

y de líquidos, sustancias orgánicas, productos difractados (amorfos) no son minerales, ya que ellos no forman en la naturaleza los individuos. Para los dos últimos hoy día los científicos proponen el término "mineraloides" (según el sentido de esta palabra, ellos son semejantes a los minerales). Además, hay que decir también que algunas dificultades en la terminología mineralógica dependen de los mismos mineralogistas, así como también se conocen casos en los cuales aún no se puede decidir lógicamente, como son:

- a) Establecimiento de las fronteras entre las especies minerales en las soluciones sólidas continuas (por ejemplo, serie forsterita-olivo-fayalita).
- b) Fijar la frontera respectiva entre las especies y las variedades.
- c) Condición sobre la cual las impurezas isomorfas y sus cantidades permiten considerar el objeto dado como especie o como variedad mineral.

#### REFERENCIAS

1. BOKIY, G. B.: "Determinación del concepto de la especie mineral". Memorias de la Sociedad Mineralógica, número 6, 1974 (en ruso).
2. BULAJ, A. G.: "Principios de la determinación de los conceptos 'mineral', 'especie mineral' y la elaboración de la nomenclatura de minerales". Memorias de la Sociedad Mineralógica, no. 6, 1977 (en ruso).
3. GRIGORIEV, D. P.: "¿Qué es mineral?" Memorias de la Sociedad Mineralógica, no. 4, 1961 (en ruso).
4. GRIGORIEV, D. P.: "Objetos naturales de la mineralogía, individuos minerales y especies minerales". Memorias de la Sociedad Mineralógica, no. 4, 1975 (en ruso).
5. POVARENQJ, A. S.: "Conceptos fundamentales de la mineralogía moderna". Memorias de la Sociedad Mineralógica, no. 1, 1977 (en ruso).
6. CHUJROV, F. V., N. V., PETROVSKAY y B. B. ZVIAGIN: "Algunos conceptos principales de la mineralogía". Revista Mineralógica, no. 2, 1983 (en ruso).

CDU 550.83

## VARIANTES DE MEDICION DEL METODO DE POLARIZACION INDUCIDA

#### RESUMEN

La aplicación del método de polarización inducida en la búsqueda de yacimientos minerales sólidos y de petróleo, así como en los trabajos de hidrogeología e ingeniería geológica, con resultados satisfactorios, ha conducido a un perfeccionamiento constante de este método, lo que ha dado lugar a la aparición de nuevas técnicas y metodologías.

En el presente trabajo se ofrece una clasificación de las diversas variantes de medición del método de polarización inducida y se realiza la descripción de las mismas, poniendo énfasis en la metodología empleada, los trabajos experimentales y de laboratorio, y en los resultados de los trabajos de campo.

REVISTA MINERIA Y GEOLOGIA, 2-84

## ВАРИАНТЫ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

### Резюме

В настоящее время различные методы изучения вызванной поляризации позволили углубить знания причин и процессов, которые обуславливают это явление, находящее важное и широкое применение при решении различных геологических и геофизических задач.

В работе показывается общая классификация методов измерения ВП. Дается их описание, используемая методика, опытные и лабораторные работы, результаты полевых работ.

## VARIANTES DE MEDICION DEL METODO DE POLARIZACION INDUCIDA

Ing. José Antonio Díaz Duque  
Facultad de Tecnología "Comandante Ramón González Coro"  
Centro Universitario de Pinar del Río

### INTRODUCCION

En las últimas dos décadas el método de polarización inducida ha experimentado un desarrollo extraordinario, pasando a ocupar un lugar importante dentro del complejo de métodos geofísicos. Algunas de las cuestiones de la teoría del método, que hace unos años atrás estaban confusas o se desconocían, han hallado respuesta en los trabajos de numerosos investigadores [9, 21, 26, 27, 29, 48, 56, 18, 53, 56, 63], los que se han basado en los siguientes aspectos:

- a) Investigaciones experimentales con el correspondiente desarrollo de la teoría de interpretación.
- b) Desarrollo de la metodología de los trabajos.
- c) Nuevas técnicas de medición, especializadas por la utilización de tiempos cortos de carga, excitación armónica y otras.

