

УДК 550.837

ГЕОЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ В РАЙОНАХ УЗБЕРЕЖЖЯ (ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ)

В.М. Кобзова, В.Ю. Максимчук, Б.Т. Ладанівський, П.К. Мартюк, Р. Б. Дутко

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, вул. Наукова, 3Б, 79060 Львів, E-mail: vkobzova@ukr.net

Реферат. Для розв'язання прямої задачі електродинаміки тришарового середовища з локальними 3D неоднорідностями електропровідності застосовано метод аналогового моделювання з використанням спеціальної лабораторної установки. Показано, що аномальні геоелектромагнітні поля, створені локальними структурами узбережжя (мис, бухта, острови біля континенту), необхідно враховувати при 2D інверсії магніотелуричних даних. Береговий ефект при складній формі берегової лінії, на відміну від лінійної, становить велику заваду при глибинних МТ зондуваннях на узбережжі, зменшуючи при інтерпретації глибину високопровідної мантії.

Реферат. Для решения прямой задачи электродинамики трехслойной среды с локальными 3D неоднородностями электропроводности применен метод аналогового моделирования с использованием специальной лабораторной установки. Показано, что аномальные геоэлектромагнитные поля, созданные локальными структурами побережья (мыс, бухта, острова возле континента), необходимо учитывать при 2D инверсии магнитотеллурических данных. Береговой эффект при сложной форме береговой линии, в отличие от линейной, создает большую помеху при глубинных МТ зондированиях на побережье, уменьшая при интерпретации глубину высокопроводящей мантии.

Abstract. The analog modeling method with usage of special laboratory installation was applied for direct electrodynamics problem of three-layered environment with local 3D conductance inhomogeneity. It is shown that anomalous geomagnetic fields created by the local coast structures (cape, bay, islands near continent) should be taken into account for 2D magnetotelluric data inversion. The coast effect caused by complex shape of coastline unlike linear one could be as a large hindrance for deep MT sounding on coast estimation of depth of high-conductive mantle could be reduced.

Key words: physical modeling, geoelectromagnetic field, cape, bay, islands

1. Вступ

На Українській Антарктичній станції «Академік Вернадський» декілька років проводяться спостереження за варіаціями геоелектромагнітного поля. Ці дані дають можливість отримати інформацію про глибинну будову регіону, використовуючи екологічно чисті методи магніотелуричного (МТ) і магнітоваріаційного (МВ) зондування. На практиці більш поширеними є різні методики двовимірної інтерпретації польових даних. У регіонах із складною геоелектричною будовою така інтерпретація потребує певної корекції. Антарктичний півострів з великою кількістю оточуючих островів, проток і складною формою берегової лінії є характерним прикладом такого регіону. Отримати інформацію про напрямок регіональної двовимірності в такому випадку можна, застосувавши, наприклад, методику, запропоновану Баром К. (1988). Але завдяки горизонтальному скін-ефекту ЕМ поле в пункті спостережень можуть спотворювати локальні неоднорідності, що знаходяться на значних віддальх. Очевидно, що чим довші

періоди варіацій використовуються для інтерпретації, тим вплив більш далеких по латералі структур буде відчуватися. Ці явища, пов'язані з дією відносно дрібних поверхневих неоднорідностей, обумовлюють так званий ефект ρ статичного зміщення кривих позірною опорю (на відміну від ефекту S, пов'язаного зі зміною інтегральної провідності осадового чохла) (Бердичевский и др., 1997). Для корекції МТ даних у цих випадках поряд з методами статистичного усереднення, фільтрації, редукції до реперів може бути застосоване аналогове моделювання.

Для континентальних окраїн характерним є великий контраст провідності морської води та суші, що створює в геоелектромагнітному полі аномалію, яку прийнято називати береговим ефектом. У двовимірному варіанті це явище досліджувалось багатьма геофізиками (Мардерфельд, 1977); (Демин и др., 1976); (Nesnaber, 1976). У випадку, коли границю розподілу суша–море можна вважати лінійною, береговий ефект не є перешкодою для глибинних МТ зондувань: глибину залягання високопровідної мантії ТЕ мода визначає точно, хоча завдяки індукційному ефекту можливі прояви неіснуючого провідного шару в літосфері. Питання в тому, чи збережеться цей висновок, якщо берегова лінія регіонального двовимірного континенту має складну форму або на узбережжі є острови і протоки. В електродинаміці – це класична пряма задача для тришарового середовища з 3D включеннями в поверхневому шарі. Для її розв'язання в цій роботі застосовано аналоговий метод із використанням спеціальної лабораторної установки КВ ІФ НАНУ (Бердичевский и др., 1987); (Мороз та ін., 1999).

2. Методика фізичного моделювання

Модель геоелектричного простору створена в електролітичній ванні розміром $5,0 \times 5,0 \times 0,7$ м, у якій розчин солі імітує море, повітряний прошарок – літосферу, металевий лист на дні – високопровідну мантію. Моделі островів та структур узбережжя створювалися з квадратних керамічних плит, питомий опір яких на три порядки більший, ніж розчину.

