

УДК 550.38; 550.380

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЛИБИННОЇ БУДОВИ ТА ДИНАМІКИ ЗЕМНОЇ КОРИ В РАЙОНІ СТАНЦІЇ АКАДЕМІК ВЕРНАДСЬКИЙ ГЕОЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ МЕТОДАМИ

В. Корепанов¹, Г. Міліневський², В. Максимчук³, Б. Ладанівський³, Є. Накалов¹

¹ Львівський центр Інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ, вул. Наукова, 5-А, Львів-60, 79000, vakor@isr.lviv.ua

² ДНВП "Український антарктичний центр", б. Шевченка, 16, Київ, 01601, science@uac.gov.ua

³ Карпатське відділення Інституту геофізики ім. Суботіна НАНУ, вул. Наукова, 3Б, Львів, 79060, depart10@cb-igph.lviv.ua

Реферат. Поблизу станції Академік Вернадський виконані дослідження глибинної будови земної кори з застосуванням двох методів: магнітотелуричного зондування (МТЗ) та тектономагнітного профілювання (ТМП). Подано опис нового електромагнітного обладнання станції і його основних технічних параметрів. Наведено дані вимірювань двома методами та обговорюються перші результати їх інтерпретації. Результати ТМП показали хорошу кореляцію профілів статичної (ΔT) та динамічної ($\Delta \Delta T$) аномалій магнітного поля на ділянці досліджень та виявили інтенсивну динамічну магнітну аномалію, викликану сучасними геодинамічними процесами. Їх інтерпретація дозволяє зробити висновок про високу тектонічну активність субмеридіонального глибинного розлому, що проходить поблизу станції, на що вказує отримана оцінка середньої швидкості локальних змін напружень розтягу ~ 6 Бар/рік субширотного напрямку. Обробка даних МТЗ дозволила визначити азимуті головних напрямів тензора імпедансу: 50° для максимуму імпедансу, що співпадає з напрямом простягання континентальної берегової лінії в цьому регіоні та 140° для мінімуму імпедансу. Інтерпретація цих даних свідчить про складну тривимірну геоелектричну структуру регіону, ймовірно зумовлену глибинним розломом (або серією розломів) поблизу західного узбережжя Антарктичного півострова.

Состояние и перспективы исследований глубинного строения и динамики земной коры в районе станции Академик Вернадский геоэлектромагнитными методами. В. Корепанов, Г. Милиневский, В. Максимчук, Б. Ладановский, Е. Накалов

Реферат. Вблизи станции Академик Вернадский проведены исследования глубинного строения земной коры с использованием двух методов: магнитотеллурического зондирования (МТЗ) тектономагнитного профилирования (ТМП). Приведено описание нового электромагнитного оборудования станции и его основных технических параметров. Наведены данные измерений двумя методами и обсуждаются первые результаты их интерпретации. Результаты ТМП показали хорошее коррелирование профилей статичной (ΔT) и динамической ($\Delta \Delta T$) аномалий магнитного поля на исследуемом участке и выявили интенсивную динамическую магнитную аномалию, вызванную современными геодинамическими процессами. Их интерпретация позволяет сделать заключение о высокой тектонической активности субмеридионального глубинного разлома, проходящего вблизи станции, на что указывает полученная оценка средней скорости локальных изменений напряженности растяжения ~ 6 Бар/год субширотного направления. Обработка данных МТЗ позволила определить азимуты главных направлений тензора импеданса: 50° для максимума импеданса, что совпадает с направлением протяжения континентальной береговой линии в этом регионе и 140° для минимума импеданса. Интерпретация этих данных свидетельствует о сложной трехмерной геометрической структуре региона, вероятно обусловленной глубинным разломом (или серией разломов) вблизи западного побережья Антарктического полуострова.

Earth Crust Deep Structure and Dynamics Study at the Vernadsky Station by Geoelectromagnetic Methods – Present State and Perspectives by V. Korepanov, G. Milinevsky, V. Maksymchuk, B. Ladanivsky, Ye. Nakalov

Abstract. The Earth crust deep structure at the Academic Vernadsky station was studied by two methods: magnetotelluric sounding (MTS) and tectonomagnetic profiling (TMP). New electromagnetic instrumentation of the station is shortly described and its main technical parameters are given. The measurements results obtained by both experimental methods are presented and first interpretation attempts are made and discussed. The TMP results showed good coincidence of static (ΔT) and dynamic ($\Delta \Delta T$) magnetic field anomalies plots along the selected profile and reveal intense dynamic magnetic anomaly caused by modern geodynamic processes. Their interpretation allows identifying the tectonic through of submeridional direction in the station region with intensive geodynamic processes: mean speed of the sublatitude local strain there can be estimated within 6 Bar/year. The MTS data processing showed clearly seen orientation of main directions azimuths of impedance tensor: 50° for maximal impedance and 140° for minimal one, by this maximal impedance azimuth coincides with the continental shore line direction in the region. Their interpretation indicates high probability of the existence of deep trough (or a set of troughs) along the western shore of the Antarctic Peninsula and of the complicated 3D geoelectric structure there.

Key words: magnetometer, electrometer, magnetotelluric sounding, tectonomagnetic profiling, geodynamics.

1. Вступ

Дослідження електромагнітних полів є профілюючим напрямом робіт на станції Академік Вернадський і проводяться від першого року її існування. Від 1998 року з метою дослідження динаміки аномального магнітного поля Землі розпочато тектономагнітне профілювання (ТМП). Тектономагнітний метод знайшов широке застосування для виявлення та картування зон тектонічно активних розломів, вивчення сейсмотектонічних процесів та провісників землетрусів, тектонічного районування та розв'язання інших геолого-геофізичних завдань геодинамічного спрямування (Сковородкин, 1985; Максимчук та ін., 2001). Ці проблеми є актуальними і для регіону Антарктичного півострова, адже за геоморфологічними, геологічними, батиметричними і геофізичними даними поблизу району виділяються важливі з позицій сучасної геодинаміки структурні елементи – рифтогенні грабени, глибинні розломи і лінеamenti. В 2002 році на станції розпочаті магніотелуричні зондування (МТЗ), основним завданням яких є вивчення геоелектричного розрізу земної кори і верхньої мантії. Ці методи органічно поєднані передусім спільною метою: побудовою геоелектричної моделі земної літосфери та моніторингу динаміки її розвитку. Постановка ТМП і МТЗ дозволить отримати нові дані про глибинну будову і тектонічну активність регіону і представляє певний інтерес. Нижче описані перші результати цих досліджень.

