

## Изследване елиптическата поляризация на полето на индустриалните токове за търсене на проводящи структури

Лидия Никова

Научноизследователски институт по полезни изкопаеми, 1505 София

L. N i k o v a — *Study of the elliptic polarization of the industrial current field for research of conductive structures.*

A method of measuring and calculating the parameters of the polarization space ellips of the electromagnetic industrial current field (frequency of 50 Hz) is described. The peculiarities of that method consist of the use of three electrode array MON. It permits to measure in four directions and calculate the constant in the time values of the relative potential differences of the field, without necessity of a basic station. Some formulas have been proposed to calculate the relative potential differences and the aggregate error. The ratio between the main ellipse axes and the azimuth of the big axis have been calculated according to the formulas, used in the natural electromagnetic field method.

Experimental explorations proved that the parameters of the space ellipse of the industrial current field, give information for the localization, the strike and the dip of ore structures which do not appear on the surface.

An approach of 2D model (conductive vertical layer with thickness from 20 m to 100 m and a length of several km) to Madan ore field zones has been proposed. Such a model gives a possibility to admit that the main axes of the ellipse are oriented along the main axes of the homogeneity of electrical properties of the surrounding area.

The direction of the big axis is the same as the direction of the ore structures. The ratio between the main axes, beside the ore structures, illustrates the peculiarities of the electrical anisotropy of the metamorphic rocks. In this case the big axis is perpendicular to the schistosity of the rocks.

### Въведение

Електричните методи на проучване имат широко приложение и големи възможности за проследяване на неразкриващи се на земната повърхност разломни структури в рудните райони. Високото ниво на промишлените електромагнитни смущения в близост до действащите рудници е причина за затрудненията при прилагането на тези методи.

Съществуват изследвания, които показват възможностите за използване на електромагнитните полета на индустриалните токове като източник на информация за изучаване на геоелектричните особености на рудните райони и особено за картиране на рудоносни структури (Е г о р о в и др., 1977; О р л о в, Н а б о к о, 1973; Н и к о в а, Я н е в, 1986). Информационните възможности на метода на индустриалните токове в тези работи се определят като близки до методите на постоянния ток. Подобно на всички променливотокови електромагнитни полета обаче полето на индустриалните токове е елиптически поляризирано в проводяща среда.

В настоящата статия е описана методика на изследване и интерпретация на данните от метода на индустриалните токове с цел изучаване елементите на пространствената

елипса на поляризация, които носят допълнителна информация за посоката и наклона на проводящите разломни структури. Такива изследвания са извършвани вече в приложение към естественото електромагнитно поле (Светов, 1969; Цемкало, 1964). Цялостна методика за изучаване елиптичната поляризация на полето на индустриалните токове обаче не съществува.

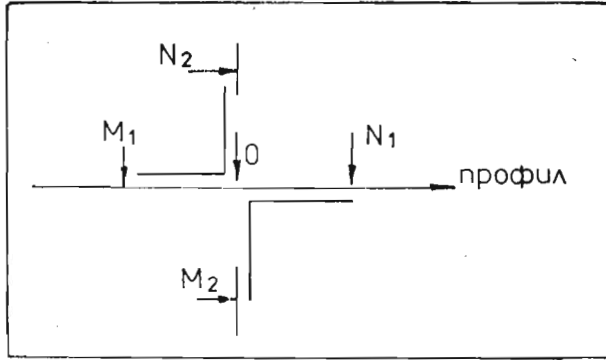
## Физически смисъл на параметрите на пространствената поляризация

