

13. Kawai K. Complete synthetic seismograms up to 2 Hz for transversely isotropic spherically symmetric media/ Kawai K., Takeuchi N., Geller R. J. // Geophys. J. Int. – 2006 – V.164. – P. 411-424.

14. Keith M. C. Seismic body waves in anisotropic media: synthetic seismograms / Keith M. C., Crampin S. // Geophys. J. R. astr. Soc – 1977. – V.49. – P. 225 – 243.

15. Kennet B.L.N. The seismic wavefield/ Kennet B.L.N. // University Press. – Cambridge, 2001. – 460 p.

16. Mallick S. Computation of synthetic seismograms for stratified azimuthally anisotropic media / Frazer L.N. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1990. – V. 95. – P. 8513–8526.

17. Muller G. The reflectivity method: a tutorial/ Muller G. // Geophys. J. – 1985. – № 58. – P. 153-174.

18. Yang D. H. Finite-difference modelling in two-dimensional anisotropic media using a flux-corrected transport technique / Yang D. H., Liu. E., Zhang Z. J., Teng J. // Geophys. J. Int. – 2002- V.148. – P. 320-328.

Надійшла до редколегії 26.02.13

Д. Малицький, д-р фіз.-мат. наук, А. Павлова, асп.

Карпатское отделение Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Львов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ В ЗАДАЧАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Исследованы особенности построения механизмов очагов для землетрясений в Карпатском регионе Украины. Рассмотрено принцип и особенности построения механизма очага графическим методом. С помощью предложенного метода построено механизм очага для землетрясения, произошедшего 23.11.2006г. около г. Берегово. Сделано сравнение механизмов, построенных графическим методом и с помощью комплекса программ.

D. Malyskyy, Dr. Sci. (Phys.-Math.), A. Pavlova, PhD student.,

Carpathian branch of Institute of Geophysics National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS IN PROBLEMS OF SEISMIC WAVES PROPAGATION IN LAYERED ANISOTROPIC MEDIA

The theory of seismic wave propagation in anisotropic medium using the matrix method of Thomson-Haskell is presented. The matrix formalism for field displacements on the free surface of an anisotropic layered half-space by introducing the wave propagator is shown. A comparative analysis of the results of our method with the synthetic seismic records obtained by DSM, reflective and FCT methods, and the method of finite differences is shown.

УДК 550.837.311

Р. Хоменко, інж., К. Бондар, канд. геол. наук, С. Попов, зав. лаб.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

НОВА МАЛОГЛИБИННА БАГАТОЕЛЕКТРОДНА УСТАНОВКА ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Розроблено багатоелектродну установку електротомографії, яка дозволяє досліджувати позірний електричний опір складно-побудованих середовищ з високою детальністю. До установки під'єднано дві коси по 32 електроди в кожній. Електроди можна розміщувати на відстані 0,5-1 м один від одного, максимальна глибинність установки складає 11 м. Наведено характеристики установки та приклади практичного використання для вивчення будови приповерхневої частини розрізу.

Вступ. Метод опору в модифікаціях електричних зондувань, заснований на відмінності електричних опорів різних типів гірських порід та ґрунтів, застосовується при вирішенні різноманітних завдань інженерної геології, екології та археології [7, 8]. В останні десятиріччя метод розвивається шляхом створення багатоканальної електророзвідувальної апаратури з розміщенням великої кількості електродів на денній поверхні. Нові багатоелектродні системи спостережень, керовані польовим комп'ютером, дозволили перейти від одиничних електричних зондувань до щільних систем спостережень з багаторазовим використанням кожного електрода в процесі вимірювань. Описана технологія електророзвідувальних робіт отримала назву "електротомографія" або "томографія електричного опору" (ТЕО) [1-3, 7, 10-11].