De acuerdo con esto, en el estudio de la polarización inducida ha surgido una numerosa variedad de fuentes o medios de excitación de corriente, así como de registros de las señales creadas por los objetos geológicos, lo que ha conducido a la aparición de nuevos y más sofisticados equipos, metodologías de los trabajos de campo, métodos de interpretación y parámetros de estudio.

Las diversas variantes de medición de la polarización inducida pueden clasificarse de acuerdo con:

1. Naturaleza de la fuente de excitación.
2. Variación del campo excitante respecto al tiempo.

3. Linealidad del campo excitante.
4. Variación del tiempo de medición de la señal en la curva de descarga de PI.
5. Forma de la investigación.

En la Tabla 1 se muestra la clasificación general de las variantes de medición de la PI y más adelante se realiza una descripción de las mismas, poniendo énfasis en la metodología empleada, los trabajos experimentales y de laboratorio, y en los resultados de los trabajos de campo.

TABLA 1.

| VARIANTES DE MEDICION DE LA POLARIZACION INDUCIDA   |
|---|
| 1- NATURALEZA DE LA FUENTE DE EXCITACION:<br>1.1. Fuente artificial: Eléctrica y magnética<br>1.2. Fuente natural : Campo electromagnético de la tierra   |
| 2- VARIACION DEL CAMPO EXCITANTE RESPECTO AL TIEMPO<br>2.1. Corriente constante: Impulsos individuales de corriente, impulsos periódicos de igual o diferente polaridad<br>2.2. Corriente alterna : Monoarmónica y poliarmónica |
| 3- LINEALIDAD DEL CAMPO EXCITANTE<br>3.1. No lineal<br>3.2. Lineal  |
| 4- VARIACION DEL TIEMPO DE MEDICION EN LA CURVA DE DESCARGA<br>4.1. Estado temprano de la polarización inducida   |
| 5- FORMAS DE LA INVESTIGACION<br>5.1. Superficial: Perfilaje y sondeo con diversos dispositivos de electrodos<br>5.2. Paramétricas<br>5.3. En pozos<br>5.4. En minas<br>5.5. En laboratorios.                                   |

En la actualidad, las manifestaciones de estudio de la polarización inducida han permitido profundizar en el conocimiento de las causas y los procesos que originan este fenómeno, encontrando una importante y amplia aplicación en diferentes tareas geológicas y geofísicas [22, 26, 12, 52], como por ejemplo en la búsqueda y exploración de yacimientos de metales ferrosos (hierro, cromo, manganeso, titanio), no ferrosos (cobre, aluminio, níquel, polimetálicos), raros (wolframio, molibdeno, estaño, mercurio), nobles (oro, plata), así como en los trabajos de hidrogeología e ingeniería geológica.

#### 1. VARIANTES DE ESTUDIO DE LA POLARIZACION INDUCIDA ATENDIENDO A LA NATURALEZA DE LA FUENTE

##### 1.1. Fuente artificial

De acuerdo con lo señalado en la Tabla 1, el campo excitante para el estudio de la polarización inducida puede ser de origen eléctrico o magnético; teniendo en cuenta que en el resto de los tópicos revisaremos las distintas variantes utilizando fuente eléctrica, en este sentido nos referimos sólo a la variante de fuente artificial magnética.

##### 1.1.2. Fuente magnética

Partiendo de las limitaciones del método de PI en cuanto a costo, necesidad de buenos contactos en las tomas a tierra tanto de AB como de MN, y en la aplicación del mismo cuando existe una capa de alta conductividad (iónica), suprayacente al cuerpo mineral y que enmascara el efecto de este. Algunos autores [15, 58] se han planteado como objetivo la demostración de una variante del método de polarización inducida que emplee el campo magnético en lugar del eléctrico para la excitación, o en las mediciones de la polarización inducida.

Es conocido que la conductividad de las rocas depende de la frecuencia, y que ello puede ser atribuido fundamentalmente a la polarización interfacial en los límites de las partículas de la mena metálica y del electrolito en los poros de la roca encajante [61]. Por otra parte, el campo electromagnético que surge alrededor de una fuente inductiva también depende de la conductividad de las rocas, de ahí que se haya concebido la posibilidad de detectar anomalías de PI con un sistema inductivo, eliminando de esta forma la necesidad de las tomas a tierra [15].