Векторът на наблюдаваното променливо електрично поле във всеки момент от време се разглежда (Кауфман, 1985) като сума от първично и вторично полето. При много ниски честоти, какъвто е случаят с метода на индустриалните токове, полето се приема за квазистационарно и вторичното поле в еднородна среда е синфазно с първичното. При наличие на добър проводник условието за квазистационарност се нарушава (Светов, 1973). Вътре в проводника се получава допълнително фазово отместване в сравнение с отместването само по индукция поради силното поглъщане на полето (скин-ефект). За граничния случай на идеален проводник вторичното поле е насочено обратно на първичното. Доколкото допълнителното фазово отместване зависи от проводимостта на средата, то изучаването на параметрите на пространствената елипса дава информация за особеностите на проводящия обект. Според Светов (1973) отношението на малката към голямата ос на елипсата на поляризация по информативност е равностойно на фазовата разлика, а това от своя страна води до получаване на данни за проводимостта на изучаваните нееднородности. В общия случай при отсъствие на силно проводящи обекти отношението на полуосите е свързано със степента на хоризонтална нееднородност на средата (Бердичевски, 1968). Според същия автор в случай на двумерно нееднородна среда главните полуоси на елипсата съвпадат с осите на еднородност на средата, което произтича от теоретичните изчисления. В райони със силна нееднородност на средата конфигурацията на елипсите е сложна (Бердичевски, 1968; Тарасов и др., 1973) и за тях няма разработени теоретични основи. В тези случаи връзката на параметрите на елипсата на поляризация с геоложките особености на средата е изучавана експериментално или чрез моделиране при различни модели на средата и телата. Анализирани са особеностите на отношението на полуосите на елипсите на поляризация и азимута на голямата ос за случаите на вертикални и наклонени пластове с повишена и понижена проводимост, вмесени в еднородна изотропна или анизотропна среда (Тарасов и др., 1973). Резултатите се отнасят за метода на естественото променливо електрично поле. Те са използвани при интерпретация на данните, получени при метода на индустриалните токове. Съществена особеност, която отличава това поле от другите изкуствено създадени или естествени електромагнитни полета, е силната му изменчивост във времето. Това наложи разработването на специална методика на измерване за получаване на инвариантни във времето потенциални разлики на полето.

## Методика на измерване и обработка на данните

Използувана е триелектродна линия MON за измерване на потенциалните разлики на полето в четири азимута по схемата, показана на фиг. 1. Тази схема има предимството пред традиционните схеми, прилагани в естественото електромагнитно поле с използване на базисна станция, тъй като позволява отчитане на временните вариации на полето при наличие на няколко източника на индустриални токове в пространството. За получаване на инвариантни във времето потенциални разлики на полето във всяка точка се извършват по четири измервания с триелектродната линия MON — по посока и перпендикулярно на профила, и две допълнителни — със схеми  $N_1OM_2$ , и  $N_2OM_1$  (фиг. 1). Необходимо е да се спазва затворен цикъл на измерване във всяка точка с

разположение на електродите:  $M_1ON_1$ ,  $N_1OM_2$ ,  $N_2OM_1$ . Това позволява изчисляване на четири инвариантни във времето относителни потенциални разлики в дадена  $i$ -та точка от профила:



Фиг. 1. Схема на разположение на приемните електрода MON за измерване на потенциалните разлики на полето на индустриалните токове в четири азимута  
 Fig. 1. Potential electrodes configuration MON for measuring in four directions the industrial current field potential differences

$$\Delta U_{i,1} = (\Delta U_{N_1})_{i-1} \cdot \left( \frac{\Delta U_{N_1}}{\Delta U_{M_1}} \right)_i,$$

$$\Delta U_{i,2} = (\Delta U_{N_1})_{i-1} \cdot \left( \frac{\Delta U_{N_1}}{\Delta U_{M_1}} \right)_i \cdot \left( \frac{\Delta U_{M_2}}{\Delta U_{N_1}} \right)_i = \Delta U_{OM_2},$$

$$\Delta U_{i,3} = (\Delta U_{N_1})_{i-1} \cdot \left( \frac{\Delta U_{N_1}}{\Delta U_{M_1}} \right)_i \cdot \left( \frac{\Delta U_{M_2}}{\Delta U_{N_1}} \right)_i \cdot \left( \frac{\Delta U_{N_2}}{\Delta U_{M_2}} \right)_i = \Delta U_{ON_2},$$

$$\Delta U_{i,4} = (\Delta U_{N_1})_{i-1} \cdot \left( \frac{\Delta U_{N_1}}{\Delta U_{M_1}} \right)_i \cdot \left( \frac{\Delta U_{M_2}}{\Delta U_{N_1}} \right)_i \cdot \left( \frac{\Delta U_{N_2}}{\Delta U_{M_2}} \right)_i \cdot \left( \frac{\Delta U_{M_1}}{\Delta U_{N_2}} \right)_i = \Delta U_{OM_1}.$$

