

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГЕОЛОЖКИ СТРУКТУРИ НА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ ЧРЕЗ СЪВРЕМЕННИ ГЕОЕЛЕКТРОМАГНИТНИ МЕТОДИ

Божидар Сребров

Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска академия на науките
e-mail: srebrov@geophys.bas.bg

Ключови думи: *геоелектрични структури, магнетовариационно сондиране, магнитотелурично проучване*

Резюме: *В работата са разгледани основите на магнетовариационното и магнитотелуричното сондиране. Тези два геоелектромагнитни метода за геопроучване са приложени за първи път на територията на България чрез използване на цифрови данни. Магнетовариационно изследване е проведено в района на геомагнитна обсерватория Панагюрище, а магнитотелуричното е в Бургаския хидротермален басейн.*

EXPLORATION OF GEOLOGICAL STRUCTURES ON THE TERRITORY OF BULGARIA BY MODERN GEO-ELECTROMAGNETIC METHODS

Bozhidar Srebrov

National Institute for Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: srebrov@geophys.bas.bg

Keywords: *geo-electrical structures, Deep geomagnetic sounding, Magnetotelluric explorations*

Abstract: *In the paper are observed the fundamentals of the Deep Geomagnetic Sounding (DGS) and the Magnetotelluric (MT) exploration. These two geo-electromagnetic exploration methods are applied on the territory of Bulgaria, for first time by using of numerical data. The DGS investigation was carried out for the region of PAG geomagnetic observatory and MT exploration is on territory of Burgas hydrothermal basin.*

Въведение

Съвременните методи за проучване на литосферата и Горната мантия на Земята, които използват геоелектромагнитното взаимодействие се развили значително в последно време. Тези от тях, които се основават на естествено генерирани полета, са т.н. индукционни методи. Към тази група спадат магнетовариационния (МВ) и магнитотелуричния (МТ) методи на геопроучване. Настоящата работа отразява първите такива изследвания на територията на България, които бяха осъществени с използването на цифрови данни. През 80-те години на миналия век руски специалисти са провели МВ-изследвания в ограничен брой точки в страната, но с аналогова апаратура.

1. Теоретични основи на геоелектромагнитните методи на проучване

Теоретичната основа на индукционните методи е теорията на електромагнетизма. Тук ще разгледаме основните задачи на геоелектромагнитното проучване на базата на уравненията на Максвел:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0, \\ \operatorname{div} \vec{D} = q. \end{cases}$$

тук \vec{E} и \vec{H} са напрегнатостите на електричното и магнитното поле, \vec{D} и \vec{B} са векторите на електричната и магнитната индукция, \vec{j} е вектора на плътността на тока и q е плътността на електрическите заряди.

Уравненията на Максвел се допълват с уравненията на връзките

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad \vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

тук σ , ε и μ са съответно електропроводимостта, диелектричната и магнитната проницаемост на средата.

Съществуват три типа прави и обратни задачи в зависимост от изменението на полето във времето. В областите в пространството, където електрическите заряди не съществуват или се разсейват бързо, като отчетем уравненията на връзките може да запишем уравненията на Максвел за еднородна среда така:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{H} = 0, \\ \operatorname{div} \vec{E} = 0. \end{cases}$$

След съответни преобразования от уравненията на Максвел могат да се получат така наречените телеграфни уравнения:

$$\Delta \vec{H} = \sigma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}.$$

$$\Delta \vec{E} = \sigma \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

Ако полето не се изменя във времето и при това в средата текат токове на проводимост телеграфните уравнения се преобразуват в уравненията на Лаплас:

$$\Delta \vec{H} = 0 \quad \Delta \vec{E} = 0,$$

а в уравненията на Максвел изчезват производните по времето. При това първите две уравнения на Максвел придобиват вида:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = 0. \end{cases}$$

Такъв модел на полето се нарича стационарен и се използва като теория на геопрочувателните методи с постоянен ток (модел I).

В случая на бавно изменящи се полета в десните части на телеграфните уравнения първият член ще бъде значително по-голям от втория и телеграфните уравнения се преобразуват в уравнения на дифузия:

$$\Delta \vec{H} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \Delta \vec{E} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Където

$$a = 1/\sqrt{\sigma\mu}$$

е параметър на токова проводимост. В такъв модел, в който са пренебрегнати така наречените токове на отместване, се нарича квазистационарен. В рамките на този модел първите две уравнения на Максвел имат вида:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E}, \\ \text{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \end{cases}$$

Квазистационарният модел се използва като теория на нискочестотните методи за геопрочване (модел II). Това е моделът на индукционните методи с използване на естествените източници на геомагнитни вариации.