Принцип фізичного моделювання полягає в тому, що на зменшеній у певному масштабі моделі вивчається ЕМ поле в більш високочастотному діапазоні. Масштаби розміру K_L , опорю K_p та періоду варіацій K_T визначаються для кожної конкретної задачі із закону подібності ЕМ полів. При цьому зберігається повна ідентичність усіх процесів із природними. Для моделювання умов, близьких для регіону Антарктичного півострова, розраховано масштабні коефіцієнти $K_L = 2 \cdot 10^5$, $K_p = 3$, $K_T = 1,3 \cdot 10^{10}$, згідно з якими модель відповідає в природі тришаровому розрізу з мантією на відстані близько 115 км, високоомною літосферою, морем глибиною 8 км з островами розміром порядку 80 км і протоками 20 – 160 км в діапазоні варіацій 2600 – 130 000 с.

Методика аналогового моделювання зводиться до вимірювання просторової та частотної залежності амплітудних і фазових значень компонент напруженості ЕМ поля на поверхні моделюючого середовища. Виміри виконуються почергово в полі двох лінійно-поляризованих гармонічних ЕМ хвиль. В результаті обробки цих даних будуються карти просторового розподілу магнітного поля регіону, індукційні вектори, криві МТ зондування.

3. Результати масштабного моделювання магнітотелуричного поля морських структур

Експерименти виконано з моделями структур, типових для континентальних окраїн: бухта, мис, два острови та острів поблизу континенту. Схеми розрізів з цими структурами зображені на рис. 1.

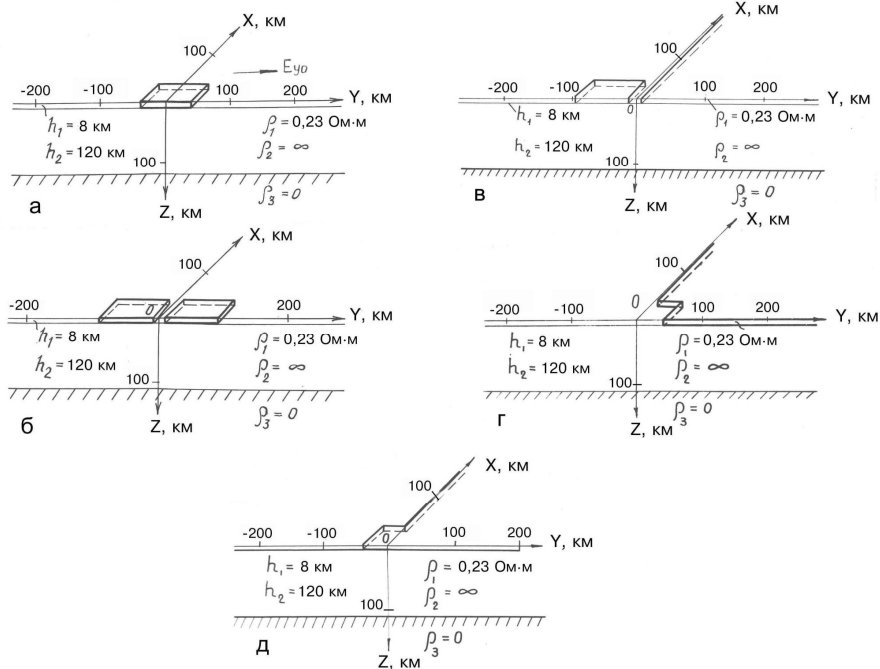


Рис. 1. Схеми моделей типових структур узбережжя
а – острів, б – два острови, в – острів біля континенту, г – бухта, д – мис.

Острови. Морфологію МТ поля островів визначає обтікання електричними струмами, яке спричиняє відповідний просторовий розподіл компонент магнітного поля (рис. 2.).

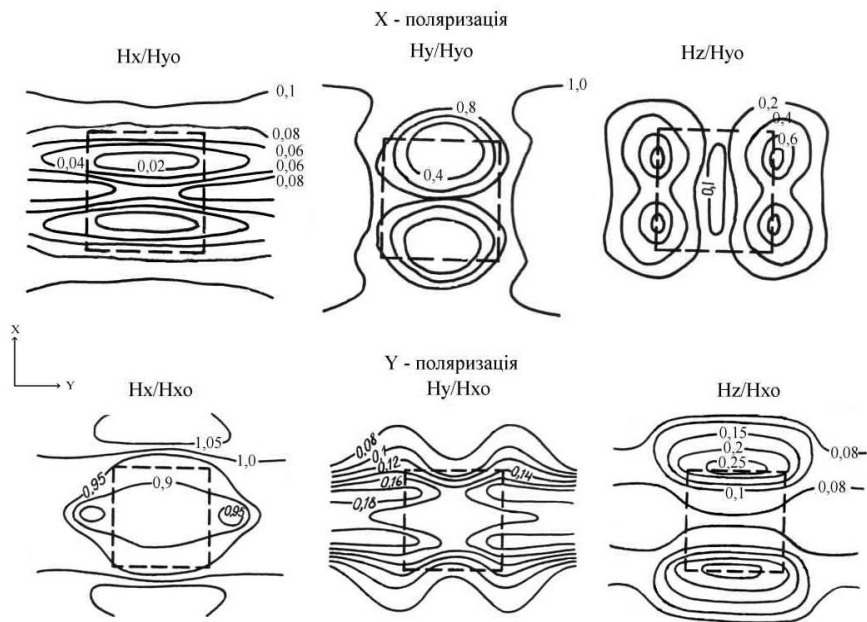


Рис. 2. Структура магнітного поля острова. $T = 13\ 000$ с. Тут і надалі нормування виконано на відповідну горизонтальну компоненту магнітного поля H_0 однорідного розрізу.