Измерванията във всяка точка се извършват със застъпване по такъв начин, че на мястото на електродите  $ON_1$  в  $i-1$ -та точка от профила застават електродите  $OM_1$  от  $i$ -тата точка, което означава, че  $(\Delta U_{N_1})_{i-1} = (\Delta U_{M_1})_i$ . Изчисляването на систематичната грешка  $k_c$  се извършва по формулата

$$k_{c,i} = \left( \frac{\Delta U_{i,4}}{\Delta U_{i-1,1}} \right)^{1/4}.$$

Разхвърлянето на тази грешка във всяка от четирите потенциални разлики се извършва по формулата

$$(\Delta U_{i,j})_{\text{кор}} = \frac{\Delta U_{i,j}}{(k_{c,i})^j} = \frac{\Delta U_{i,j}}{(\Delta U_{i,4}/\Delta U_{i-1,1})^{j/4}},$$

където  $j$  се изменя от 1 до 4.

След получаване на относителни, инвариантни и обвързани помежду си потенциални разлики в четири посоки е възможно изчисляване във всяка точка на параметрите на пространствената елипса по формулите (Т а р а с о в и др., 1973):

$$E_{\max}/E_{\min} = \sqrt{\frac{1+a+b+2\sqrt{(a-b)^2+(1-a)(1-b)}}{1+a+b-2\sqrt{(a-b)^2+(1-a)(1-b)}}},$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{(b-a)\sqrt{3}}{2-(a+b)},$$

където:  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  — максимални и минимални стойности на интензитета на полето,  $a = \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2$ ,  $b = \left(\frac{E_3}{E_2}\right)^2$ ;  $E_1$  — интензитет на полето по посока, съвпадаща с линията на профила;  $E_2$  — същата величина по посока  $120^\circ$  от профила;  $E_3$  — същата величина по посока  $240^\circ$  от профила. Положителната посока на отчитане на ъглите е обратна на часовниковата стрелка, а положителната посока на профила е посоката на нарастване на пикетите. Измерителната линия MON е насочена винаги с електрода N по посока на нарастването на пикетите. Величините  $E_2$  и  $E_3$  могат да бъдат изчислени по формулите:

$$E_2 = E_{y_1} \cos 30^\circ + E_{x_2} \cos 60^\circ,$$

$$E_3 = E_{x_2} \cos 60^\circ + E_{y_2} \cos 30^\circ,$$

където:  $E_{y_1}$  — стойност на градиента на полето в посока  $90^\circ$  от положителната посока на профила,  $E_{x_2}$  — същата величина в посока  $180^\circ$ ,  $E_{y_2}$  — същата величина в посока  $270^\circ$  от положителната посока на профила.