En las investigaciones realizadas, el dispositivo empleado estaba compuesto por un transmisor en forma de espira horizontal y por un receptor situado a una distancia mayor diez veces que el radio de la espira transmisora, de manera que el campo creado se pudiera considerar como el de un dipolo magnético vertical. De esta forma se obtuvieron las curvas teóricas de la respuesta inductiva de un medio homogéneo con diferentes grados de polarizabilidad en gráficos de amplitud y fase del campo magnético. Las pruebas de campo llevadas a cabo en áreas donde se habían obtenido resultados satisfactorios con los levantamientos convencionales de PI no fueron positivas, quedando establecido que la presencia de material polarizable no se hace evidente en los datos de la PI inductivos, de ahí que esta variante no constituya un instrumento práctico para la búsqueda de mineralización sulfurada, al menos para las mediciones de amplitud, y se mantenga vigente la necesidad de emplear al campo eléctrico como excitante.

Partiendo de lo anterior, H. O. Seigel [55] presentó las bases teóricas y experimentales de una variante de PI que emplea el campo magnético en lugar del eléctrico en las mediciones, denominándolo método de polarización inducida magnética (MIP). Los resultados de sus trabajos experimentales y de las pruebas de campo, utilizando tanto

corriente directa como alterna, son satisfactorios y establecen la importante posibilidad de utilizar el método de PI en trabajos de reconocimiento, incluso en la variante aérea.

## 1.2. Fuente natural

Con el objetivo de aumentar la profundidad de investigación por el método de polarización inducida y de eliminar la fuente de corriente en este método, surge la variante de utilizar en calidad de campo polarizante a la componente eléctrica horizontal del campo electromagnético natural de la Tierra [6]. De esta forma la polarización de las rocas y de los cuerpos minerales, producida por esta fuente natural, se manifiesta en una determinada variación del espectro de frecuencias lo que conduce a la deformación de la función de autocorrelación de la señal registrada.

La esencia de esta variante consiste en encontrar para cada punto del perfil la función de autocorrelación de la componente eléctrica horizontal del campo electromagnético natural de la Tierra, la que es registrada por medio de electrodos no polarizables y enviada a un equipo especialmente diseñado para determinar el coeficiente de correlación  $K(\tau)$ , el cual es análogo a la polarizabilidad aparente y que contiene información sobre la característica de tiempo del proceso de PI en la Tierra. La descripción de este equipo, que recibió el nombre de correlómetro, se señala en el trabajo de N. A. Borisov, y G. Ya. Schaidurov [6].

En la Figura 1 pueden observarse los resultados de la diferencia del coeficiente de correlación entre un punto que se mueve a lo largo del perfil y un punto básico inmóvil, y de la polarizabilidad aparente sobre un yacimiento de titanomagnetita en la Unión Soviética. La diferencia



del coeficiente de correlación  $\Delta K(\tau)$  se presenta para dos valores del intervalo de correlación, esto es,  $\tau = 128$  ms y  $\tau = 512$  ms, manifestando una apreciable similitud con el gráfico de polarizabilidad aparente.