Для *локального* острова встановлено (Бердичевський и др., 1987), (Мардерфельд, 1981), що:

аномалії МТ поля на острові тим менші, чим довший період варіації і чим ближче до земної поверхні знаходяться високопровідні шари кори чи мантії;

зміни в геоелектричному полі акваторії навколо острова відчуються на віддалі у 1,5–2 рази більшій, аніж розмір острова;

для кривих позірною опорю на островах характерним є значне вертикальне зміщення, тому результати МТ зондування при 1D інверсії дають суттєво завищені глибини залягання провідних шарів і згладжені значення сумарної провідності;

форма острова суттєво не впливає на результати МТ зондування. Важливим є його орієнтація відносно електричних струмів.

Для моделі двох островів, розташованих на віддалі 20 км один від одного, отримана просторова картина магнітного поля для варіацій з періодом порядку 3,5 год., зображена на рис. 3а. На високих частотах зменшується обтікання струмів уздовж зовнішніх берегів і збільшується частка струму, що втікає в протоку, тому в протоці спостерігається різке зростання горизонтальної компоненти магнітного поля і зменшення її на островах. На низьких частотах основна частина струму індукується в нижній провідній частині моделі, в результаті аномалія ЕМ поля зникає, поле наближається до нормального. У всьому дослідженому частотному діапазоні зовнішні максимуми вертикальної складової більші за внутрішні, тобто для даної моделі обтікання островів іззовні відіграє більшу роль, аніж каналізація струму в протоці. На ЕМ поле кожного з островів впливає поле сусіднього. В результаті МТ зондування на окремому острові може відрізнитись, якщо поблизу знаходиться ще один острів. Як видно з рис. 3б, криві позірною опорю при Y-поляризації на березі острова суттєво відрізняються при різних віддальях до сусіднього.

Для моделі, коли острів знаходився на віддалі близько 20 км від континенту, для періоду $T = 13\ 000$ с компоненти магнітного поля та індукційні вектори зображені на рис. 4а і 4б.

Судячи з поданих результатів, можна зауважити, що для випадку, коли морські струми орієнтовані вздовж протоки, незалежно від віддалі між островами, поздовжні криві зондування на березі протоки точно визначають глибину високопровідної мантії. У випадку коли струми орієнтовані впоперек протоки, ця глибина значно менша від реальної, особливо при малих віддальях між островами.

Якщо порівняти криві МТ зондування моделей двох островів та острова і континенту, можна помітити, що поздовжні, амплітудні та фазові криві у протоці й на березі 3D острова (рис. 3б) і 2D континенту (рис. 4в) ідентичні, практично не залежать від ширини протоки, не спотворені в довгоперіодній області та цілком придатні для достовірної інтерпретації.

Мис. При вивченні геоелектромагнітного поля на границі акваторія–суша, як правило, розглядалися 2D випадки з різними параметрами. У цій роботі наведемо кілька результатів, одержаних на масштабних моделях, коли берегова лінія континенту ускладнена 3D утвореннями типу мис, бухта (затока, півострів). Контраст провідності на границі море–суша порядку 1000. Для порівняння виміри виконано з моделлю, в якій границя контакту була двовимірною, а потім ускладнена мисом або бухтою. Рис. 5 дає уявлення про структуру магнітного поля мису.

Основні закономірності берегового ефекту зберігаються: магнітні компоненти збільшуються без зміни фази, максимум їх зміщений на край мису. Область дії берегового ефекту залежить від періоду, але, як правило, не перевищує половини довжини хвилі ЕМ поля в морі та на суші.

