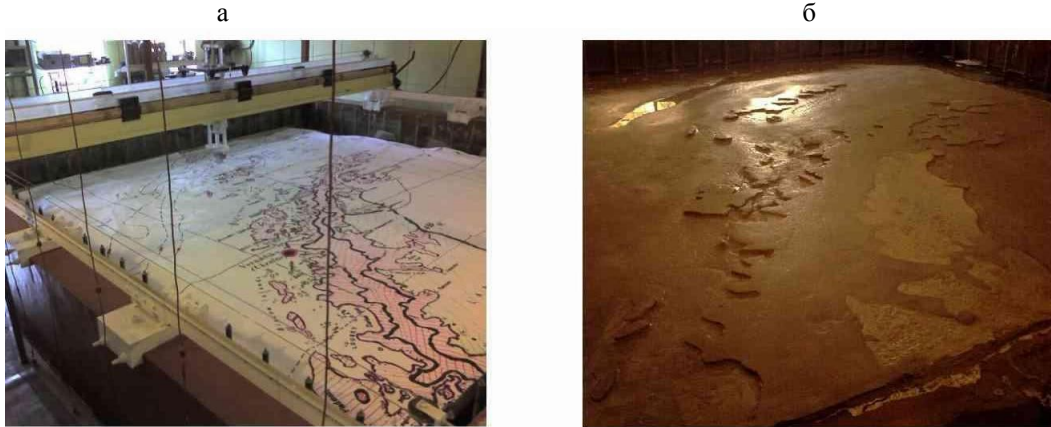


Рис. 2. Фізична модель Антарктичного півострова

В електролітичній ванні глибинний розріз регіону моделюється наступним чином. Металевий лист товщиною 12 мм на дні ванни імітує верхні шари високопровідної мантії. Шар керамічних плит товщиною 0,57 м, розташований на ньому по всій площі ванни, моделює літосферу. Поверхневі латеральні неоднорідності створювались у відповідності до карти регіону, що охоплює загальну площу $800 \times 800 \text{ км}^2$ (рис. 1). Карта, згідно з обраним коефіцієнтом $K_L = 2 \times 10^5$, була приведена до розміру 4Ч4 м (рис. 2а), що відповідає робочій площі ванни. Відповідно до цього шаблону з цементу було виготовлено модель (рис. 2б). Для моделювання суші співвідношення цемент/пісок обрано 1:1, що дає близько $\rho \approx 300 \text{ Омм}$, для морського дна – 1:4 з $\rho \approx 30 \text{ Омм}$. Цемент є зручним матеріалом, з якого можна створювати точні моделі будь-якої форми неоднорідностей суші та батиметрію дна, що є перевагою фізичного моделювання. Простір акваторії імітує шар розчину харчової солі NaCl, концентрацію якої підібрано так, що його питомий опір становить близько 0,07 Омм і залежить від температури в лабораторії. Таким чином, створена модель імітує розріз із неоднорідним поверхневим шаром, 120 км літосферою і високопровідною мантією на цій глибині. Робочий діапазон періодів на установці відповідає природним геоелектромагнітним варіаціям у діапазоні періодів 2200–130000 сек.

При фізичному моделюванні розв'язання прямої задачі електродинаміки для 3D конкретного середовища із заданим розподілом електропровідності зводиться до вимірювання просторових та частотних залежностей, амплітудних і фазових значень компонент напруженостей ЕМ поля.

На відміну від природних умов, де електромагнітна хвиля загалом еліптично поляризована, при фізичному моделюванні виміри виконуються по чергово в полі двох взаємно-перпендикулярно орієнтованих лінійно поляризованих ЕМ хвиль. Карту-шаблон розміщено у ванні таким чином, що її центральний меридіан 60° ЗД проходить точно вздовж середини ванни паралельно до її бічних стінок. Цей напрямок, прийнятий за вісь X, відповідає у природі географічному напрямкові південь–північ, і вздовж нього орієнтована X-поляризація первинного індукуючого струму. Так само Y-поляризації відповідає напрямок схід–захід. У режимі частотного зондування в довільному пункті моделі вимірюються амплітуди та фази п'яти компонент ЕМ поля на 20-ти частотах.