Електротомографія дозволяє за короткий час отримувати геоелектричні розрізи по профілям, за її результатами будують 2D та 3D моделі приповерхневої частини геологічного середовища. Розроблені методи обробки й інтерпретації польових даних не тільки для випадку горизонтально-шаруватого розрізу, а й для неоднорідних середовищ [1-2, 8].

Нині розроблено досить багато модифікацій багатоелектродної електророзвідувальної апаратури. Найбільш вживаними є "ERA-Multimax" (НВП Ера, Росія), SARIS (Scintrex, Канада), "ARES" (GF Instruments, Чехія), портативна цифрова одноканальна електророзвідувальна апаратура ЭРП-1 з комутуючим модулем для електротомографії СОМх64 (ТОВ "Северо-Запад", Росія). Бажання підвищити виробничу здатність багато-

електродної апаратури призвело до появи багатоканальних багатоелектродних станцій (Syscal-Pro, Iris Instruments; SAS4000, ABEM, ОМЕГА-48, GeoTom). Такі комплекси дозволяють одночасно отримувати значення різниці потенціалів на декількох диполях.

Втім, для розв'язання певного кола завдань археології та ґрунтознавства доцільно розробити установку, яка відповідала б вимогам підвищеної детальності розчленування розрізу на відносно невеликих площах.

Постановка завдання. Незважаючи на всі переваги методу, в Україні досі не було установок відчизняного виробництва для проведення польових вимірювань методом ТЕО. Необхідність створення установки виникла у зв'язку з розвитком археолого-геофізичного напрямку на кафедрі геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Малоглибинна багатоелектродна установка електротомографії є обов'язковою складовою сучасного оптимального апаратурно-методичного комплексу для виконання геофізичних досліджень на різних археологічних пам'ятках від фортифікаційних споруд городищ ранньої залізної доби до місць масових поховань часів Другої Світової війни.

До польової установки висуваються певні вимоги з огляду на спеціалізацію:

- висока детальність спостережень, потенційна можливість визначення просторових границь похованих об'єктів з точністю менше 1 м;
- можливість вибору максимальної глибини досліджень та схеми вимірювань;
- компактність та простота у використанні.

Відповідно до фундаментального принципу геофізичних досліджень, детальність вивчення геологічного розрізу знаходиться в оберненій залежності від глибини методу [9]. Тобто, із збільшенням глибини зондування збільшуються розміри структур, які можливо відшукати. Отже, з метою забезпечення виділення якомога більшої кількості об'єктів у насиченому культурному шарі, який, як правило, залягає неглибоко від сучасної денної поверхні, відстань між електродами має бути мінімальною. Потужність культурних нашарувань на більшості археологічних пам'яток в Україні не перевищує 3 м і досягає десяти метрів тільки в окремих давньоруських містах та античних містах Північного Причорномор'я. Найбільш глибокими археологічними об'єктами є рови і колодязі давніх городищ, підкурганні скіфські поховання і князівські поховання черняхівської культури, масові могили ХХ ст. Отже, максимальну глибинність установки доцільно обмежити 10-15 м.

У ТЕО використовуються апаратура і методика, що включає способи проведення робіт, вибір установок і систем спостережень, спрямованих на те, щоб отримати інформацію про зміну позірного електричного опору (ρ_n) з глибиною. Теорія і практика електромагнітних зондувань добре розроблені для одновимірних горизонтально-шаруватих моделей середовищ. Тому зондування найчастіше проводяться при вивченні горизонта-

льно і полого залягаючих (кути падіння менше 10° – 15°) розрізів.

Ефективна глибина (H_{eff}) в загальному випадку розраховується за відомою формулою [6]:

$$H_{eff} = \frac{AO}{2,63},$$

де AO – напіврознос живильної лінії. При практичному застосуванні технологія ТЕО потребує експериментальних досліджень щодо узгодження напіврозносів струмових ліній і глибин ґрунтових горизонтів у конкретних геологічних умовах.