2. Обладнання

Магнітометрична апаратура, якою була обладнана магнітна обсерваторія „Аргентинські острови”, не дозволяє вимірювати параметри електромагнітного поля Землі з необхідною для застосування геоелектричних методів досліджень точністю та дискретністю. В плані виконання Державної програми досліджень України в Антарктиці була здійснена модернізація магнітної обсерваторії для забезпечення сучасного технічного рівня та входження в міжнародну мережу ІНТЕРМАГНЕТ, а також розширення комплексу геофізичних досліджень на станції. На сьогодні станція Академік Вернадський обладнана комплексом апаратури для електромагнітних (ЕМ) досліджень, у який входять:

- два автоматичні трикомпонентні ферозондові магнітометри постійного поля типу LEMI-008;
- комплект з п'яти індукційних магнітометрів змінного поля типу LEMI-112;
- двокомпонентний електрометр для вимірювання напруженості телуричних полів;
- система збору, синхронізації та накопичення інформації.

Всі ці прилади і відповідне програмне забезпечення створені в Україні. Крім того, в межах міжнародної кооперації Геологічна служба Сполучених Штатів Америки (USGS) надала безоплатно Українському антарктичному центрові систему автоматичної передачі даних через американський супутник GOES, яка також встановлена на станції і регулярно передає дані вимірювання магнітного поля Землі в систему “INTERMAGNET”.

Параметри встановленого на станції комплексу апаратури відповідають рівневі кращих у світі обсерваторій. Про це, передусім, свідчить висока стабільність базової лінії головного варіометра станції LEMI-008 за останні три роки. Багаторічний дрейф нуля знаходиться в межах $\pm 2,5$ нТл при світовому стандарті ± 5 нТл на рік (рис. 1), а якщо вилучити сезонний тренд, то розкид вимірювань взагалі вкладається в 1 нТл, що є одним з найвищих у світі показників для цього класу приладів.

Магнітометри цього типу мають вбудовану FLASH-пам'ять для накопичення й зберігання даних, GPS-приймач для синхронізації відбору даних та визначення координат, цифровий вихід RS-232 для передачі даних з FLASH-пам'яті до комп'ютера та зовнішнього контролю режимів роботи, дисплей та аналоговий вихід для під'єднання до зовнішньої системи збору й обробки даних. Основні технічні характеристики магнітометра LEMI-008 подані в табл. 1.

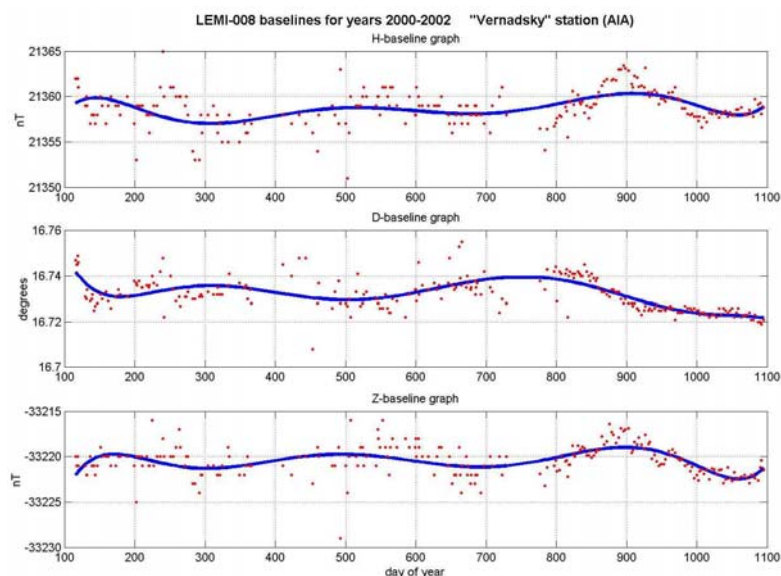


Рис. 1. Базова лінія магнітометра обсерваторії АІА за три роки.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики магнітометра LEMI-008

Повний діапазон вимірювання магнітного поля	± 65000 нТл
Діапазон вимірювання варіацій магнітного поля (після компенсації зміщення)	± 6000 нТл
Роздільна здатність вздовж кожної компоненти на дисплеї та реєстрована внутрішньою FLASH пам'яттю	10 пТл
Діапазон вимірювання на аналогових виходах	± 4500 нТл
Коефіцієнт перетворення на аналогових виходах	1 мВ/нТл
Температурний дрейф	<0.2 нТл/°C
Смуга пропускання на аналоговому виході	DC-1 Гц
Шум на аналоговому виході в частотному діапазоні 0.03 - 1 Гц	< 20 пТл скз
Похибка ортогональності компонент	$<30'$
Діапазон автоматичної компенсації зміщення вздовж кожної компоненти	± 65000 нТл
Час усереднення варіацій	1...255 с
Об'єм вбудованої FLASH-пам'яті	8 МВ
Цифровий вихід	RS 232
GPS-синхронізація та визначення координат	
Температурний діапазон	-5... +40°C
Роздільна здатність температурних датчиків (з електронікою)	1 °C
Живлення	12 В; 0,15 А
Маса:	
давач з підставкою	3,0 кг
електроніка	1,5 кг

У період проведення робіт, результати яких обговорюються, магнітні осі обох LEMI-008 були розташовані за системою H, D, Z, тобто вісь H спрямована вздовж магнітного меридіана.

Напруженість електричного поля вимірювалась за допомогою електрометра, розташованого на території станції. У зв'язку з виходом скельних порід і практичною відсутністю осадового покриву первинні вимірювальні перетворювачі – електроди – довелося

розташувати у природних щілинах та заглибинах. У результаті опорні електроди № 0 та № 24 були розташовані в одній ямці, база одного з горизонтальних каналів – E_x – вийшла рівною 100 м, база каналу E_y має довжину 75 м, а їх орієнтація відносно напрямку на геомагнітну північ показана на рис. 2.

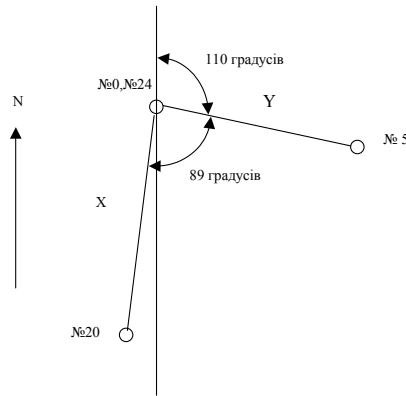


Рис.2. Схема розташування електричних ліній та електродів.