5. Результати фізичного моделювання

На створеній масштабній моделі Антарктичного півострова та прилеглих регіонів проведено виміри у 12-ти точках уздовж профілю, позначеного на карті (рис. 1.) Профіль проходить під кутом 60° до меридіана 60° ЗД , починаючи з морського пункту в Тихому океані, через о. Галіндез, перетинає Антарктичний півострів зі складною формою берегової лінії на заході (узбережжя Грехам) та шельфовим льодовиком Ларсена на сході, виходячи в акваторію моря

Уделла. В пунктах моделі побудовано амплітудні ρ_{xy} і ρ_{yx} та фазові криві МТ зондування, зображені на (рис. 3), де ρ_N – нормальна крива. Основною їх особливістю є статичний вертикальний зсув, обумовлений гальванічним спотворенням ЕМ поля поверхневими неоднорідностями провідності цілого регіону.

Подальша методика обробки та інтерпретації результатів фізичного моделювання за незначними винятками подібна до тієї, що використовується при польових магнітотелуричних спостереженнях. Обробка отриманих експериментальних матеріалів полягала в тому, що для всіх точок профілю розраховувались частотні залежності тензора імпедансу. Аналіз отриманих залежностей тензора імпедансу виконувався з використанням декомпозиції Еггерса (Eggers, 1982) і побудови полярних діаграм основних та додаткових імпедансів. Для прикладу: полярні діаграми основних та додаткових імпедансів приведено на рис. 4. для частоти збуджуючого поля 2 МГц на моделі, що відповідає 6500 с для природних умов згідно з вибраними коефіцієнтами подібності.