Структурна схема установки. Базовий принцип вимірювання полягає у реєстрації різниці потенціалів між вимірювальними електродами при пропусканні постійного електричного струму в живильній лінії з подальшим розрахунком позірною електричного опору. Як елементарна вимірювальна схема використовуються різні модифікації чотириелектродних установок.

Авторами розроблено та виготовлено макет багатоелектродної одноканальної електрометричної установки, яка проводить серії послідовних вимірів на постійному струмі при зміні комбінацій електродів у приймальній та живильній лініях. Структурна схема установки наведена на рис. 1.

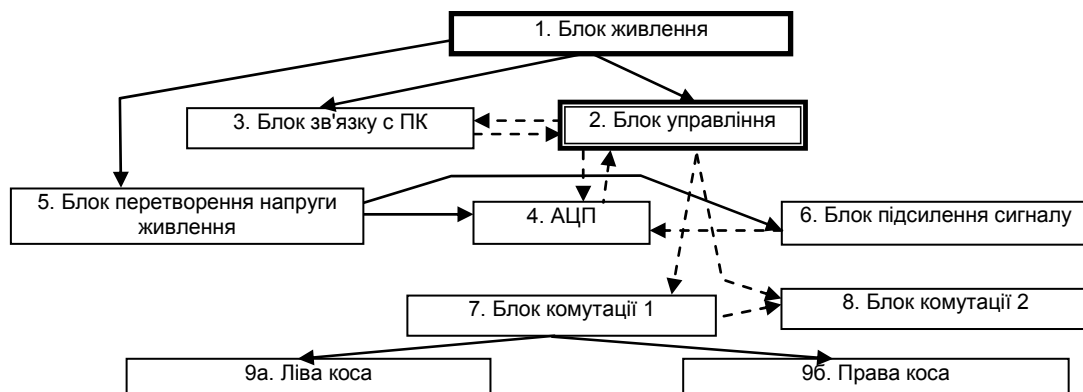


Рис. 1. Структурна схема багатоелектродної електрометричної установки.
Суцільними стрілками позначені лінії живлення, пунктирними стрілками позначені інформаційні зв'язки

Розглянемо кожний функціональний блок окремо.

1. Блок живлення. Блок використовується для подачі живлення на всі основні вузли приладу. Вхідна напруга 9-15 В, вихідна $5V \pm 10\%$.

2. Блок управління. Являє собою логічну схему, базовим елементом якої є мікроконтролер. Керує виконанням ряду функцій: зв'язок з ПК (приймання і передача даних), приймання даних з аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), керування блоком комутації.

3. Блок зв'язку з персональним комп'ютером (ПК). Реалізований на інтерфейсі RS232. Зв'язок з персональним комп'ютером здійснюється через порт USB.

4. АЦП. 16-бітний біполярний аналогово-цифровий перетворювач AD976 з паралельним виходом.

5. Блок перетворення напруги. Здійснює конвертацію постійної напруги 5 вольт у біполярний вигляд ± 5 В. Потужність блоку 1 Вт. Служить джерелом живлення для АЦП і блоку підсилення сигналу.

6. Блок комутації 1. Являє собою серію малопотужних герконових комутувальних елементів. Здійснює комутацію електродів в приймальну та живильну лінію. Керується з блоку 2.

7. Блок комутації 2. Являє собою серію малопотужних герконових комутувальних елементів. Здійснює вибір типу реєстрації (вимірювання струму чи напруги). Керується з блоку 2.

8. Блок підсилення сигналу. Підсилювач сигналу з коефіцієнтом підсилення 100. Реалізований на операційному підсилювачі з малим коефіцієнтом шуму та низькими лінійними спотвореннями сигналу.

9. Ліва (а) і права (б) коса електродів. Кожна коса містить по 32 латунних та мідних електродів.

Параметри установки та технологія вимірювань.