Протягом цілого 2003 року, крім збору даних про електричні потенціали (рис. 3а), досліджувалася поведінка електродів, встановлених у ґрунті. Для цього регулярно вимірювався прохідний опір електричних ліній x та y у каналів, а також опір між базовими електродами № 0 та № 24 (відповідно, графіки X , Y та C . Результати вимірювань подані на рис. 3б.

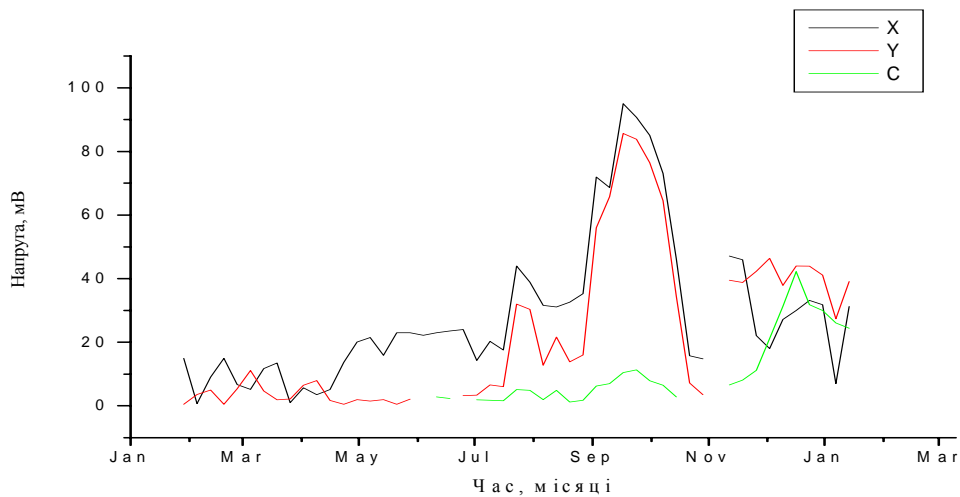


Рис.3а. Потенціали на електричних лініях X , Y , C за 2003 рік.

Аналіз даних вимірювань електричного поля показує, що в період антарктичної зими (липень – жовтень) контактний розчин, у який були занурені електроди, замерз, через що як опір між електродами, так і вихідна напруга ліній суттєво зросли. Після потепління прохідний опір або опір розтікання електродів практично повернувся до попередніх значень (до замерзання), але різниця потенціалів між відібраними парами № 0 - № 20 та № 24 - № 5 суттєво зросла. Тим не менше, як буде показано далі, отримані від електрометрів дані були успішно використані для магнітотелуричного зондування. Це дозволяє зробити перший дуже важливий

висновок: створені в ЛЦ ІКД електроди можуть бути використані для постійного цілорічного моніторингу електричного поля Землі (телуричного поля).

Для тектономагнітних досліджень необхідно періодично вимірювати модуль магнітного поля одночасно в двох пунктах – базовому й рядовому. Такі вимірювання достатньо проводити раз на рік, що й робиться на станції під час сезонних експедицій із застосуванням протонних магніто-варіаційних станцій типу МВ-01, виготовлених підприємством “Геологоразведка” (м. Санкт-Петербург). Основні технічні параметри цих станцій наведені в табл. 2.

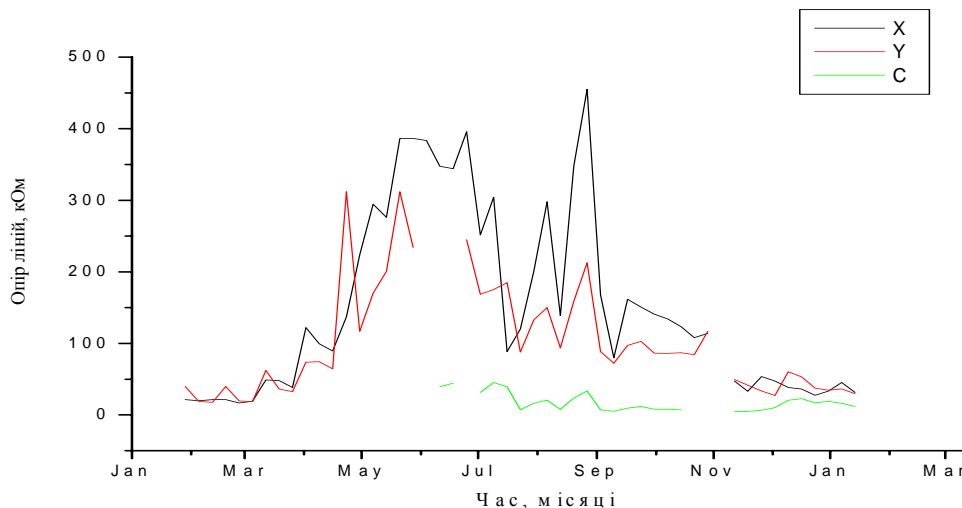


Рис.36. Опір електричних ліній X, Y, C за 2003 рік.

Таблиця 2. Основні технічні характеристики магніто-варіаційних станцій типу МВ-01

1. Діапазон вимірювань	20 000 - 100 000 нТл
2. Похибка зчитування (чутливість)	$\pm 0,1$ нТл
3. Систематична похибка абсолютних вимірювань	$\leq \pm 1,0$ нТл
4. Середнє квадратичне відхилення випадкової складової похибки	0,1 нТл
5. Мінімальний цикл автоматичного запуску	4 с
6. Автономність роботи станції при циклі автозапуску 30 с	72 год
7. Температурний діапазон: давача реєстратора	від -30 до +50 °C від 0 до +50 °C
8. Напруга живлення	(13 \pm 2) В
9. Середня споживана потужність від джерела постійного струму +12В	± 10 Вт
10. Довжина з'єднувального кабелю між давачем і реєстратором	50 м
з можливістю підключення кабелю довжиною	200 м
11. Маса робочого комплексу (без джерела живлення)	≤ 20 кг

З описаною вище апаратурою були виконані експериментальні дослідження на станції Академік Вернадський, попередні результати яких подані нижче. У зв'язку з віддаленістю від будь-яких джерел випромінювання, територія станції є винятково зручним полігоном для проведення досліджень тонкої структури природних ЕМ емісій. Для забезпечення ЕМ чистоти були вжиті додаткові заходи: заземлено побутову електромережу, складено графіки ввімкнення

побутового й наукового обладнання значної потужності. Проте деякі джерела ЕМ завод не вдалося повністю ліквідувати. Наприклад, чітко видно заваду, викликану роботою потужного КХ-передавача станції. Але, оскільки ця подія трапляється відносно рідко, суттєвого впливу на якість отриманих результатів вона не має. В майбутньому планується замінити цей пристрій на УКХ-передавач з супутниковим ретранслятором, що усуне джерело завади.