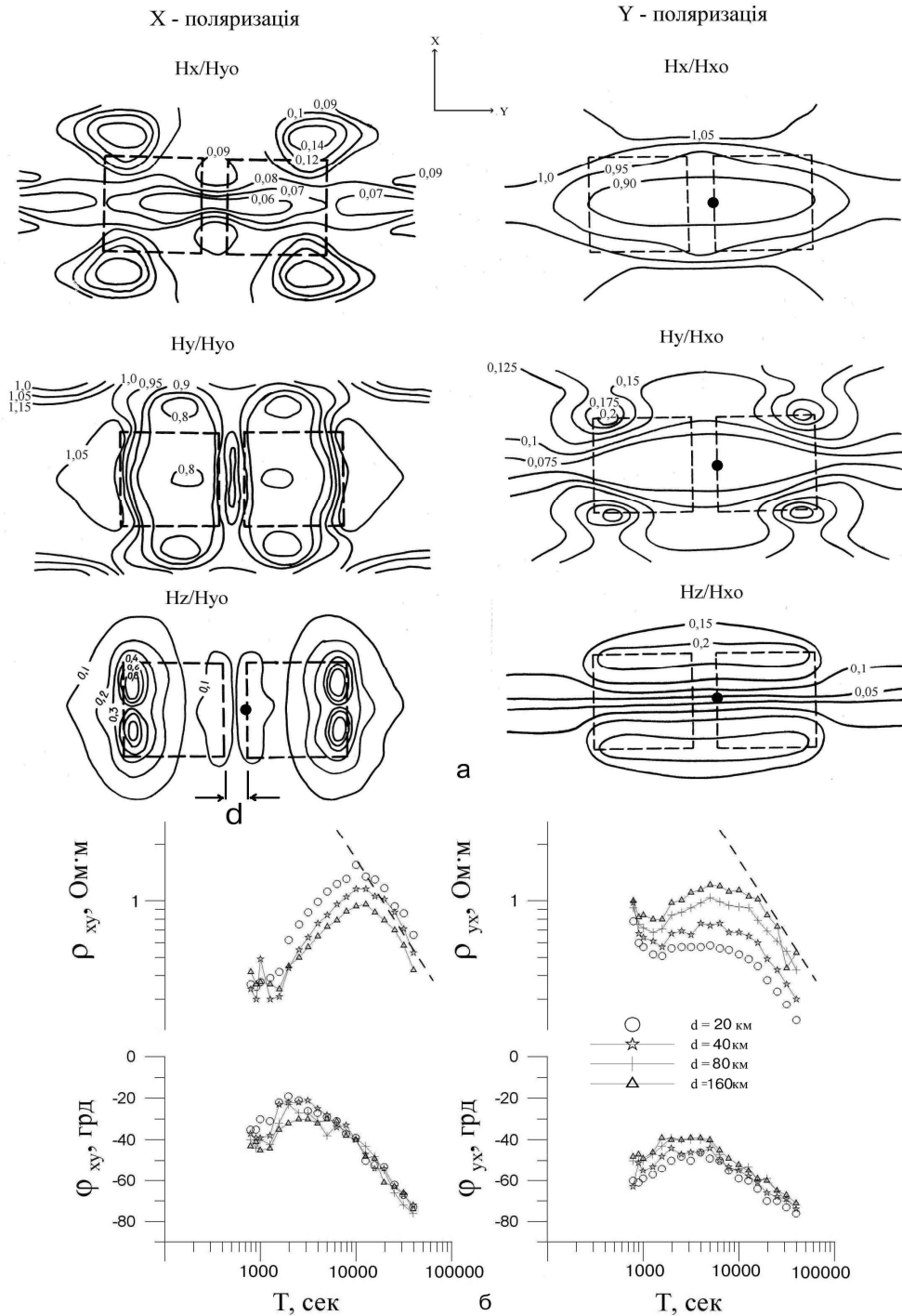


Рис. 3. Структура магнітного поля двох островів при віддалі між ними $d = 20 \text{ км}$, $T = 13\,000 \text{ с}$ (а), криві МТ зондування на березі одного з островів в залежності від віддалі між ними (б).

Тут і надалі пунктир – асимптота, що відображає реальну глибину провідної основи.