Основні параметри установки визначаються поставленими завданнями та наявною елементною базою. Значення вхідних напруг і струмів визначаються виходячи із електричних властивостей геологічного середовища та присутній у ньому об'єктів антропогенного або природного генезису. При цьому в якості вхідних (для розрахунку параметрів електродів, діапазонів струмів та напруг) беруться значення позірною електричного опору для характерних ґрунтових розрізів території України [5]. Виходячи з цього, діапазон вхідних напруг вибрано в межах ± 9 В, струмів ± 1 А. При використанні 16 бітного АЦП максимальна роздільна здатність становить: по напрузі 0,3 мВ, по струму 0,3 мА. Вимірювання проводяться із дотриманням вимог стандартної методики вимірювань позірною опору, що описана в інструкції по електророзвідці [4]. Врахування поляризації електродів здійснюється шляхом повторних вимірювань в приймальній лінії при наявності і відсутності струму.

Польові вимірювання установкою ТЕО потребують попередньої підготовки пакету файлів послідовності комутацій електродів. Безпосередньо на точці вимірювань оператор обирає оптимальну методику зондування з огляду на конкретні місцеві умови і параметри шуканих об'єктів. По обидва боки від центра установки розмотуються електричні коси, встановлюється апаратура і ПК. Час запису на одному пункті вимірювань при найбільшій деталізації становить близько 30 хвилин. В

результаті отримуємо матрицю ρ_n , приклад якої представлений на рис. 2.

Максимальна глибинність установки, оцінена за вищенаведеною формулою з роботи [6] становить 11 м.

На рис. 3 представлений приклад індивідуального зондування чотириелектродною установкою Шлюмберже у центральній точці профілю при максимальному розносі живильних електродів 63 м.

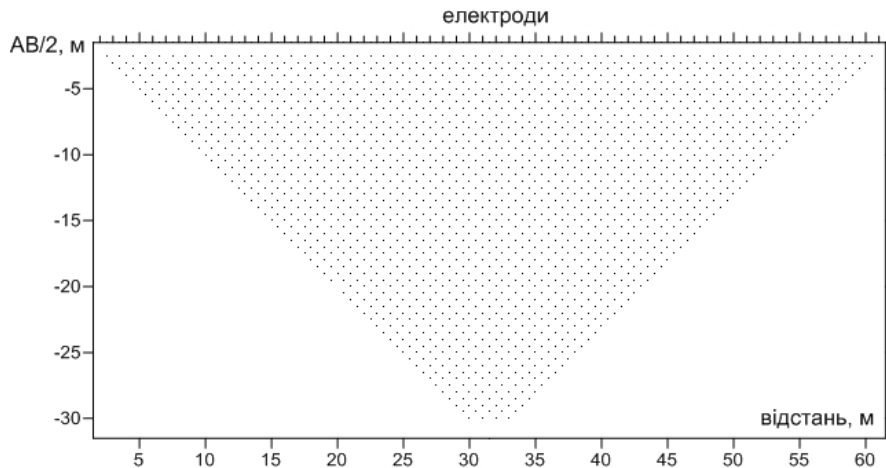


Рис. 2. Матриця вимірів ρ_n при опитуванні симетричною чотириелектродною установкою