Таким чином, у геомагнітній обсерваторії станції створені відповідні умови для проведення вимірювань слабких ЕМ сигналів і використання їх результатів для геофізичних досліджень.

3. Тектономагнітний моніторинг

Тектономагнітний метод базується на вивченні локальних часових змін геомагнітного поля, зумовлених різними фізико-хімічними процесами в земній корі. Сучасні сейсотектонічні процеси, які найінтенсивніше протікають в зонах активних розломів, призводять до змін фізико-механічних, електричних, магнітних та інших властивостей гірських порід, порушення гідрорежиму і спричиняють відчутні зміни магнітного поля, які можуть бути виявлені при повторних магнітних спостереженнях.

ТМП в регіоні станції Академік Вернадський було розпочате в 1998 році вздовж профілю Бархани-Расмуссен під час 3-ї Антарктичної експедиції (Maksymchuk et al., 2002). Другий і третій цикли спостережень, виконані в 2001 і 2002 роках, дозволили отримати дані про динаміку аномального магнітного поля на цій ділянці.

Класична методика ТМП полягає у проведенні на закріпленій мережі пунктів і профілів через певні часові інтервали спостережень модуля повного вектора геомагнітного поля F . З метою уникнення впливу варіацій зовнішнього магнітного поля, роботи виконуються за схемою синхронних диференціальних вимірювань поля F на базовому F_b і рядовому F_n пунктах. Різницеве поле $\Delta F = F_n - F_b$, у зв'язку з невеликими відстанями між базовим і рядовим пунктами вважається позбавленим впливу зовнішніх джерел магнітного поля. Шуканим параметром при тектономагнітних дослідженнях є параметр $\Delta\Delta F$, який характеризує зміни ΔF за період між циклами спостережень:

$$\Delta\Delta F = \Delta F_2 - \Delta F_1,$$

де ΔF_1 і ΔF_2 - значення ΔF у першому й другому (наступному) циклах вимірювання. Інтервали між циклами спостережень визначаються завданнями робіт та технічними умовами їх проведення. Зважаючи на специфіку кліматичних умов Антарктики, повторні вимірювання виконувались щонайменше один раз на рік і спрямовувались на виявлення довготривалих (більше одного року) часових змін аномального магнітного поля.

Виконані в 1998, 2001 та 2002 роках три цикли тектономагнітних спостережень дозволили дослідити особливості аномального магнітного поля ΔF та його довготривалі часові зміни $\Delta\Delta F$ вздовж профілю Бархани-Расмуссен. Отримані дані наведені на рис. 4.

На жаль, невелика щільність пунктів спостережень не дозволяє повною мірою відтворити всю повноту структури аномального магнітного поля. Проте, навіть при такій ситуації тут виділяється локальна аномалія ΔF близько 600 нТл на о. Троє Маленьких Поросят (п. 3), а також у східній частині профілю, на м. Расмуссен (п.7), де поле ΔF досягає майже 1000 нТл (рис. 4, а).

Часові зміни аномального магнітного поля – тектономагнітні аномалії $\Delta\Delta F$, виявлені за результатами трьох циклів спостережень, становлять від одиниць нТл до майже 15 нТл (за період від 1998 р. до 2002 р.) (рис. 4, б). В розподілі поля $\Delta\Delta F$ вздовж профілю спостерігається певна закономірність, яка виявляється як у період 1998-2001 рр., так і на сумарній кривій $\Delta\Delta F$ (1998-2002 рр.). Східна частина профілю (п. 4, 5, 6) загалом характеризується незначними додатними значеннями $\Delta\Delta F$ близько 2 нТл. На західній ділянці профілю (п.1, 2, 3) поле $\Delta\Delta F$ від'ємне, різко аномальне, від -3,5 нТл (п. 2) до -14,6 нТл (п. 3).

Співставлення поля $\Delta\Delta F$ зі схемою поширення інтрузивно-вулканогенних утворень свідчить про їх певний зв'язок. Так, аномалія в статичному (ΔF) і динамічному ($\Delta\Delta F$) полі (п.3,

о. Троє Маленьких Поросят) відображає зону контакту верхньоюрських метаморфізованих вулканогенних порід з ранньокайнозойським інтрузивним комплексом, яка має ширину близько 1000 м.

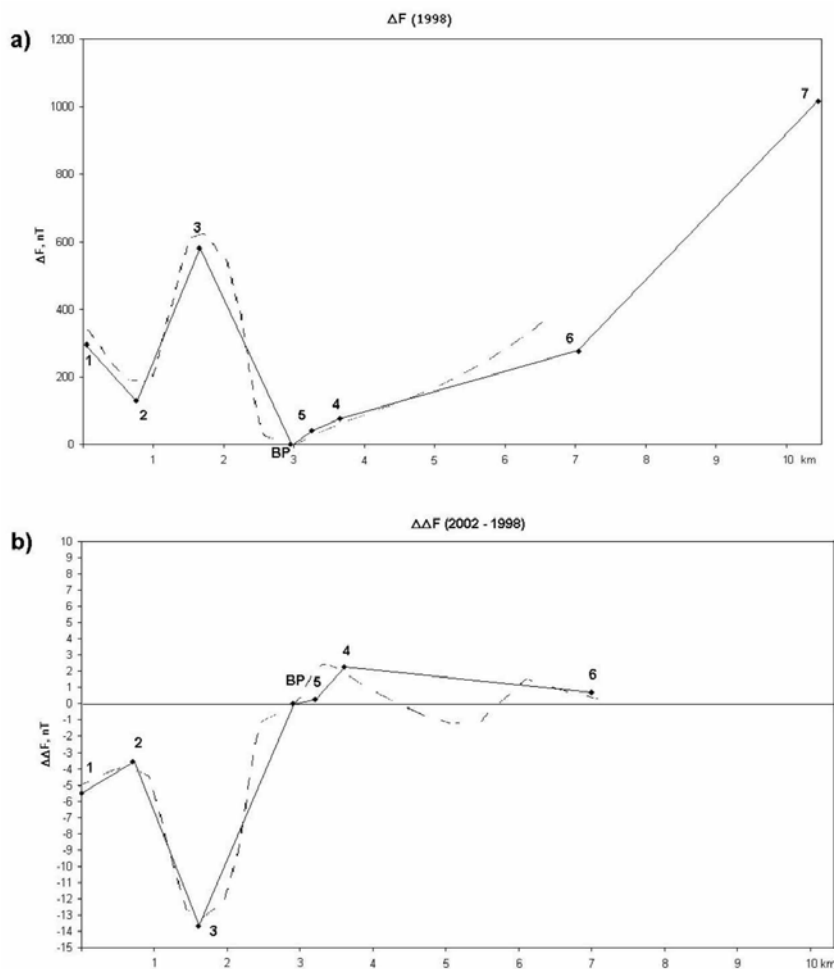


Рис. 4. Аномальне магнітне поле ΔF (а) та його часові зміни $\Delta \Delta F$ за період 1998 - 2002 (б); їх модельна апроксимація (пунктир) по профілю Бархани-Расмуссен.