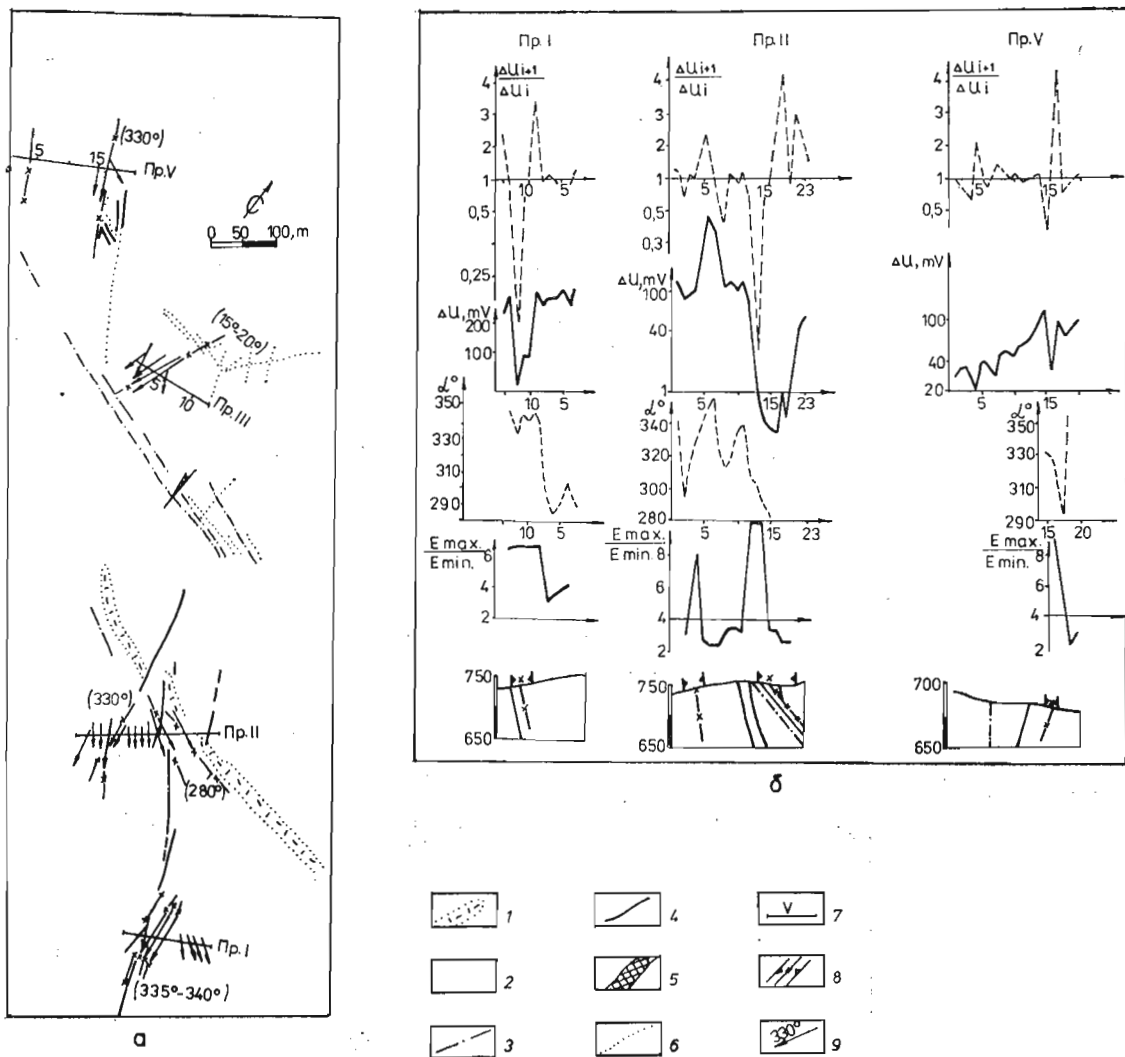
При описаната методика на изчисление достатъчно точни данни се получават за азимута  $\alpha$  на голямата ос на елипсата. По-сложен е въпросът с отношението на полюсите  $E_{\max}/E_{\min}$ . Според Т а р а с о в и др. (1973) точността на получаване на този параметър зависи от големината му. При стойности на  $E_{\max}/E_{\min} > 4 \div 5$  големината на грешката нараства значително и решенията стават неустойчиви.

## Резултати от експерименталните изследвания

Теоретичните разработки, свързани с проблемите на елиптично поляризираното променливо електрично поле, се ограничават, както беше отбелязано, с изучаването на модел на двумерно нееднородна среда. С такъв модел в първо приближение могат да бъдат апроксимирани метаморфитите в Централните Родопи. Те се разглеждат като анизотропна в електрично отношение среда с коефициент на анизотропия  $\beta$  от порядъка на 2—3 (Я н е в, Б о г д а н о в а, 1981). Благоприятен модел за изучаване параметрите на елиптична поляризация на полето представляват рудоносните структури в Маданското рудно поле, които също могат да бъдат апроксимирани с двумерен модел — проводящ, близо до вертикален пласт с дебелина от 20 до 100 m и проводимост, различаваща се значително (над два пъти) от проводимостта на вместващата среда. При такъв модел на средата и търсените нееднородности съществуват предпоставки за ориентация на главните полуоси на елипсата по посока на главните оси на еднородност на средата (посоката и наклона на пластове).