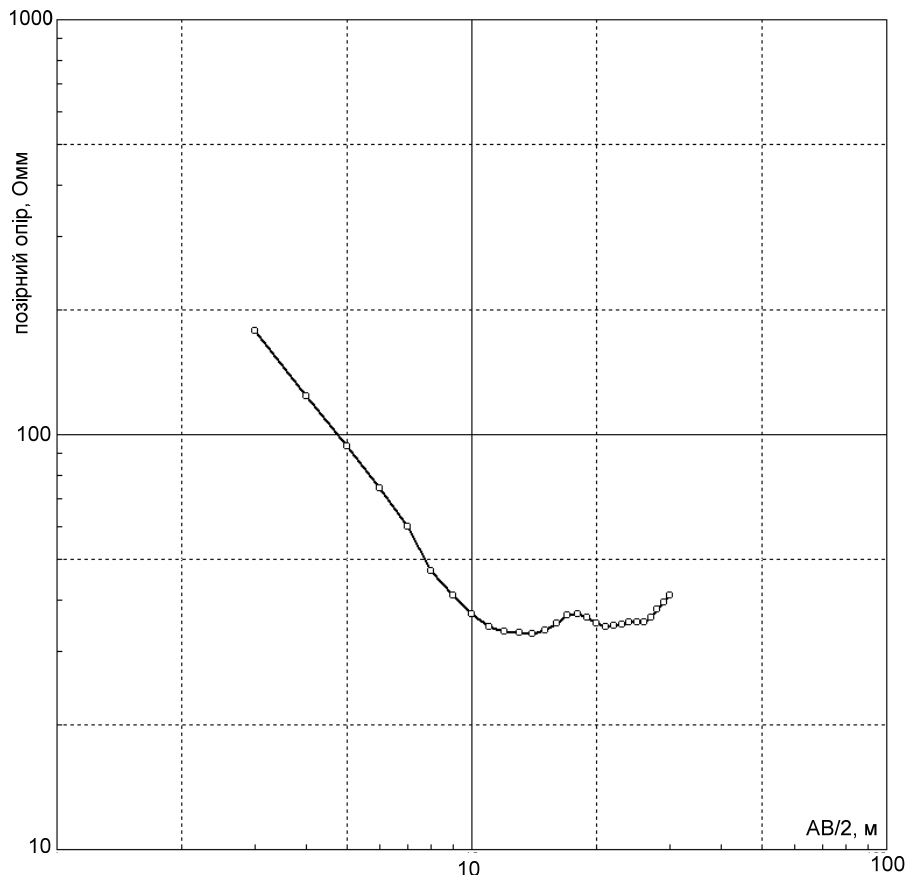


Рис. 3. Приклад окремої кривої вертикального електричного зондування у центральній точці установки

Можливості пристосування до конкретних польових умов.

Існує можливість зміни відстані між електродами в межах 0,5-1 м, при цьому максимальна глибинність установки зменшиться вдвічі. Слід враховувати, що при зменшенні відстані між електродами підвищується точність фіксації вертикальних границь у розрізі, що надзвичайно важливо при вивченні археологічних пам'яток.

Існує можливість вибору між типами установок: дипольна осьова або симетрична. Вибір між дипольною осьовою та симетричною установками здійснюється виходячи з переваг та недоліків того чи іншого виду реєстрації. Основними перевагами використання симетричної установки є економне використання джерела живлення, більша глибинність в порівнянні з дипольними установками та менша чутливість до горизонталь-

них неоднорідностей. Перевагою дипольних установок є невисокий рівень завад пов'язаних з витокami струму.

Установку ТЕО можна використовувати у специфічних умовах, наприклад, в техногенному середовищі (міська забудова, будмайданчики, тощо), при вивченні вертикальних відслонень.

Обмеження ТЕО відповідають всім обмеженням контактних методів електророзвідки [4], основне з яких становлять складні умови заземлення (тверді поверхні або пересушені ґрунти). Наявність високоомного шару – ізолятора, або низькоомного шару – провідника не дозволяє досліджувати більш глибокі горизонти.

Приклади використання. Дослідження в Бабиному Яру. У рамках спільного проекту з пошуку масових поховань Наукового центру юдаїки та єврейського мистецтва імені Фаїни Петрякової (Україна) та Судового інституту Кренфілд (Великобританія) виконані геоелектричні дослідження методом електротомографії на

двох дослідних ділянках в межах громадського парку в Бабиному Яру.

На рис. 4 представлений зведений розріз ρ_n , виміряний на стадіоні, розташованому в парку.

На ділянці спостерігається зменшення електричного опору з глибиною, що вочевидь, пов'язане з загальним зростанням зволоженості ґрунтових горизонтів. У верхній частині розрізу (до глибини 2 м) виділяється високоомна область. Це насип-покриття стадіону, на краю якого прокладений профіль.