Важливою особливістю поля $\Delta \Delta F$ є його досить виразна кореляція з аномальним магнітним полем. Отримані в експерименті значення поля ΔF_a і його часових змін $\Delta \Delta F$ мають подібну морфологію, особливо для західної ділянки профілю (пункти 1-5) (рис. 4б). Це дозволяє висловити гіпотезу, що виявлені зміни поля пов'язані зі зміною магнітних параметрів і можуть викликатися як активними фізичними явищами (п'єземагнітний ефект), так і пасивними (підмагнічування віковою варіацією). Можливість помітного внеску підмагнічування в часові зміни $\Delta \Delta F$ є наслідком великих значень вікового ходу геомагнітного поля в даному регіоні ($\Delta Z_{вх} \approx 70$ нТл/рік, $\Delta X_{вх} \approx -50$ нТл/рік, $\Delta Y_{вх} \approx -25$ нТл/рік), а також високої магнітної сприйнятливості порід ($\kappa \sim 25 \cdot 10^{-3}$ од. СІ) (Максимчук та ін., 2003).

Для оцінки внеску п'єземагнітного ефекту в зміни намагніченості підбиралась така модель магнітної неоднорідності і змін намагніченості цієї неоднорідності, яка б могла добре описати спостережені криві ΔF_a і $\Delta \Delta F$ (Максимчук та ін., 2001). Результати виконаних розрахунків подані на рис. 4, а і б, пунктирними лініями. Вони переконливо свідчать про

вплив, в основному, п'єзомагнітного ефекту. З описаного результату можна зробити висновок, що в ділянці спостережень протягом чотирьох років (1998-2002) відбувалися зміни напружень розтягу близько 6 Бар/рік в субширотному напрямі. Для отримання більш повної інформації про динаміку аномального магнітного поля в цьому цікавому регіоні необхідно розширити мережу пунктів спостережень, закласти нові профілі.

4. Результати обробки даних МТЗ

Проведення магнітотелуричних зондувань в Антарктиді має ряд відмінностей від аналогічних досліджень виконаних в середніх широтах на інших континентах. Одна з них – це наявність на більшій частині континенту шару льоду, товщина якого досягає декількох кілометрів. Аналогічним несприятливим фактором для МТ методу є та обставина, що на більшості ділянок, не покритих льодом, на поверхню виступають високоомні скельні породи. В обох випадках велике значення перехідного імпедансу між середовищем і електродами ставить особливі вимоги до реєстрації електричних компонент МТ поля (Wannamaker et al., 1996). Іншою особливістю МТЗ в Антарктиді є відносно невелика відстань від регіону досліджень до джерел геомагнітних варіацій. Джерелом МТ варіацій є іоносферні та магнітосферні струми, що виникають при взаємодії сонячної та навколосемної плазми з постійним геомагнітним полем. В середніх широтах ЕМ поле цих варіацій можна розглядати як горизонтально-однорідне магнітне поле чи поле вертикально падаючої зверху плоскої однорідної ЕМ хвилі (Бердичевский и др., 1992). Проте в полярних широтах існує велика ймовірність, що поле геоелектромагнітних варіацій може суттєво відрізнитись від такої моделі. Тому для полярних регіонів необхідно визначити межі використання класичної теорії МТ методу і зробити оцінки похибок, що можуть виникати за рахунок впливу джерела. Дослідження впливу полярного електроджету на результати МТЗ проводились за допомогою методу фізичного моделювання (Kobzova et al., 2003). Ці дослідження свідчать, що в авроральній ділянці безпосередньо під іоносферним електроджетом результати глибинних МТ зондувань досить близькі до отриманих в полі плоскої хвилі. Вплив джерела найсуттєвіший у зоні замикання струмів електроджету, але при достатньому віддаленні від неї цим впливом також можна знехтувати: отримана оцінка показує, що в ділянці, віддаленій більш як на 600 км від осі електроджету, вже можна користуватися наближенням плоскої хвилі. Ці висновки лабораторного експерименту пояснюють успішність проведення МТЗ в Антарктиді (Wannamaker et al., 1996; Beblo et al., 1990).

За допомогою магнітометра LEMI-008 та двокомпонентного електрометра, які безперервно працюють на території станції від 2001 року, зібрано масив даних ЕМ варіацій за 2002 рік, який піддано обробці за методикою МТЗ. Часові записи компонент ЕМ поля піддавались візуальній оцінці (рис. 5).

Варіації магнітного поля наведені в нанотеслах (nT), електричного (напряга між електродами, база E_x – 100 метрів, база E_y – 75 метрів) – у мілівольтах (mV). Компонента E_y наведена з інверсною віссю для зручності візуальної оцінки кореляції з магнітною компонентою H_x . На рис. 5 між відповідними парами компонент ЕМ поля (E_x - H_y та E_y - H_x) в багатьох місцях запису добре проглядається кореляція. На магнітних компонентах спостерігаються завади технічного походження з періодом приблизно 60 с.

При попередній обробці даних ставилось завдання оцінити можливість отримання компонент тензора імпедансу, використовуючи наявні записи компонент поля та програмне забезпечення. Для обробки використано сучасне програмне забезпечення, створене на підставі алгоритмів, що широко використовуються на практиці останнім часом (Семенов, 1985; Egbert, 1986; Chave et al., 1987; Смирнов, 1998).

Маючи дані реєстрації компонент геоелектромагнітного поля за цілий рік, було доцільним провести дослідження стабільності оцінок магнітотелуричних передавальних функцій Землі протягом року. Така оцінка дозволила також визначити працездатність електрометра взимку при від'ємних температурах. З цією метою з набору отриманих даних за

рік для розрахунку оцінок передавальних функцій використано дані чотирьох місяців (по одному для кожного з сезонів року): березня, червня, вересня та грудня.