2. Естествени източници на променливо електромагнитно поле

Източниците на геоелектромагнитно поле, използвани при индукционните методи, създават т.н. първично поле. Тези източници са разположени в атмосферата, йоносферата и магнитосферата на Земята, а вторичното поле е резултат от индуктирани токове в Земята. Следователно използват се естествени източници в ULF, ELF и LF диапазоните. Посъществените явления, генериращи първичното поле са следните:

- *Геомагнитни бури и суббури* – интензивно изменение на геомагнитното поле, стигащо до стотици nT.
- *Денонощни вариации* – периодични колебания на геомагнитното поле (с период 24 часа) с амплитуда, достигаща до 50 nT
- *Геомагнитни пулсации* – квазисинусоидални устойчиви и ирегулярни вариации с период от 0,1 до 1000 сек. и със стойности на полето от първите няколко nT за късите периоди до десетки nT за дългите
- *Сравнително високочестотни вариации свързани с далечна гръмотевична активност* – вариации с честота от няколко Hz до първите 20 kHz (аудио диапазона).

3. Основни уравнения на хармоничното поле за уравненията от Модел II

Геомагнитните вариации създават хармонично поле. Електричното и магнитното поле при хармонични изменения се представят по следния начин:

$$\vec{E}(t) = \text{Re}(\vec{E} \cdot e^{-i\omega t}), \quad \vec{H}(t) = \text{Re}(\vec{H} \cdot e^{-i\omega t})$$

Производните по времето на компонентите на полето се записват така:

$$\frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} = -i \cdot \omega \cdot \vec{E} \cdot e^{-i\omega t} \quad \frac{\partial \vec{H}(t)}{\partial t} = -i \cdot \omega \cdot \vec{H} \cdot e^{-i\omega t}$$

Като поставим последните две уравнения в уравненията на квазистационарното поле (Модел II) получаваме уравненията на Максвел във вида:

$$\begin{cases} \text{rot}\vec{H} = \sigma \cdot \vec{E}, \\ \text{rot}\vec{E} = i \cdot \omega \cdot \mu \cdot \vec{H}, \\ \text{div}\vec{H} = 0, \\ \text{div}\vec{E} = 0. \end{cases}$$

По аналогичен начин телеграфните уравнения за този модел се преобразуват в уравнения на Хелмхолц:

$$\Delta\vec{H} + k^2\vec{H} = 0 \quad \Delta\vec{E} + k^2\vec{E} = 0$$

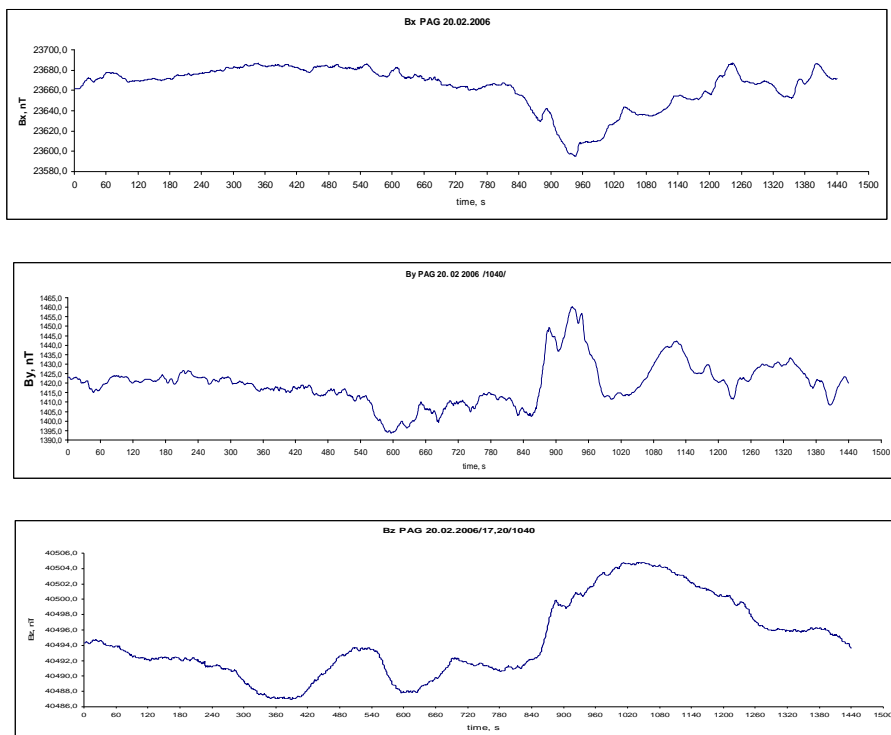
Тук k е вълново число

$$k = \sqrt{-i\omega\mu_0/\rho}$$

4. Вариации на трите компоненти на геомагнитното поле и магнитовариационното сондиране

Геомагнитните вариации на трите компоненти на геомагнитното поле с дълги периоди, създадени от явленията, описани по-горе в раздел II, са в основата на магнитовариационния метод.