Інший профіль прокладений вхрест простягання колишнього яру (рис. 4), у безпосередній близькості від Пам'ятника Радянським громадянам і військовополоненим солдатам і офіцерам Радянської армії, розстріляним німецькими окупантами у Бабиному яру. Профіль перетинає вимощену паркову доріжку, яка на рис. 5 відмічається при поверхневої аномалією високого опору між 41 та 47 м.

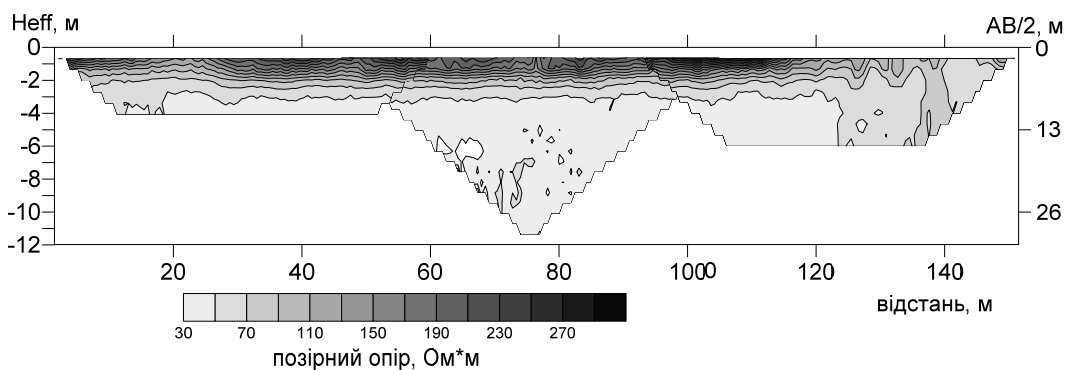


Рис. 4. Бабин яр. Розріз ρ_n по профілю на стадіоні, високоомна область вгорі є щебеним насипом стадіону

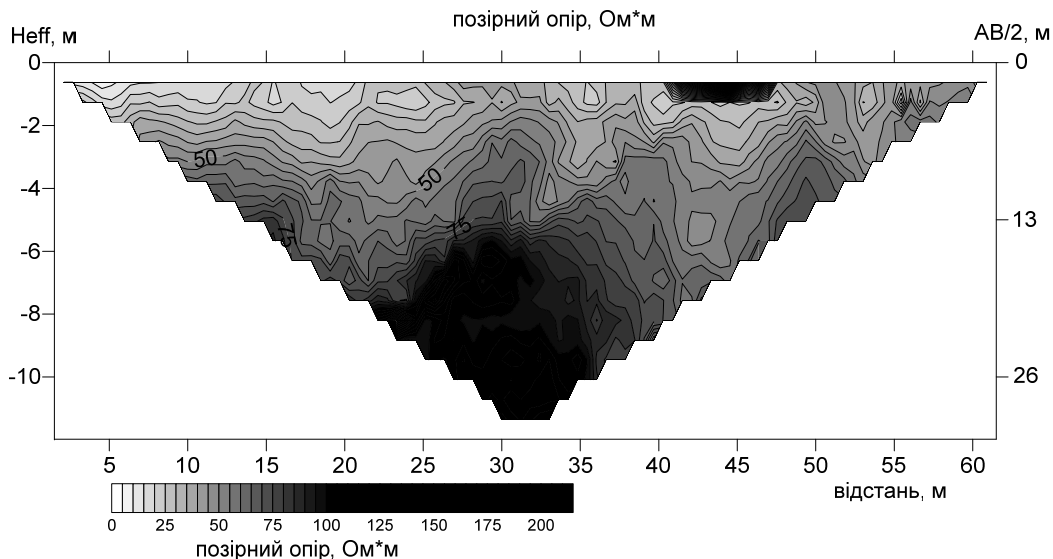


Рис. 5. Бабин Яр. Розріз ρ_n по профілю в парку, неподалік від Меморіалу

Позірний електричний опір приповерхневих шарів розрізу збільшується з глибиною. Ці зміни не є рівномірними по всій довжині профілю. Починаючи приблизно з 1 м і глибше чітко фіксуються сліди інтенсивного перекопування ґрунту. У правій частині профілю помітні три розташовані поруч низькоомні області, шириною 3-5 м з вертикальною потужністю близько 3 м.