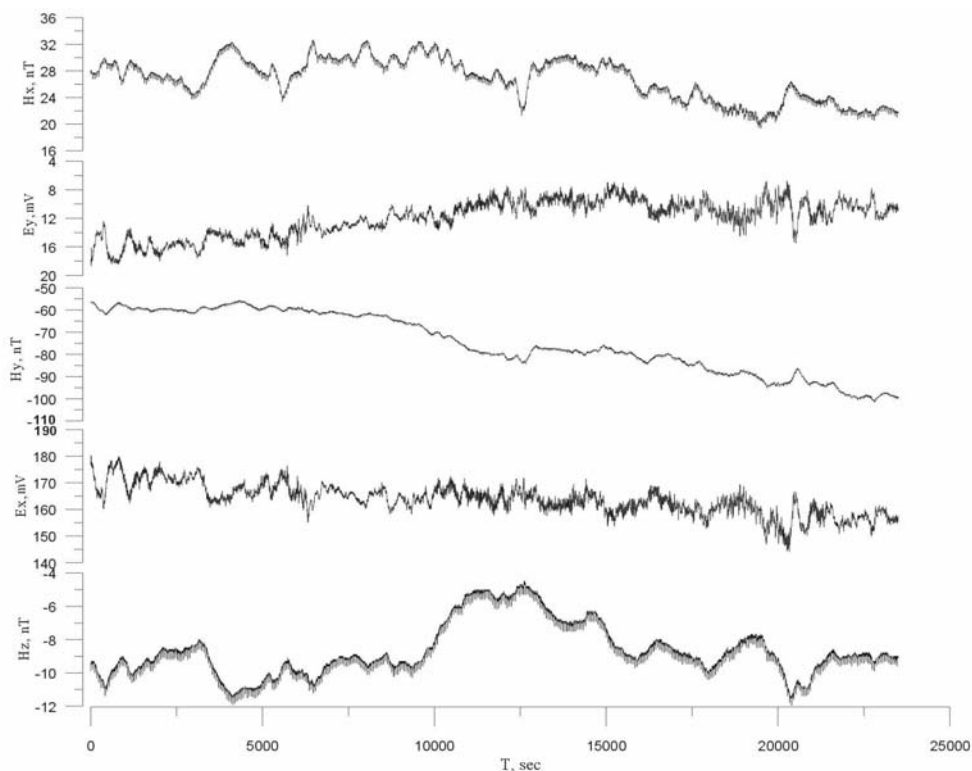


Рис. 5. Ділянка запису, яку використано для обробки.

Для кожного з цих місяців розрахунок оцінок передавальних функцій проводився двома етапами. Спочатку вибирались найдовші неперервні відрізки реєстрації, присутні як в електричних, так і в магнітних каналах. В основному, вдавалося знаходити ділянки неперервної реєстрації тривалістю 6 – 7 днів. Такі дані після синхронізації по відмітках часу об'єднувались в один файл, після чого проводилась фільтрація однохвилинної періодичної завади, виявленої на записах магнітних компонент. Щоб запобігти спотворенню передавальних функцій, подібній фільтрації також піддавались записи електричних компонент. Після цього дані компонент електромагнітного поля приводились до географічних координат. Оскільки магнітометри на станції Академік Вернадський зорієнтовані по геомагнітних координатах, а магнітне схилення складає $16^{\circ}41'$, магнітні компоненти повертались на кут, рівний величині магнітного схилення проти годинникової стрілки. Електричні лінії розтягнуто по азимутах 19° та 110° (рис. 2) і, відповідно, їх було перераховано для напрямів 0° та 90° . На підставі підготованих таким методом даних отримано оцінки передавальних функцій в діапазоні періодів від 30 до 6000 секунд.

Для розрахунку оцінок передавальних функцій на довших періодах використовувались дані, отримані протягом всього місяця. Неперервні ділянки запису піддавались децимації (низькочастотній фільтрації) та прорідженню в 600 разів. Фільтрація здійснювалась нормованим урізаним ваговим вікном Гауса. Прорідження виконувалось таким чином, щоб у часовій послідовності залишались значення компонент поля, що відповідають цілим десятихвилинним відлікам часу. Після децимації пропуски в реєстрації даних заповнювались значеннями, отриманими в результаті усереднення 2-3 крайніх відліків з двох сусідніх часових інтервалів. Таким чином було отримано неперервну часову послідовність даних з періодом

дискретизації 600 секунд для кожного місяця. Далі проводилось домноження на масштабні коефіцієнти та приведення до географічних координат. Наприкінці, в часовій послідовності на всіх компонентах проводилась фільтрація добової варіації. В результаті обробки таких часових послідовностей отримано оцінки передавальних функцій в діапазоні періодів від 4000 до 60000 секунд.

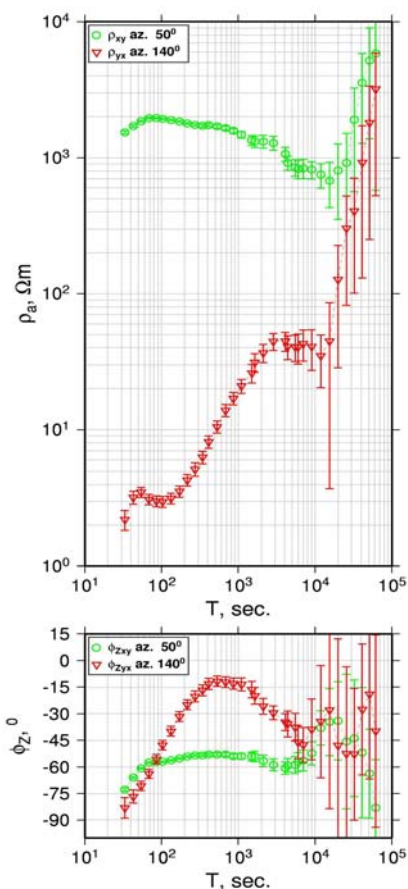


Рис. 6. Криві позірного опору та фаз імпедансу, розраховані як середнє значення чотирьох місячних оцінок.

відхилення позірного опору. Масштаб на рис. 7 вибрано таким, щоб нормовані значення відхилень позірного опору та абсолютні значення відхилень фаз можна було порівняти на підставі припущення, що похибки в дійсній та уявній частині комплексного числа, яким є імпеданс, є незалежні і рівні за величиною.