Като пример на фиг. 1 е показана денонощната вариация на компонентите на полето B_x , B_y и B_z .



Фиг. 1. Денонощна вариация на геомагнитното поле, регистрирана в обсерватория Панагюрище

Вертикалната компонента B_z е свързана с хоризонталните B_h по следния начин:

$$\mathbf{B}_z(\omega, r) = [\mathbf{W}(\omega, r)] [\mathbf{B}_h(\omega, r)]$$

където:

$$B_h(\omega, r) = \begin{bmatrix} B_x(\omega, r) \\ B_y(\omega, r) \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{W}(\omega, r)] = [W_{zx}(\omega, r) \ W_{zy}(\omega, r)],$$

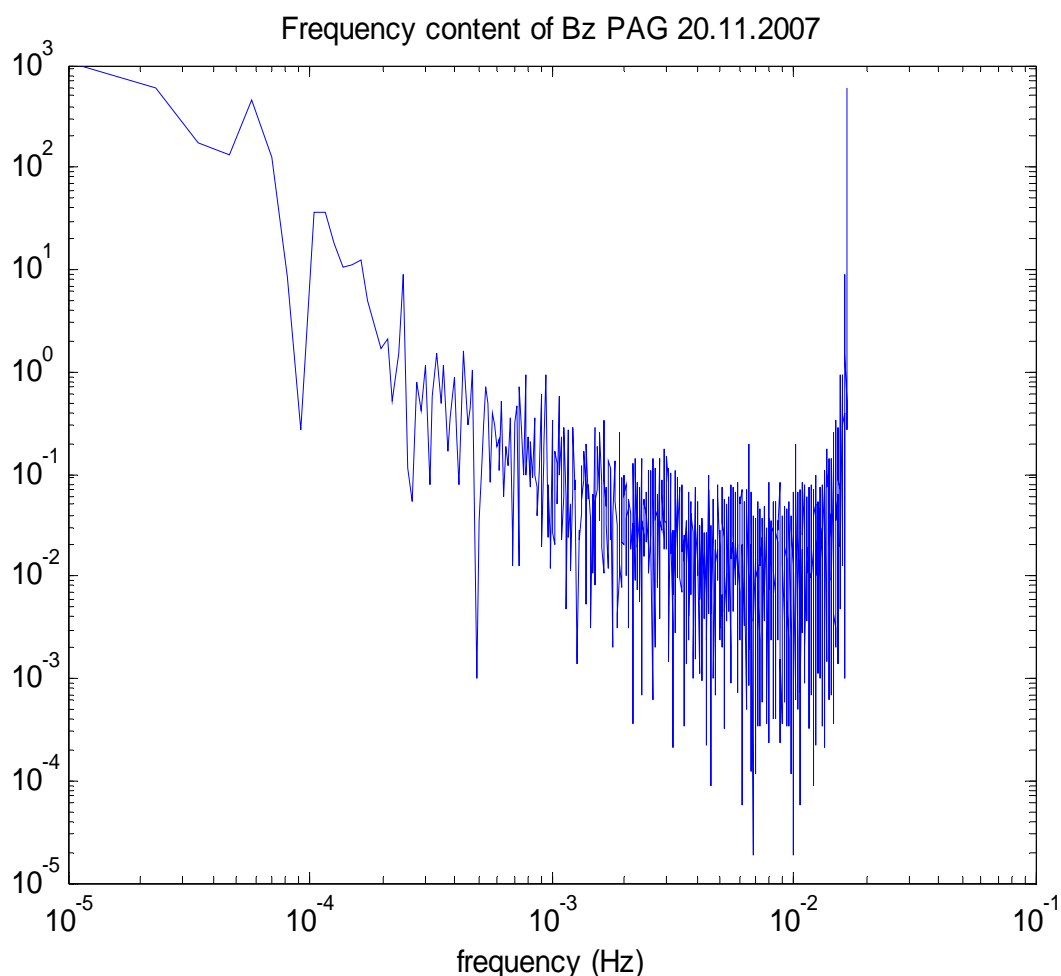
$$W_{zx}(\omega, r) = -Z_{zx}(\omega, r) / Z_{zz}(\omega, r),$$

$$W_{zy}(\omega, r) = -Z_{zy}(\omega, r) / Z_{zz}(\omega, r).$$

Vozoff (1972) предложи матрицата $[\mathbf{W}(\omega, r)]$ да се нарича “tipper” вектор и това название широко се използва в геоелектропроучването.