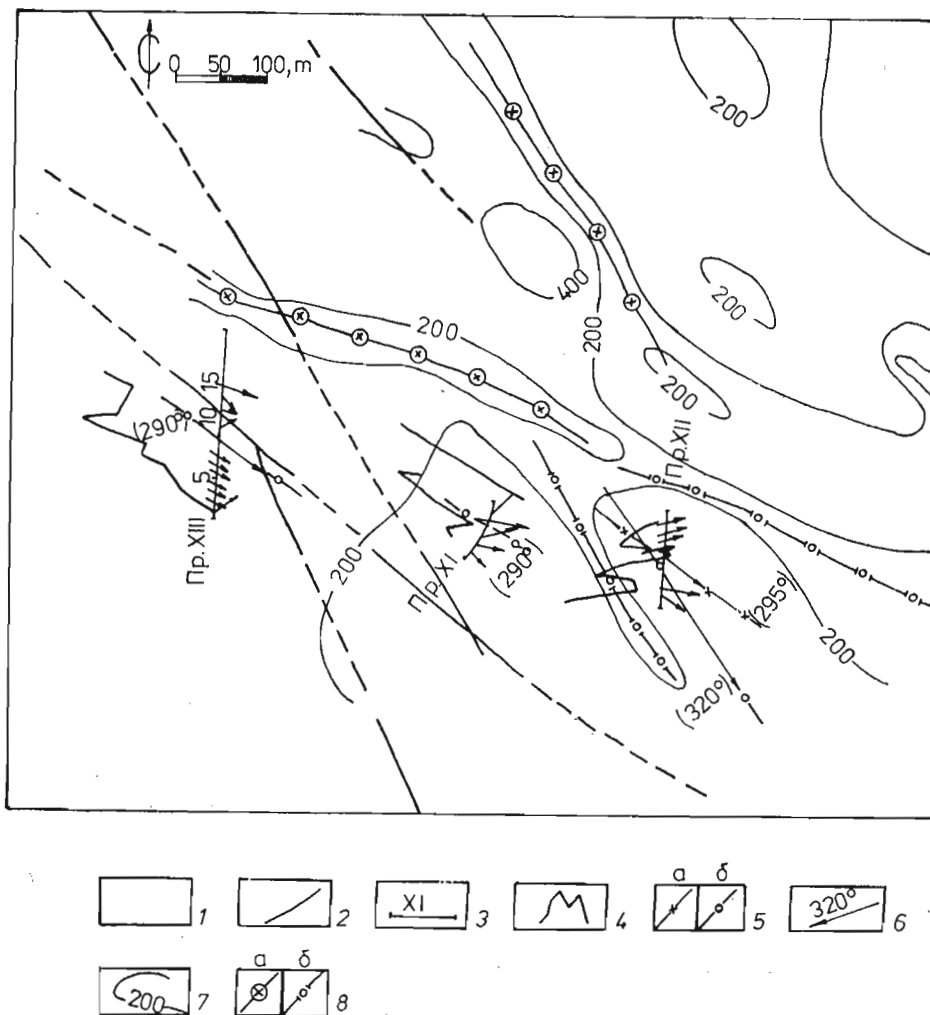
Експерименталните изследвания са извършени северозападно от рудна зона Сполука от Маданското рудно поле за проследяването ѝ в участъци, където тя не се разкрива на земната повърхност. За уточняване на геоложкия причинител и типа на получаваните аномалии измерванията започват от профил I (фиг. 2, а), където рудната зона се разкрива на земната повърхност. Графикът на потенциалните разлики на полето на индустриалните токове, получен по описаната методика, се характеризира с минимум над зоната (фиг. 2, б) и два слабо изразени екранни максимума в краищата ѝ. Отношението на полюсите на елипсите  $E_{\max}/E_{\min}$  в границите на рудната зона нараства значително и е от порядъка на 6, което говори за значителна контрастност по проводимост в сравнение с проводимостта на вместващата среда. Азимутът на голямата ос

на елипсата (фиг. 2, а) в границите на аномалията на проводимост се изменя от  $335^\circ$  до  $340^\circ$  и съвпада с посоката на установената на земната повърхност рудоносна структура. Извън нея азимутът на голямата ос се изменя и е от порядъка на  $290-300^\circ$ . Намаления значително и отношението на полюсите (фиг. 2, б). Като се има предвид стойността на коефициента на анизотропия на скалите, може да се приеме, че извън рудната зона, в участъците, където  $E_{max}/E_{min} < 4$ , параметрите на пространствената елипса отразяват слоестостта на скалите.