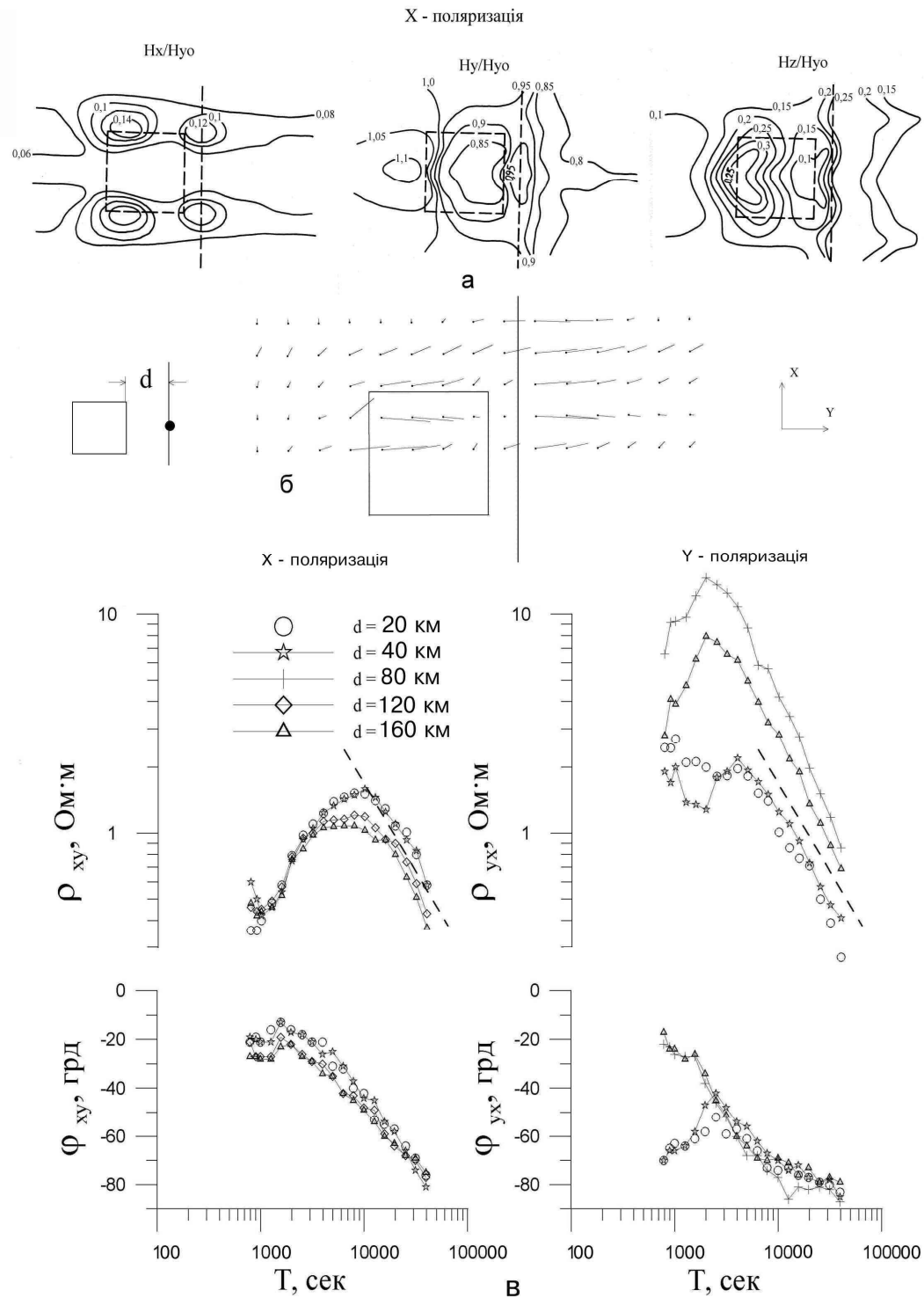


Рис. 4. Структура магнітного поля (а), індукційні вектори (б), криві МТ зондування на березі континенту при різних віддальх до близько розташованого острова (в).

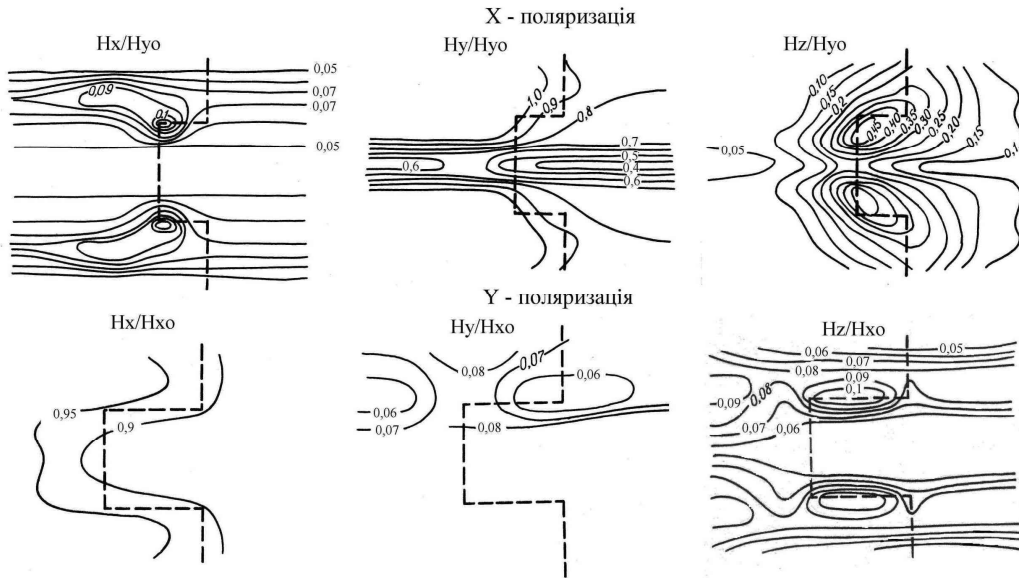


Рис. 5. Структура магнітного поля мису. $T = 13\ 000$ с.

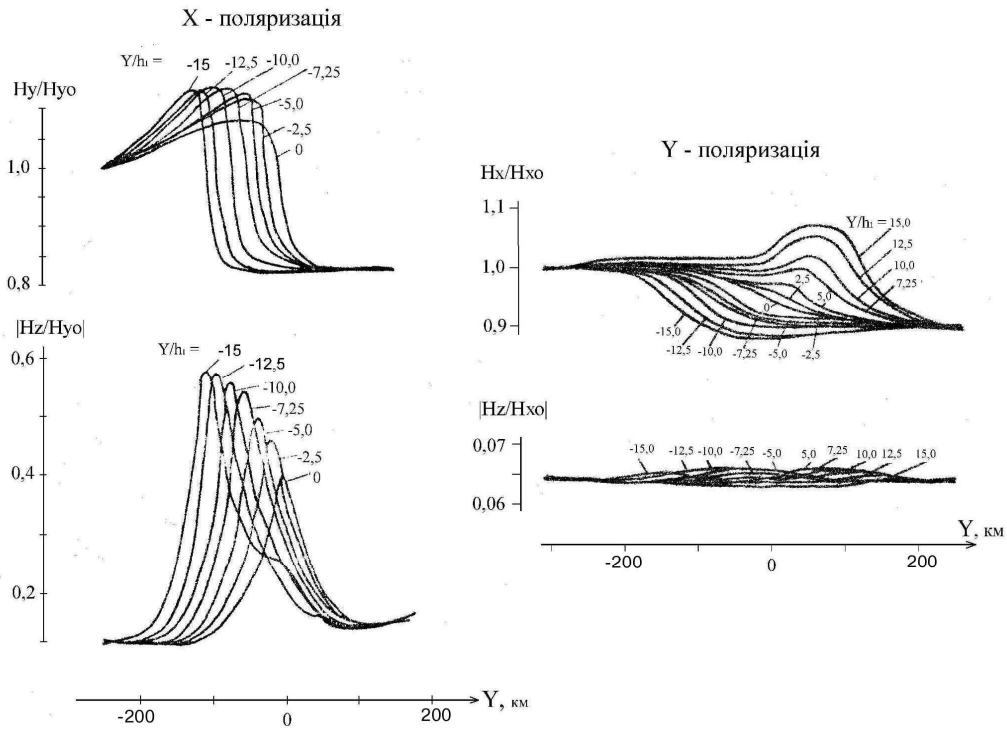


Рис. 6. Залежність берегового ефекту аномального магнітного поля мису від його протяжності впоперек континенту. Y/h_1 – відносний розмір бухти на центральному профілі. Інтенсивність аномалії суттєво зростає з протяжністю мису (півострова). Амплітуди магнітних компонент над краєм мису ($y/h_1=15$) можуть бути в 1,5 раза більші, ніж над 2D береговою лінією континенту ($y/h_1=0$).