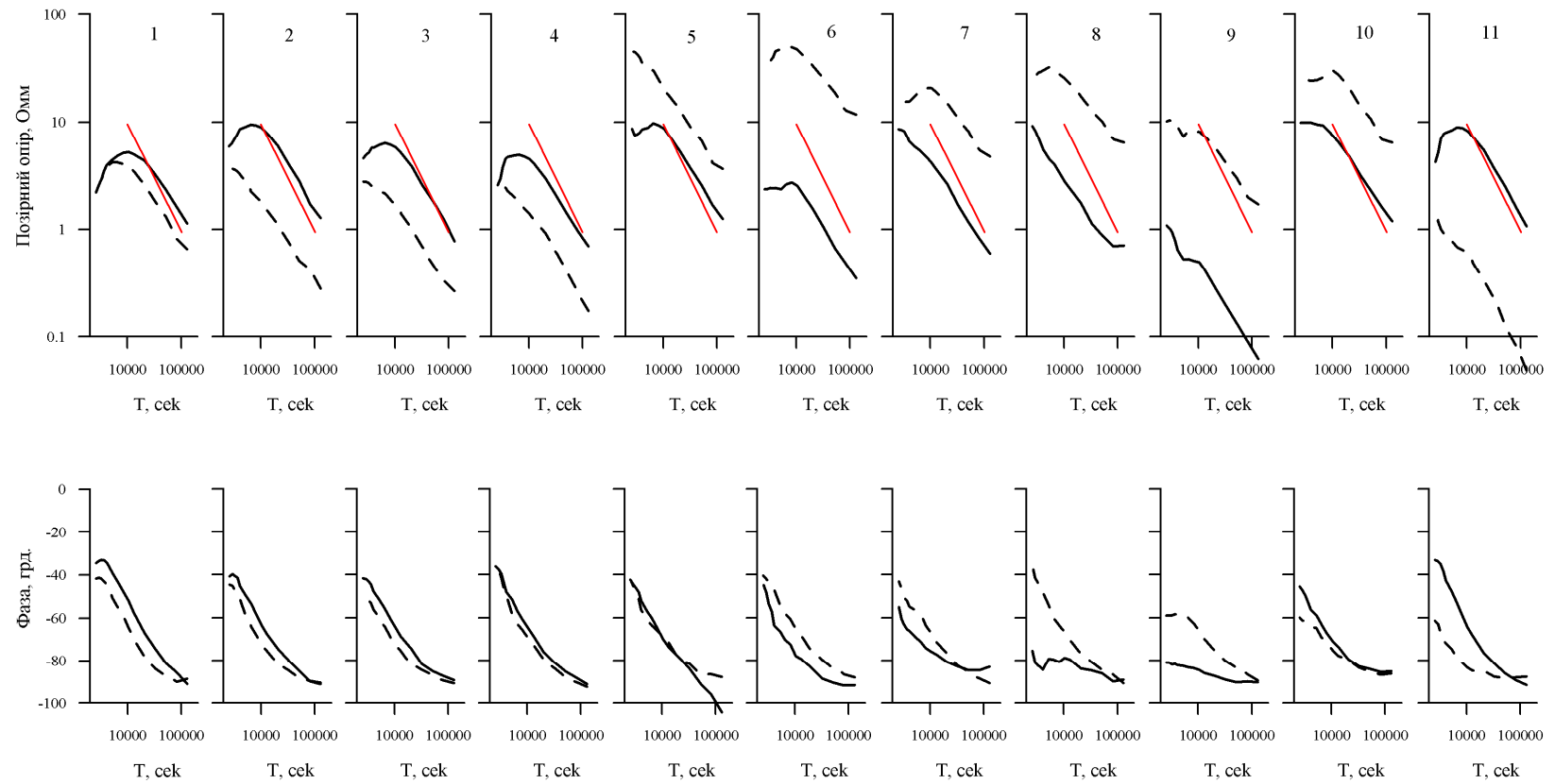


Рис. 3. Амплітудні та фазові криві МТ зондування в пунктах 1–11. Суцільна лінія – s_{xy} , пунктир – s_{yx} , червона – s_n

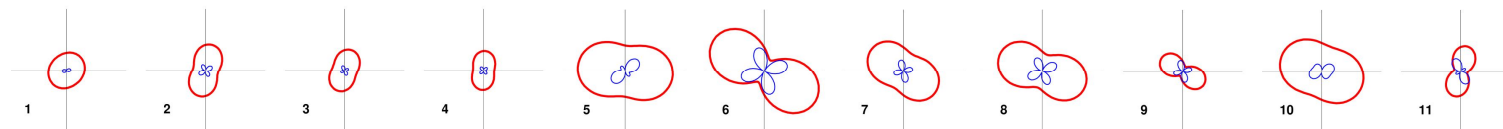


Рис. 4. Полярні діаграми основних (червоні лінії) та додаткових (сині лінії) імпедансів.

Проведений аналіз дозволив виявити характерні напрямки тензора імпедансу для точок досліджуваного профілю, які становлять 20° та 110° . Азимут 20° приблизно співпадає з простяганням моделі півострова, а 110° – перпендикулярний до нього. Слід відзначити, що знайдені характерні напрямки не повністю співпадають з тими, що їх отримано за реальними даними магнітотелуричних спостережень в Антарктиді (Корепанов та ін., 2004). Це можна пояснити особливостями виготовлення моделі. Як видно на рис. 1., координатна вісь X моделі співпадає з меридіаном 60° західної довготи. В районі розташування станції Ак. Вернадський меридіан складає з координатою X кут приблизно 15° , який необхідно додати до визначеного на основі аналізу. Тоді експериментальні і природні дані добре узгоджуються.

Всі значення тензора імпедансу повернуто у визначені характерні напрямки 20° та 110° , перераховані за коефіцієнтами подібності до величин, що відповідають природним умовам, та виконано двовимірну інверсію. За результатами двовимірної інверсії даних спостережень на фізичній моделі отримано геоелектричний розріз, наведений на рис. 5.

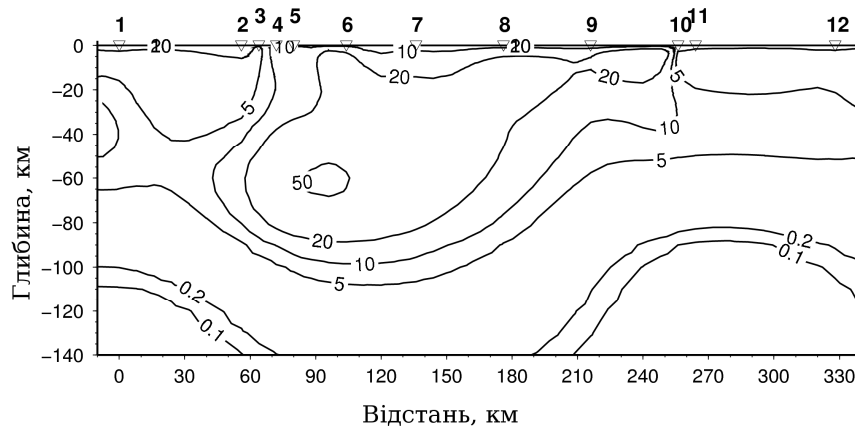


Рис. 5. Геоелектричний розріз уздовж досліджуваного профілю за результатами інверсії даних фізичного моделювання