Фиг. 2. Геолого-геофизична карта (а) и разрези (б) в участъка на рудна зона Сполука от Маданското рудно поле: 1 — риолитова дайка; 2 — гранитогнайс; 3 — разлом без хидротермална промяна; 4 — разлом с хидротермална промяна; 5 — площна хидротермална промяна; 6 — зона на напукване; 7 — профил на измерване по метода на индустриалните токове (МИТ); 8 — зона и ос на проводимост от МИТ; 9 — азимут на голямата ос на елипсата на поляризация на полето на индустриалните токове  
 Fig. 2. Geology-geophysical map (a) and sections (b) in Spolouka ore zone area of Madan ore field: 1 — rhyolite dike; 2 — granite-gneiss; 3 — fault without hydrothermal alteration; 4 — fault with hydrothermal alteration; 5 — area of hydrothermal alteration; 6 — fissure zone; 7 — industrial current method profile; 8 — anomaly of conductivity, obtained by industrial current method; 9 — direction of the big axis of the industrial current field polarization ellips

По профили II, III и V рудната зона не се разкрива на земната повърхност (фиг. 2, а). Най-интензивната аномалия на проводимост по профил II е свързана със запад-северозападен разлом, по който е внедрена риолитова дайка. Отношението на полуосите на елипсите  $E_{\max}/E_{\min}$  нараства значително в границите на разлома (фиг. 2, б) и е от порядъка на



Фиг. 3. Геолого-геофизична карта в участък Стайчин дол южно от рудопроявленията Мусево—Паспал, Давидковско рудно поле: 1 — гранитогнайси; 2 — разлом с хидротермална промяна; 3 — профил на измерване по метода на индустриалните токове (МИТ); 4 — график на потенциалните разлики от МИТ; 5 — оси: а) на проводимост от МИТ, б) на повишено съпротивление от МИТ; 6 — азимут на голямата ос на елипсата на поляризация на полето на индустриалните токове; 7 — изолинии на  $\rho_{\text{пр}}$  от метода на срединните градиенти (СГ); 8 — оси: а) на проводимост от СГ, б) на повишено електрично съпротивление от СГ

Fig. 3. Geologo-geophysical map in the Staichin Dol area, south of Moussevo-Paspal, Davidkovo ore field: 1 — granit-gneiss; 2 — fault with hydrothermal alteration; 3 — industrial current method profile; 4 — curve of industrial current field potential differences; 5 — anomalies, obtained by the industrial current method: a) of conductivity, b) of high resistivity; 6 — direction of the big axis of the industrial current field polarization ellipsis; 7 — resistivity isoline (dc profiling); 8 — anomaly of dc profiling method: a) of low resistivity, b) of high resistivity

8—9. Азимутът на голямата ос (фиг. 2, а) е  $280^\circ$  и съвпада с посоката на риолитовата дайка. Аномалия на проводимост (минимум на потенциалните разлики), подобна на тази по профил I, се наблюдава в западната част на профила, където азимутът на голямата ос е от порядъка на  $320\text{—}350^\circ$ . Това е вероятно продължение на рудоносната структура, която е вероятно отместена на запад с около 100 m. Подобен характер имат аномалиите по профил V — пикет 15, които могат да се считат като отражение на разлом от северозападната ( $330^\circ$ ) рудоносна система. Аномалия на проводимост, свързана с рудоносната система, не е установена по профил III вероятно поради отместване на профила в източна посока (фиг. 2,а).

Освен посоката на рудоносните структури в някои случаи е възможно да бъде определен и наклонът им по асиметрията на графици на отношението на потенциалните разлики  $\frac{\Delta U_{i+1}}{\Delta U_i}$  (фиг. 2, б). Според теоретичните графици по-слабо интензивният екстремум на този параметър е по посока на наклона на проводящия пласт, което се потвърждава от резултатите, получени по профил I (фиг. 2, б).

Друг електричен модел имат рудоносните структури в участък Стайчин дол на югозапад от рудопроявленията Мусево—Паспал. (фиг. 3). При геоложката картировка са установени няколко кварц-сулфидни жили със запад-северозападна и северозападна посока, чието проследяване е затруднено поради закритостта на терена. Тези структури се характеризират като пласт с малка дебелина (под 10 m) и повишено спрямо вместващата среда електрично съпротивление. При измерванията по метода на средните градиенти по мрежа  $200 \times 25$  m не се установяват като оси на повишено или понижено съпротивление поради недостатъчна детайлност на използваната мрежа на измерване. Високата производителност и простотата на измерителната схема позволяват с метода на индустриалните токове да се извършват достатъчно детайлни изследвания по самите профили на елементите на пространствената елипса, които носят информация за местоположението, посоката и наклона на рудоносните структури.