У двовимірному береговому ефекті результати МТ зондувань передбачувані та можуть бути легко враховані. Повздовжні відносно континенту криві позірного опору не спотворені індукційним ефектом в довгоперіодній області і з великою достовірністю визначають глибину провідних шарів, згладжуючи стрибок провідності на границі акваторія–суша у високочастотній області. У випадках, коли берегова лінія ускладнена мисом або бухтою, характер кривих МТ зондування визначає орієнтація *локальних* струмів відносно берегової лінії в пункті зондування: індукуючий струм, орієнтований уздовж 2D континенту, може бути поперечним відносно границі суша–море в бухті чи на мису. В результаті криві МТ зондування суттєво й безсистемно відрізняються навіть на невеликих відстанях. Спостерігалась ще одна особливість: поздовжні криві позірного опору (Х-поляризація) по центральному профілю відчують подвійний береговий ефект на узбережжі мису й на суші на лінії 2D континенту. Зазвичай криві МТ зондувань на берегах мису (рис. 7) відрізняються від двовимірного випадку й несуть зовсім недостовірну інформацію про геоелектричний розріз, в основному занижуючи глибину мантії.

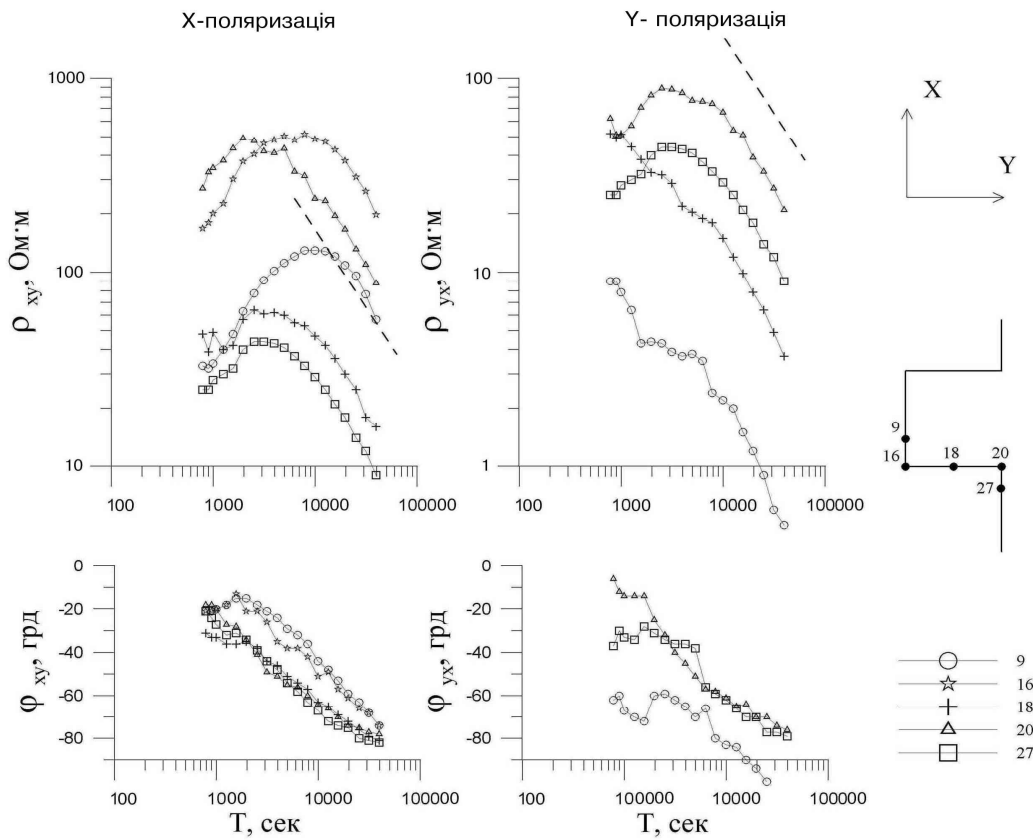


Рис. 7. Криві МТ зондування на узбережжі мису. Тут і надалі цифрами позначені пункти зондувань.

Бухта. В результаті просторових вимірювань компонент поля було одержано картину аномального поля, створеного бухтою (рис. 8). Як видно з цього рисунка, максимальні зміни в компонентах поля спостерігаються в морі на віддалі від берега, приблизно співмірній із розміром бухти. В цій області суттєво збільшуються вертикальна та основна горизонтальна компоненти. Геомагнітне поле бухти залежить від її заглиблення у континент (рис. 9).