Слід зауважити, що ґрунтові ями – могили і рови, які є об'єктами пошуку на даній території, можуть формувати саме такі аномалії пониженого опору. Адже при перекопуванні ґрунту руйнується його природна структура і волога починає більш вільно проникати вглиб, що приводить до зниження електричного опору ґрунтів. На

цій підставі можемо очікувати знаходження на лінії розрізу ровів або ям на глибинах від 1,5 до 7 м.

Дослідження ґрунтового покриття у Голосіївському лісі. Полігон розміщений у Голосіївському лісі в м. Київ. Верхня частина розрізу складена наступними шарами: дерново-підзолистий супіщаний ґрунт потужністю до 2 м; лесовидні суглинки та супіски потужністю близько 10 м; строкаті глини невеликої потужності близько 2 м. На отриманому розрізі ρ_n (рис. 6) виділяються три основні горизонти: 1 – ґрунтовий шар, який характеризується найменшими величинами позірнього опору, 2 – шар підвищеного опору (2-9 м), який може бути співставлений з товщею лесовидних суглинків, 3 – шар зниженого опору (нижче 9 м), імовірно, товща строкатих

глин. У правій частині розрізу виділяється зона пониженого опору, яка відповідає невеликій западині на місцевості.

Ймовірно, тут відбувається інтенсивна інфільтрація вологи всередину товщі лесово-супіщаних порід.

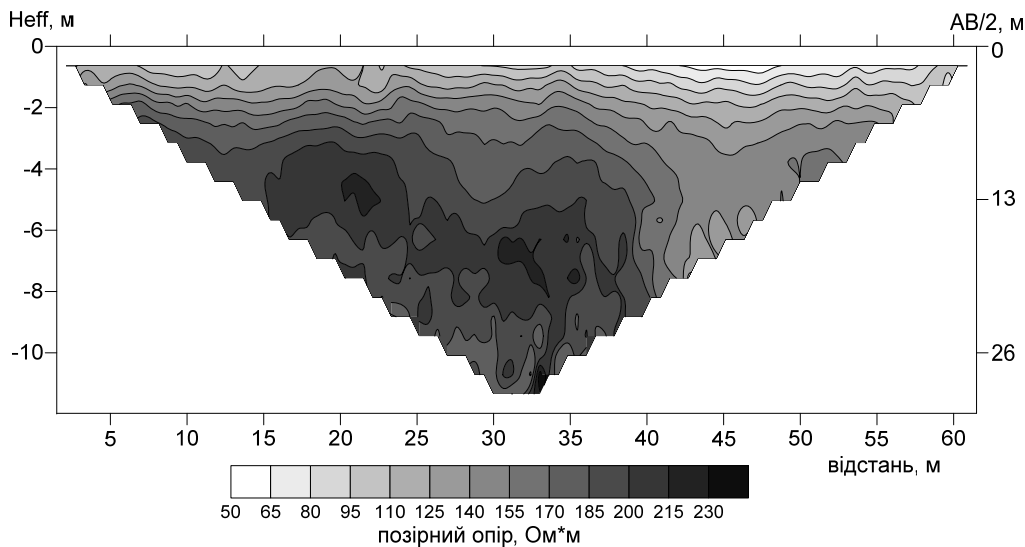


Рис. 6. Голосіївський ліс. Розріз ρ_n

Висновки. Розроблена принципова схема і створений діючий макет багатоелектродної установки вимірювань методом томографії електричного опору. Установка складається з окремих функціональних блоків, а саме: живлення, управління, комутації, підсилення сигналу, зв'язку з ПК, АЦП, перетворення напруги та двох 32-електродних кіс. Електроди можна розміщувати на відстані 0,5-1 м один від одного, максимальна глибинність установки складає 11 м. Установка є ефективним інструментом при археологічних і ґрунтознавчих дослідженнях, що підтверджується прикладами її практичного використання.