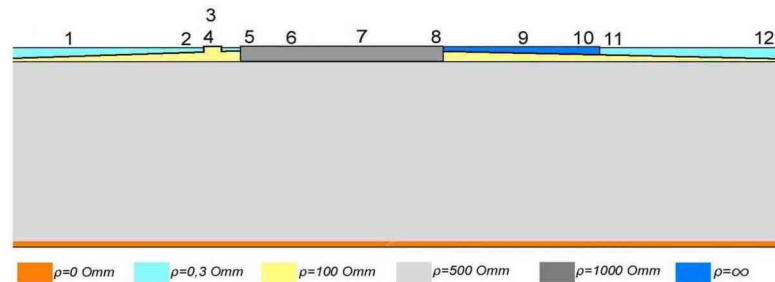


Рис. 6. Реальний розріз робочого профілю моделі

Дійсний розріз уздовж цього профілю на моделі достовірно відомий і, враховуючи масштабні коефіцієнти, зображений на рис. 6. Як бачимо, вони суттєво відрізняються. В дійсності високопровідний шар на дні моделі ($\rho=0$ Омм), що імітує мантію, був горизонтальний і відповідав глибині 120 км. При інтерпретації вийшло, що мантія не горизонтальна, а її глибину під півостровом суттєво завищено. Крім того матеріал, з якого виготовлено модель літосфери під півостровом і під океаном, був той самий – керамічні плити з однаковим питомим опором ($\rho=500$ Омм). При інтерпретації цей опір на порядок менший і, судячи з картини ізоліній, – зовсім неоднорідний.

Чим можна пояснити такі розбіжності? Досліджується МТ поле в досить довгоперіодній області, тому завдяки горизонтальному скін-ефекту має місце значний вплив оточуючих

структур, що знаходяться на значних по латералі віддальх від робочого профілю. На моделі поверхневий шар включає контрастні за провідністю структури – острови, протоки, западину, півострів, льодовик, рельєф дна. Тобто обрамлення профілю є тривимірним, як це закладено в алгоритмі 2D інверсії, й тому вплив суперпозиції аномальних полів цих структур не враховує застосована методика 2D інтерпретації.

Аналіз частотних залежностей дійсних C_u і уявних C_v магнітоваріаційних параметрів моделі показав, що в просторі робочого профілю їх найбільші значення не перевищують 0,4 і спостерігаються на періодах, близьких до 3600 с в районі переходу від льодовика Ларсена до моря Уделла. Дійсні індукційні стрілки для цього періоду зображені на рис. 7.