Як видно з рис. 7, в діапазоні періодів 30 – 4000 секунд відхилення від усереднених значень досить незначні і носять випадковий характер з нульовим середнім значенням. Це може свідчити про надійність оцінок передавальних функцій у згаданому діапазоні періодів (а також про стабільність роботи апаратури). Незначне систематичне зміщення максимальної кривої позірного опору (азимут 50^0) можна помітити в червні в бік зменшення, а в грудні - в бік збільшення. Але величина цього відхилення не перевищує 10% теоретичної оцінки точності МТЗ (в регіонах з відсутністю низькоомного осадового покриву та близьких до джерел геомагнітних варіацій ця величина може бути і більшою), тому не можна твердити про наявність сезонної залежності передавальних функцій у цьому діапазоні періодів.

На підставі декомпозиції тензора імпедансу визначено азимуті головних напрямів – 50^0 і 140^0 . Азимут 50^0 відповідає максимуму імпедансу і співпадає з напрямом простягання берегової лінії континенту в даному регіоні. Відповідно, ортогональний азимут 140^0 , у якому спостерігається мінімум імпедансу, є перпендикулярним до берегової лінії континенту.

Отримані результати обробки даних МТЗ для кожного місяця – представника кожного сезону – відрізнялися досить незначно. Для дослідження сезонних змін передавальних функцій були побудовані відхилення місячних оцінок від усереднених річних значень. Усереднені річні значення позірного опору та фази імпедансу розраховувались шляхом усереднення по чотирьох місячних оцінках та для більшої гладкості кривих і достовірності результату по трьох сусідніх періодах. Усереднені криві наведені на рис. 6.

Відносні нормовані відхилення значень місячних оцінок позірного опору від середніх річних значень $\Delta\rho = (\rho_m - \rho_y) / \rho_y$ та абсолютні відхилення фаз імпедансу наведені на рис. 7. Нормування на усереднене річне значення ρ_y робить відносні нормовані відхилення $\Delta\rho$ приблизно пропорційними

логарифму середнього квадратичного

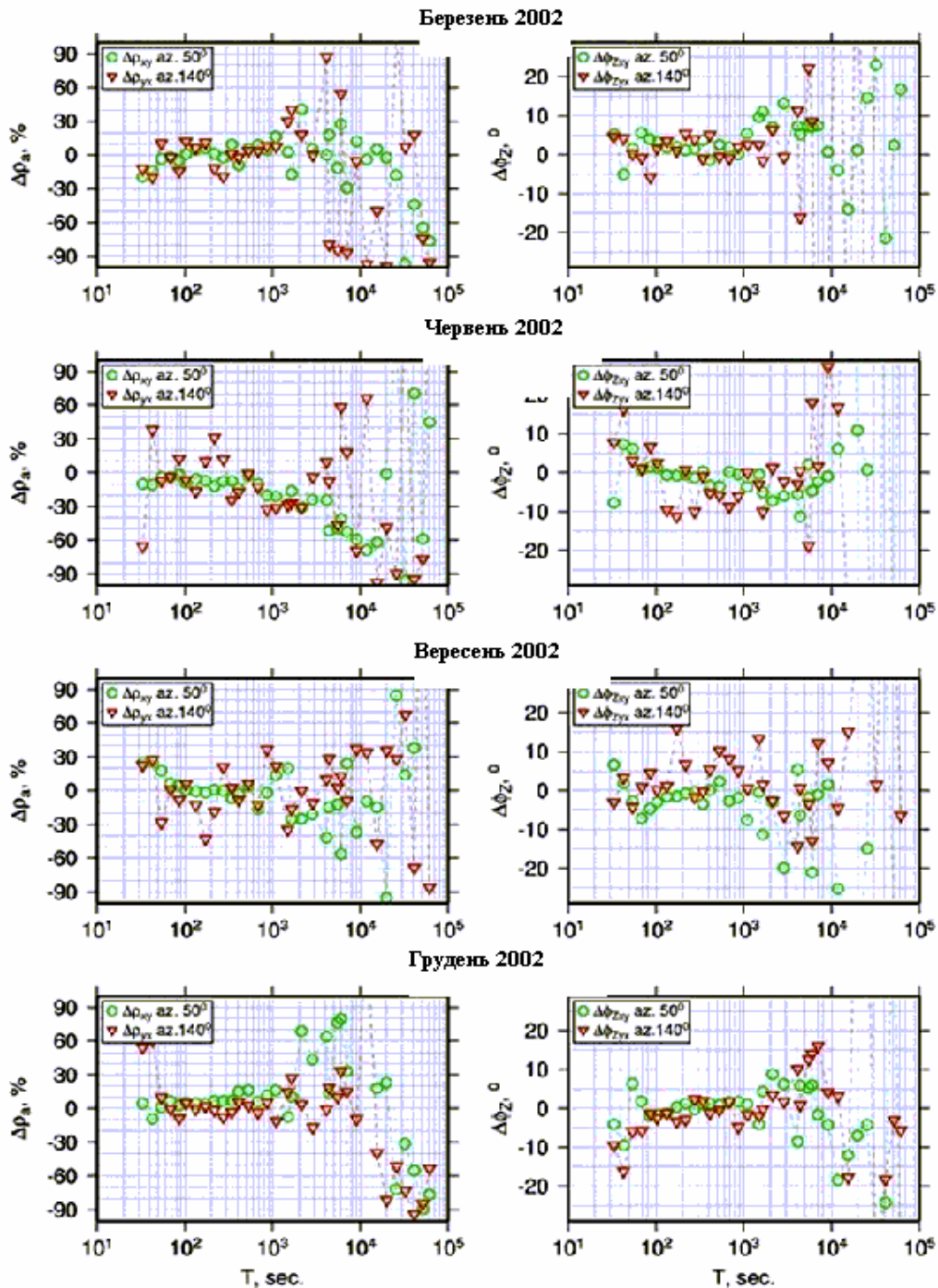
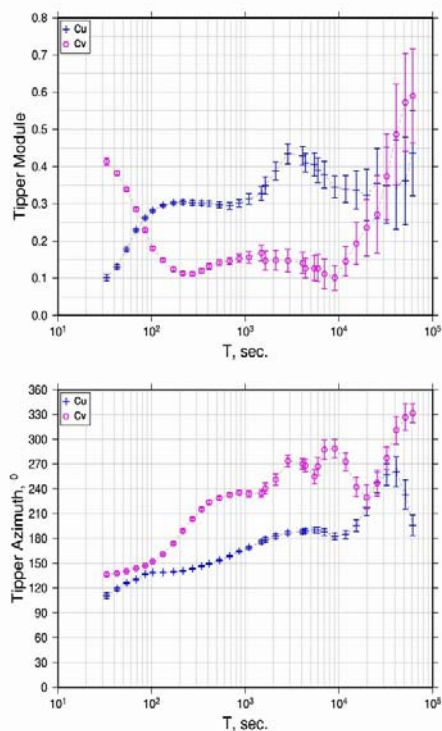


Рис. 7. Відхилення місячних оцінок позірного опору та фаз імпедансу від усереднених річних значень. Різниця позірного опору нормовані на середнє значення. Масштаб графіків для опору та фаз вибрано таким, щоб величини різниць можна було порівняти.