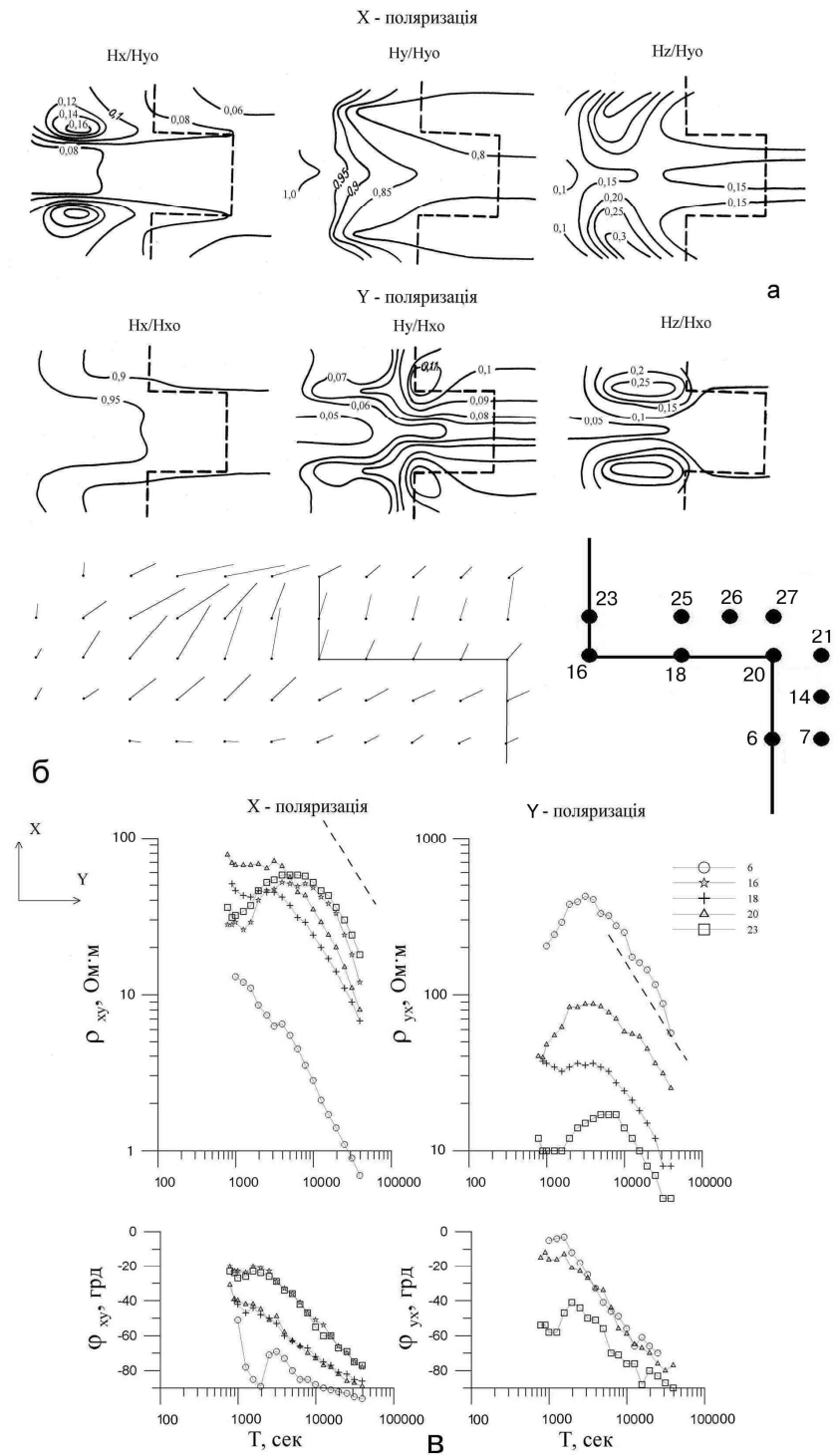


Рис. 8. Структура магнітного поля бухти (а), індукційні вектори (б), криві МТ зондування (в).

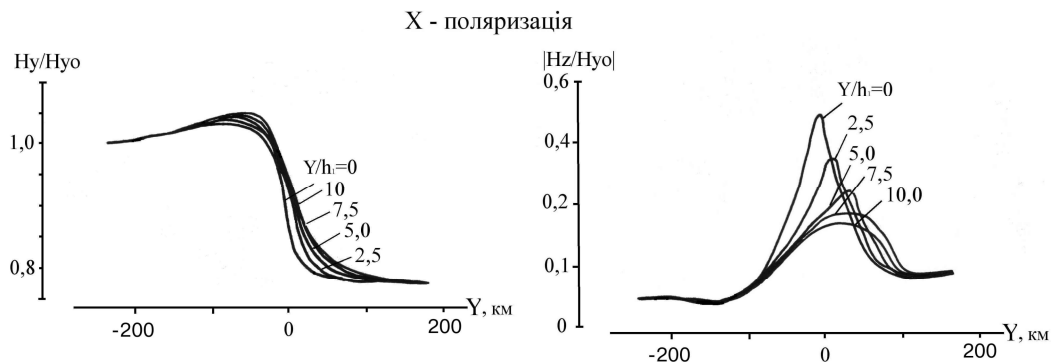


Рис. 9. Залежність магнітного поля бухти від її розміру. Y/h_1 – відносний розмір бухти на центральному профілі. $T = 13\ 000$ с.

Очевидно, що H_z , максимальна при 2D береговому ефекті у відсутності бухти, зменшується при заглибленні бухти в континент. Для досить витягнутих бухт типу фіордів характерним є поява вторинного максимуму H_z на рівні берегової лінії континенту. Цей максимум може бути більшим, ніж над берегом бухти. Основна горизонтальна компонента H_y від протяжності бухти залежить слабо.