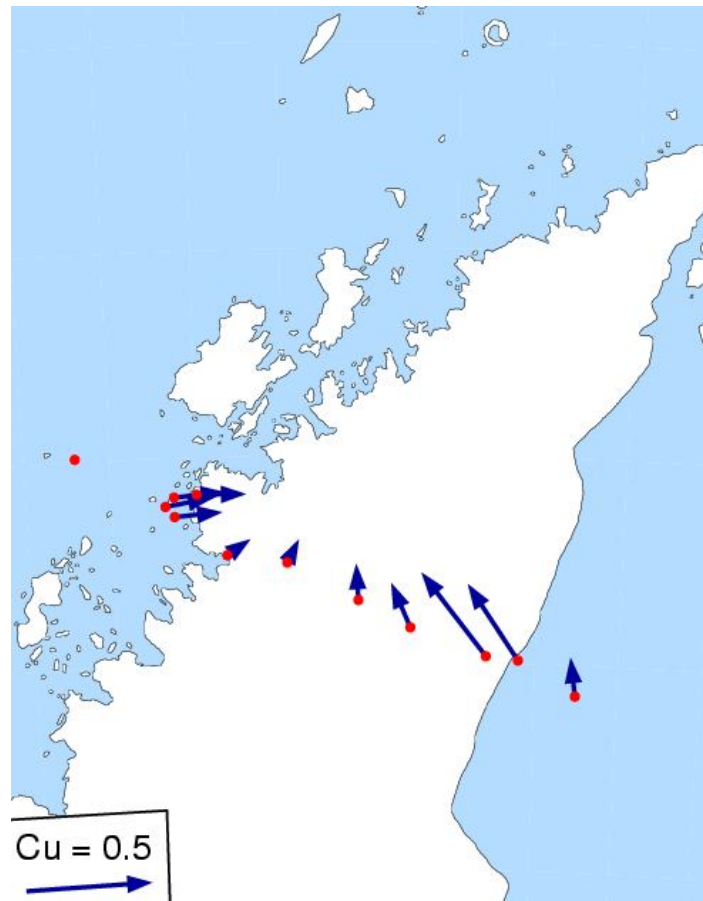


Рис. 7. Індукційні вектори досліджуваного профілю

З усіх точок профілю модельні результати можна порівняти з геомагнітними спостереженнями тільки на ст. Ак. Вернадський. На обсерваторії максимум частотної характеристики C_u спостерігається на періодах 3000–4000 с, на моделі – 3600 с. Значення індукційних стрілок у природі та на моделі складає відповідно 0,4 та 0,2. Кількісну відмінність магнітоваріаційних параметрів можна пояснити дуже великою провідністю металевого дна, яке імітує високопровідну мантию і зменшує вплив індукційних ефектів.

Порівняння магнітоваріаційних параметрів, одержаних при 3D аналоговому і 2D чисельному (Логвінов та ін., 2006) моделюванні, не вказує на їх принципову відмінність, хоча в тривимірному середовищі спостерігаються менші індукційні ефекти. Виконані експерименти показали, яких спотворень результатів глибинних МТ зондувань слід очікувати на Антарктичному півострові за рахунок тривимірності поверхневих структур, і в подальшому враховувати їх при геофізичній інтерпретації польових спостережень.

6. Висновки

Імітація геоелектромагнітного поля на аналоговій моделі дозволила одержати інформацію про просторово-часову структуру природного ЕМ поля у важкодоступному для польових спостережень регіоні Антарктичного півострова.

Характер ЕМ поля регіону в діапазоні періодів порядку 2200–130000 с в основному визначається контрастами провідності тривимірних поверхневих структур, що має відповідне відображення у магнітотелуричних і магнітоваріаційних параметрах.

Метод фізичного моделювання використано для розв'язання 3D прямої задачі ЕМ поля стосовно простору Антарктичного півострова та його оточення.

Інтерпретація результатів глибинних МТ зондувань із застосуванням 2D інверсії передавальної функції, завдяки впливові 3D поверхневих неоднорідностей, дає спотворені дані щодо геоелектричного розрізу вздовж профілю, який перетинає Антарктичний півострів: глибина мантиї під ним завищена, опір літосфери занижений.

Отримана інформація може бути використана для контролю та корекції результатів геоелектромагнітних досліджень у регіоні.

Роботу виконано за часткової підтримки договору № Н/3–2007 НАНЦ України.

Перелік посилань

Бердичевский М.Н., Мороз И.П., Кобзова И.М. и др. – Физическое моделирование в геоэлектрике. – К. Наукова думка, 1987, 139 с.

Корепанов В., Міліневський Г., Максимчук В. та ін. Стан та перспективи дослідження глибинної будови та динаміки земної кори в районі станції Академік Вернадський геоелектромагнітними методами // УАЖ. – 2004. – № 2. – С. 25–37

Логвинов И.М., Тарасов В.Н., Ладанівський Б.Т. Электромагнитные исследования в районе обсерватории Акад. Вернадский (Антарктида). УАЖ-2006, № 4-5. – С. 21–29.

Мороз І.П., Кобзова В.М., Ладанівський Б.Т., Гончарук Л.Т. – Установка для моделювання електромагнітної індукції в Землі. Патент на винахід № 94096874, G06 G7/48, 1999.

Eggers D.E. An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor. // *Geophysics*, 1982, 47, p.1204–1214.

Kobzova V.M., B.T. Ladanivsky, V.E.Korepanov. Physical modeling of electromagnetic field of auroral electrojet, *Acta Geophysica Polonica*, 2003, vol. 51, 3, 337–345.

L.L. Vanyan, V.A. Kuznetsov, T.V. Lyubetskaya and the BEAR Working Group. Electrical Conductivity of the Crust beneath Central Lapland // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2002, Vol. 38, No. 10, pp. 798–815. Translated from *Fizika Zemli*, 2002, No. 10, pp. 4–22.