У той же час, на мінімальній кривій (азимут 140°) це зміщення не спостерігається. В діапазоні періодів 5000 – 60000 секунд відхилення від усереднених значень теж носять досить випадковий характер (хоч в березні і червні можна помітити деяке відхилення в сторону зменшення на максимальній кривій), до того ж похибки наведених усереднених значень, як і



величини самих відхилень, досить великі. Отже, в діапазоні періодів 5000 – 60000 секунд точність оцінок передавальних функцій незадовільна. Це може бути пов'язане як з практичною відсутністю осадового чохла в районі збору даних та близькістю до джерел геомагнітних варіацій, так і з занадто високим перехідним опором електродів через високоомні поверхневі породи в районі станції.

Якісний аналіз кривих позірного опору дозволяє припустити наявність тут контрастної двовимірної геоелектричної структури, ймовірно глибокого розлому (або серії розломів), який простягається вздовж західної берегової лінії Антарктичного півострова. При цьому не виключається вплив берегового ефекту. Для перевірки цього положення побудовані усереднені річні значення індукційних векторів (рис. 8). Поведінка індукційних стрілок не підтверджує таке припущення, вона більш характерна для складної тривимірної моделі регіону.

Рис. 8. Оцінки модулів та азимутів індукційних векторів, розраховані як середнє значення чотирьох місячних величин: Cu – дійсний вектор, Cv – уявний вектор.

5. Висновки

Проведена в останні роки модернізація обсерваторії на станції Академік Вернадський, встановлення на ній комплексу сучасної магнітометричної апаратури вивело її в ряд передових магнітних обсерваторій світу. Перехід на застосування високочутливих магнітометрів з високою частотою дискретизації вимірювань дозволяє як розв'язувати нові завдання в галузі геомагнетизму і фізики атмосфери, так і проводити дослідження глибокої будови та сучасної геодинаміки земної кори.

В результаті виконання МТЗ вперше отримано підтвердження можливості застосування методу та дані про особливості геоелектричного розрізу земної кори і верхньої мантії, що вказують на складну тривимірну структуру в цьому регіоні.

Результати тектономагнітних досліджень показали, що станція Академік Вернадський розташована в зоні інтенсивної динамічної аномалії магнітного поля, викликаної сучасними геодинамічними процесами в земній корі. Інтерпретація отриманих даних дозволяє зробити висновок про високу геодинамічну активність розлому субмеридіонального простягання, який проходить поблизу станції.

Важливим для подальшого розвитку електромагнітного зондування на території Антарктиди є виявлений вже факт зберігання працездатності електродів як у замороженому стані, так і після відтанення, тому в планах подальших тектономагнітних і магнітотелуричних досліджень в регіоні закладено проведення МТЗ на спільних для обох методів пунктах і профілях, що в поєднанні з математичним і фізичним моделюванням дасть можливість побудувати геоелектричну і геомагнітну моделі літосфери в районі станції Академік Вернадський і, таким чином, отримати нові знання про глибоку будову цього регіону.

Очевидно, що і ТМП, і МТЗ вимагають поєднання з іншими геофізичними і геодезичними методами. З цією метою доцільно організувати навколо станції комплексний геофізичний і геодинамічний полігон, на якому, з одного боку, відпрацьовуватиметься методика робіт і перевірятимуться можливості методів, а з іншого – буде виконуватись

моніторинг геофізичних полів, сучасних рухів блоків земної кори, переміщення льодовиків і т.п. Отримані в результаті таких комплексних спостережень дані дозволять підійти до створення геодинамічної моделі літосфери західної частини Антарктичного півострова.

Описані роботи виконані при частковому фінансуванні з договору № 1273 (02/УАЦ-2003) та INTAS гранту 01-0442. Автори вдячні А. Пристаю за надання результатів вимірювання електричних параметрів телуричних ліній на станції Академік Вернадський та О. Онисик за велику роботу над підготовкою статті до друку.

Література

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально однородных сред. - М.: Недра 1992. - 250 с.

Максимчук В.Ю., Городиський Ю.М., Кузнєцова В.Г. Динаміка аномального магнітного поля Землі. - Львів: Євросвіт, 2001.- 308 с.

Максимчук В., Городиський Ю., Чоботок І. та ін. Тектономагнітні дослідження в Західній Антарктиці // Геодинаміка. - 2003. - т. 1 (4).

Семенов В.Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. - М.: Недра, - 1985. - 133 с.

Смирнов М.Ю. Обработка магнитотеллурических данных с использованием робастных статистических процедур // Вопросы геофизики. - СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета - 1998. - Вып.35. - с. 198-205.

Сковородкин Ю.П. Изучение тектонических процессов методами магнитометрии. - М.: Наука, 1985. - 196 с.

Beblo M., Liebig V. Magnetotelluric measurements in Antarctica // Phys. Earth Planet. Inter. - 1990. - № 60. - P. 89-99,

Chave A.D., Thomson D.J., Ander M.E., On The robust estimation of power spectra, coherencies and transfer functions. // J.Geophys.Res. - 1987. - 92, No B1. - P. 633-648.

Egbert G.D., Booker J.R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions // Geophys. J. R. astron. Soc. - 1986. - V. 87. - P. 173-194.

Kobzova V.M., Ladanivskyy B.T., Korepanov V.E. Physical modelling of electromagnetic field of auroral electrojet // Acta Geophysica Polonica. - 2003. - V. 51, № 3. - P. 337-345,

Maksymchuk V., Kuznetsova V., Chobotok I et al. Tectonomagnetic investigation in the region of Academic Vernadsky Station // Бюл. Укр. антарк. центр. - 2002. - Вип. 4. - С. 197-201.

Wannamaker P.E., Stodt J.A., Olsen S.L. Dormant state of rifting below the Byrd Subglacial Basin, West Antarctica, implied by magnetotelluric (MT) profiling // Geophys. Res. Lett. - 1996. - V.23, № 17. - P. 2983-2986.