Установената по профил XIII кварц-сулфидна жила с наклон на югозапад и посока  $280\text{—}290^\circ$  се характеризира с максимум на градиента на индустриалните токове и на отношението на полуосите на елипсата и смяна в посоката на голямата ос. В точката на максимума на градиента посоката на голямата ос е  $290^\circ$  и съвпада с посоката на кварц-сулфидната жила, а в участъка на излиза на зоната на земната повърхност азимутът на голямата ос се изменя на  $90^\circ$ . За скалите, вместващи изучаваната структура, е характерно отношение на полуосите на елипсата от порядъка на 2—3, което е във връзка с електричната анизотропия на метаморфитите. Подобен характер имат аномалиите по профилите XI и XII, където кварц-сулфидни жили не са установени, и задачата на геофизичните изследвания е да се потърси продължението на жилата, установена по профил XIII. Максимумите на градиента на индустриалните токове съвпадат с участъци на смяна в посоката на голямата ос на елипсата, което може да бъде указание за наличие на неразкриваща се на земната повърхност кварц-сулфидна жила.

## Изводи

Разработената методика на измерване и изчисляване на параметрите на пространствената елипса на електричното поле на индустриалните токове позволява да се повишат информативността и икономическата ефективност на геофизичните методи, като се получават сведения за местоположението, посоката и наклона на рудоносни структури, неразкриващи се на земната повърхност. За рудни зони от типа на тези от Маданското рудно поле е характерно наличието на минимум на градиента на индустриалните токове, насоченост на голямата ос на елипсата по посока на рудоносната структура и максимум на отношението на главните полуоси на елипсата на поляризация. Тези особености могат да бъдат обяснени с добрата проводимост на рудните зони, което

довежда до концентрация на индустриалните токове по дължината им. Кварц-сулфидните жили с малка дебелина и повишено електрично съпротивление се характеризират с максимум на градиента на индустриалните токове, смяна в посоката на голямата ос на елипсата на поляризация от перпендикулярна над жилата до успоредна с нея по посока на наклона ѝ и максимум на отношението на полуосите на елипсата. Извън рудоносните структури параметрите на елипсата на поляризация са свързани с електричната анизотропия на скалите.

## Литература

- Бердичевский, М. Н. 1968. *Электроразведка методом магнитотеллурического профилирования*. М., Недра. 254 с.
- Векслер, В. И., С. О. Перекален, Ю. Б. Поддерегин. 1983. Об измерении полей промышленных помех в скважинной электроразведке. — *Изв. ВУЗ, Геол. и разв.*, 5, 84—91.
- Егоров, М. Н., Г. А. Карвелис, К. В. Маляревский. 1977. Использование электрического поля промышленных токов для геологического картирования. — В: *Методы развед. геофиз. Вопр. электроразв. рудн. месторожд.*, 95—100.
- Никова, Л., В. Янев. 1986. Приложение метода индустриальных токов при поисках оруденений жильного типа в Централных Родопах. — *Труды 31-ого Междунар. геофиз. симп., Гданск*, 2, 109—122.
- Орлов, Г. В., Ю. С. Набоко. 1973. Электрические промышленные помехи в районах действующих горнорудных предприятий и их использование для целей геологического картирования. — *Вопр. рудн. геофиз. в Казахстане*, 4, 21—34.
- Светов, Б. С. 1973. *Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки*. М., Недра. 248 с.
- Светов, Б. С., Л. Я. Мизюк, В. М. Поджарий. 1969. *Рудная электроразведка по методике эллиптически-поляризованного поля*. М., Недра. 133 с.
- Тарасов, Г. А., А. А. Сомов, А. А. Елисеев, Г. К. Антонов. 1973. *Метод переменного естественного электрического поля*. Л., Недра. 128 с.
- Цемкало, М. Ф. 1964. Использование явления эллиптической поляризации электрического поля в целях поисков хорошо проводящих рудных залежей. — В: *Труды межвузовской конференции по индуктивным методам рудной геофизики*. М., Недра, 117—120.
- Янев, В., Л. Богданова. 1981. Опыт применения скважинного варианта метода вызванной поляризации в условиях анизотропных сред. — *Бълг. геофиз. спис.*, 7, 1, 100—106.
- Kaufman, A. A. 1985. Distribution of alternating electrical charges in an conducting medium. — *Geophys. prospect.*, 2, 171-184.
- (Постъпила на 23. VIII. 1990 г.)