Результати МТ зондувань, виконаних на березі бухти, зображені на рис. 8в. При X-поляризації, тобто коли індукуючий струм орієнтований уздовж континенту, криві зондування в тт. 6 і 23 – повздовжні відносно цього струму, в т. 18 – поперечні, а в тт. 16 і 20 їх узагалі важко класифікувати. Відповідно при Y-поляризації – все навпаки. Тому складно давати рекомендації щодо їх використання для інтерпретації, тим більше що, як видно з рис. 8в, жодна з них не відповідає параметрам, які для моделі апіорі відомі (пунктир). При віддаленні пунктів зондування від берега на чверть розміру бухти (приблизно 10 км) ситуація дещо покращується. На поздовжні криві в тт. 25, 26, 27 більше впливає 2D береговий ефект континенту, тому вони майже точно визначають глибину провідного шару. Але в тт. 7, 14, 21 – основний вплив відіграють струми, що затекли в бухту й результати їх інтерпретації недостовірні. Криві МТ зондування на березі мису (рис. 7) і бухти (рис. 8в) за рахунок впливу складної форми берегової лінії суттєво відрізняються від МТ зондувань, коли континентальна границя суша–море лінійна.

Виконані експерименти дозволяють відповісти на запитання, поставлене на початку статті, так. Для геомагнітного поля на границі переходу суша–акваторія при складній формі окраїни континенту характерні гальванічні спотворення відсутні, коли ця границя лінійна, тобто двовимірна, а береговий ефект має чисто індукційну природу. Тому при МТ зондуваннях на узбережжі континенту криві позірному опору, по-перше, суттєво відмінні у близько розташованих пунктах, по-друге, для них характерним є вертикальне зміщення, особливо небажане при глибинних дослідженнях і яке вимагає першої корекції при інтерпретації. Поряд з цими відмінностями, обумовленими складною формою берегової лінії, кривим МТ зондування притаманні й властивості лінійного берегового ефекту: зміна форми кривих позірному опору та фази імпеданса. Тобто структуру геомагнітного поля на окраїні континенту визначає співвідношення аномальних полів гальванічної та індукційної природи. Крім того, експериментально показано, що поле на континенті зазнає впливу гальванічного характеру від близько розташованих островів, що відображається в результатах МТ зондування. У свою чергу, поведінка індукційних стрілок на острові більшою мірою визначається впливом континенту, аніж самого острова (рис. 4б.).

Суттєво відзначити, що розмір досліджених у цій роботі 3D структур (~80 км) досить невеликий порівняно з довжинами хвиль ЕМ поля в робочому діапазоні 2600–130 000 с (у морській воді в межах 540–70 км), проте аномальні поля, які вони утворюють, впливають на результати глибинних МТ зондувань.

На Антарктичному півострові більшість спостережень електромагнітного поля виконується на узбережжі зі складною береговою лінією та великою кількістю близько розташованих островів. Враховуючи важкодоступність регіону, дані спостережень отримані в окремих пунктах, але це може бути перевагою, якщо їх вважати площинними й застосувати єдину методику обробки спостережень, що дозволить використати 2D методики інтерпретації. Наведені дані про морфологію аномальних полів на узбережжі можуть бути використані як додаткова попередня інформація для програм інверсії або корекції вже отриманих результатів.

4. Висновки

Методом аналогового моделювання показано, що типові для континентальних окраїн структури (мис, бухта, острови, протоки) створюють аномалії геоелектромагнітного поля, які не можна вважати інформаційним шумом при застосуванні методів 2D інверсії для інтерпретації глибинних МТ зондувань.

Береговий ефект при складній формі берегової лінії континенту становить велику заваду для глибинних МТ зондувань на узбережжі, як правило зменшуючи при інтерпретації відстань до високопровідної мантії.

Вплив островів, близько розташованих від континенту, проявляється у статичному зміщенні кривих МТ зондування на узбережжі.

Автори висловлюють подяку співробітникам КВ ІГФ НАНУ Сенчині А.Ф. – за участь в експериментах і Гончарук Л.Т. – за допомогу в обробці матеріалу.

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

Перелік посилань

Бар К. Интерпретация тензора магнитотеллурического импеданса: региональная индукция и локальное теллурическое искажение. – Геофизика, 62, 1988, С. 119–127.

Бердичевский М.Н., Дмитриев В. И., Новиков Д. Б. и др. – Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. – М., Диалог-МГУ, 1997. – 161 с.

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

Демин В.Н., Добровольская М.А., Ковтун А.А. и др. Магнитотеллурические исследования в прибрежной области (по результатам моделирования). // V Всесоюзная школа-семинар по ЭМ моделированию. (Звенигород). Тез. докл. – М., 1976. – Ч. I. – С. 157–159.

Мардерфельд Б.Е. Береговой эффект в геомагнитных вариациях. – М.: Наука, 1977. – 80 с.

Мардерфельд Б.Е., Билинский А.И., Кобзова В.М. Магнитотеллурическое зондирование над островами различной формы. // Изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии на акватории морей и океанов электромагнитными методами. – М., 1981. – С. 80–85.

Мороз И.П., Кобзова В.М., Ладанівський Б.Т., Гончарук Л.Т. Установка для моделирования электромагнитной индукции в Земле. Патент на винахід № 94096874, G06 G/48, 1999.

Nesnaber W., Dosso H.W., Law L.K. An analogue model study of electromagnetic induction for island -continent ocean channels. // Phys. Earth and Planet. Inter. – 1976. – 13. – P. 169–183.