Автори щиро вдячні доценту кафедри геофізики М.В. Реві за конструктивні зауваження при підготовці статті.

Список використаних джерел:

1. Бобачев А.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред / Бобачев А.А., М.Н. Марченко, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, А.В. Урусова, В.А. Шевнин / Физика Земли. – 1995. – №12. – С. 79-90.
2. Бобачев А.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред / Бобачев А.А., Модин И.Н., Перваго Е.В., Шевнин В.А. М.; // Разведочная геофизика. Обзор. – АОЗТ "Геоинформмарк", 1996. – Вып. 2. – 50 с.

3. Журбин И.В. Комплексные геофизические исследования культурного слоя археологических памятников (городище Иднакар, IX-XIII вв.) / И.В. Журбин, А.А. Бобачев, В.П. Зверев // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2007. – № 2(30).

4. Инструкция по электроразведке. Отв. исполнитель Франтов Г.С. – 1984, Л.: "Недра".

5. Шепель С.І. Електрометрія ґрунтів України / С.І. Шепель, М.В. Рева, І.І. Онищук, А.В. Сухорада // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2003. – Вип.26. – С. 36-39.

6. Edwards L.S. A modified pseudosection for resistivity and IP / L.S. Edwards // Geophysics. – 1977. – № 42. – P. 1020-1036.

7. Gaffney C. Revealing the buried past. / Gaffney C., Gater J. // Geophysics for Archaeologists, Stroud. – 2003.

8. Günther T. Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography – II. Inversion. / T. Günther, C. Rücker, K. Spitzer // Geophysical Journal International. – 2006. – № 166. – P. 506-517.

9. Papadopoulos N. Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. / N. Papadopoulos, M.Y. Yi, J.H. Kim, G.N. Tsokas, P. Tsourlos // Journal of Applied Geophysics. – 2010. – № 70. – P. 192-205.

10. Parasnis, D.S. Principles of Applied Geophysics: Fifth Edition / D.S. Parasnis. – London: Chapman & Hall, 1996. – 456 p.

11. Rücker C. Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography – I. Modelling. / C. Rücker, T. Günther, K. Spitzer // Geophysical Journal International. – 2006. – № 166. – P. 495-505.

Надійшла до редколегії 02.03.13

Р. Хоменко, інж., К. Бондарь, канд. геол. наук, С. Попов, зав. лаб. Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

НОВАЯ МАЛОГЛУБИННАЯ МНОГОЭЛЕКТРОДНАЯ УСТАНОВКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Разработана многоэлектродная установка электротомографии, которая позволяет исследовать кажущееся электрическое сопротивление сложно-построенных сред с высокой детальностью. К установке подключены две косы по 32 электрода в каждой. Электроды можно размещать на расстоянии 0,5-1 м друг от друга, максимальная глубинность установки составляет 11 м. В статье приведены характеристики установки и примеры практического использования для изучения строения приповерхностной части разреза.

R. Khomenko, Engineer, K. Bondar, Cand. Sci. (Geol.), S. Popov, Head of Laboratory Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

NEW HIGH-RESOLUTION SHALLOW-DEPTH MULTI-ELECTRODE DEVICE FOR ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY

The new multi-electrode device for high-resolution electrical resistivity tomography is designed. Two lines with 32 electrodes each are connected to the device. Electrodes can be placed at a distance of 0.5-1 m from each other, the maximum deep implication is limited at approximately 11 meters. The parameters of the device and examples of practical use for studying of near-surface structure are represented in the article.