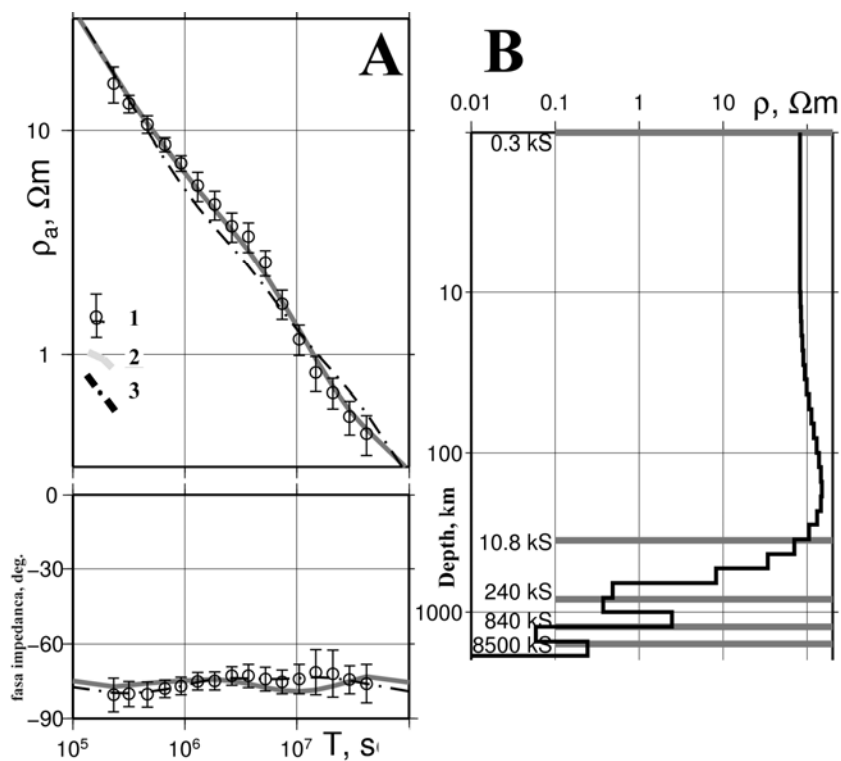
4.1. Магнитовариационно сондиране в района на PAG

Проведеното магнитовариационно проучване в района на геомагнитна обсерватория Панагюрище е осъществено чрез данните от регистрираните геомагнитни бури за двадесет годишен период. На фиг. 2 е показан типичен спектър на една такава геомагнитна буря от 20.11.2007 г. Честотното съдържание на вертикалната компонента на тази геомагнитна буря е в честотната област $1 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-2}$ Hz.



Фиг. 2. Спектър на вертикалната компонента на геомагнитното поле по време на геомагнитна буря, регистрирана в обсерватория Панагюрище

На фиг. 3 са показани магнитовариационните криви на изменението в честотната област (периоди T) на привидното съпротивление и фазата на импеданса - (А) и получения в дълбочина, чрез решаването на едномерната обратна задача (инверсия) геоелектричен модел. (В). Използвани са известните модели за едномерна инверсия “D+” и “Оссат”.



А. Крива на магнитовариационното сондиране за обсерватория PAG
 1 – експериментални данни,
 2 – модел “D+”, 3 - модел “Оссам”.

В. Геоелектрически модел по 1D инверсия

Фиг. 3. Резултати от магнитовариационното сондиране в района на геомагнитна обсерватория Панагюрище

5. Вариации на шестте компоненти на геоелектромагнитното поле и магнитотелуричното проучване

5.1. Поле на телуричните токове в хоризонтално еднородна среда

В нееднородна по хоризонталите геосреда електромагнитният импеданс е тензорна величина и има вида:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

В този случай хоризонталните компоненти на електричното и магнитното поле са свързани по следния начин:

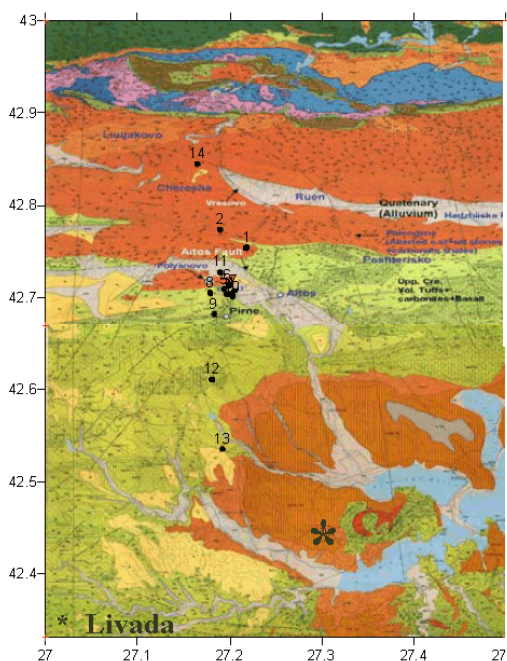
$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

Тази връзка е в основата на магнитотелуричното проучване, както и факта, че привидното електрическо съпротивление на геосредата е еднозначно свързано с импеданса.

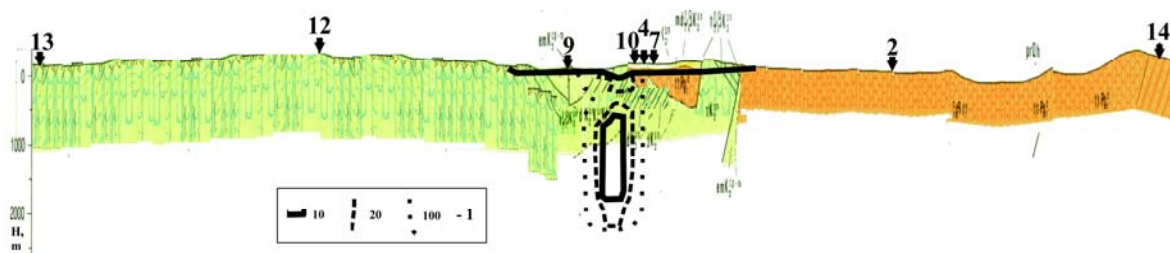
5.2. Магнитотелурични проучвания в Бургаския геотермален басейн

През 2008 година бяха проведени магнитотелурични изследвания в Бургаския геотермален басейн. Колектив от специалисти от НИГТГ на БАН, Геологичен институт на БАН и NGR1 – India проучи хидротермалния обект “Поляново-Айтос” с МТ метода в аудио диапазона (АМТ). На Фиг. 4 е показано разположение на шестнадесетте МТ точки върху геоложката карта

на Бургаския геотермален басейн. Точките на регистрацията на геоелектромагнитното поле са групирани в един регионален (профил №1 с дължина 35 km) и два локални (1-3 km) профили. Използваният честотен диапазон на вариациите (периоди) е от $1 \cdot 10^{-4}$ - 102 секунди.



Фиг. 4. Разположение на МТ точките върху Геоложката карта на Бургаския геотермален басейн



Фиг. 5. Геолого-геоелектричен разрез по регионалния профил №1 с двата хидротермални резервоара

На фиг. 5 на геологическата карта на района е показан геолого-геоелектричен разрез по профил №1, получен чрез обработка на МТ данните със софтуера за обработка на такива данни "MAPROS". Така в резултат на решаването на двумерна обратна задача (двумерна инверсия) на кривите на МТ сондирането, дълбочинното МТ сондиране и магнитовариационното сондиране в обсерватория PAG е построен геоелектричен модел на северо-западната част на Айтоския грабен и на района на геотермалния източник «Поляново». Решаването на двумерната задача чрез използване на геоелектрическите данни позволяват да се предположи, че източникът на геотермална вода е разположен на дълбочина до няколко километра и е свързан с вулканически скални породи. Установено е, че съществуват два резервоара на геотермална вода: първият на дълбочина от повърхността до 360 m и вторият на дълбочини от 740 до 2100 m. Границите на тези резервоари са показани с плътна дебела линия на фиг. 5.

Литература:

1. Srebrov, B., B. Ladanyvsky, I. Logvinov, An application of space generated geomagnetic variations for obtaining of the geoelectrical characteristics at Panagyurishte geomagnetic observatory region, Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, Tome 66, No 6, 2013.
2. Harinarayana, T., B. Srebrov, K. Veeraswamy, K. Bojadgleva - Mapping of subsurface geo-electric structure to assess geothermal potential of Bulgaria using magneto-telluric studies, Technical Report NGRI, Hyderabad, India, 2008.
3. Harinarayana, T., B. Srebrov, K. Veeraswamy, K. Bojadgleva, V. Hristov, Magnetotelluric survey in Burgas hydrothermal basin (SE Bulgaria), Bul. Geophys. J. Vol. 38, pp 3-11, 2012.