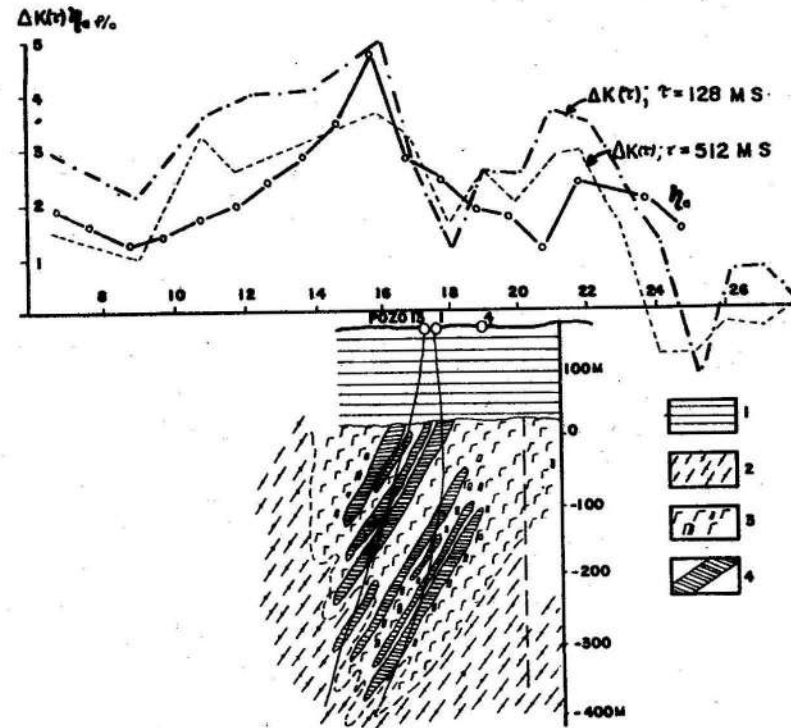


Fig. 1. Resultados de las mediciones del coeficiente de correlación  $\Delta K(\tau)$  y de la polarización aparente  $\eta_a$  sobre un yacimiento de titanomagnetita (4).

1. Rocas sedimentarias de la cubierta de la plataforma.
2. Rocas cristalinas del basamento.
3. Gabroides mineralizados.
4. Menas titanomagnetitas.

## 2. VARIANTES DE ESTUDIO DE LA POLARIZACION INDUCIDA, ATENDIENDO A LA VARIACION DEL CAMPO EXCITANTE RESPECTO AL TIEMPO

### 2.1. Corriente constante

Las variantes de estudio de la polarización inducida utilizando como campo excitante corriente constante, conocidas también como variantes transitorias o del dominio del tiempo, son las más antiguas en el estudio de este fenómeno, pues dieron paso en la década de los años 50 a las variantes de corriente alterna; no obstante ello aún mantienen su vigencia por su exactitud, su poder resolutivo y su profundidad de investigación.

A continuación se analizan por separado distintas modificaciones de estudio de la polarización inducida en esta variante, atendiendo a la forma, secuencia y periodicidad de los impulsos de corriente.

#### 2.1.1. Impulsos individuales de corriente

Esta variante ha sido utilizada durante mucho tiempo para el estudio de la polarización inducida por su sencillez y efectividad en el análisis detallado de las particularidades de tiempo de PI.

Su esencia consiste en suministrar corriente constante, a través de un pulso único, a un medio durante un determinado intervalo de tiempo, y luego de interrumpir la misma, registrar el voltaje secundario, bien en forma continua durante un cierto tiempo, o en forma discreta como diferencia de potencial entre dos puntos, o como la integral en un intervalo de tiempo dado [17, 26, 5, 33, 57]. En general, en el proceso de los trabajos de PI se miden la intensidad de la corriente en la línea de alimentación I, la diferencia de potenciales entre los electrodos recepto-

res en el momento de carga  $\Delta U_{pc}$  y la diferencia de potenciales entre esos mismos electrodos un tiempo después de interrumpida la corriente  $\Delta U_{pr}$ . Según estos datos, son calculados dos parámetros: la polarizabilidad aparente

$$\eta_a = \frac{\Delta U_{pr}}{\Delta U_{pc}} \cdot 100 \%$$

y la resistividad aparente

$$\rho_a = K \frac{\Delta U_{pc}}{I}$$

siendo k el coeficiente del dispositivo utilizado.

Las mediciones en esta variante del método de polarización inducida están relacionadas con el tiempo  $t_c$  durante el cual pasa la corriente por el medio que se estudia y con el tiempo  $t_m$  en el que se efectúa la medición luego de interrumpir a la corriente (Figura 2). Varios trabajos se han dedicado a analizar las relaciones existentes entre la polarizabilidad aparente y los tiempos de carga y de medición [23, 25, 29, 63]. Por lo general,  $t_c$  se elige entre 1 y 5 minutos, aunque en algunas investigaciones por sus propósitos específicos llegue a 2 ms u horas, en tanto  $t_m$  se trabaja igual a 0,5 s .

Cuando el registro del voltaje secundario se realiza por medio de la integral de tiempo de la curva transiente (Figura 3)

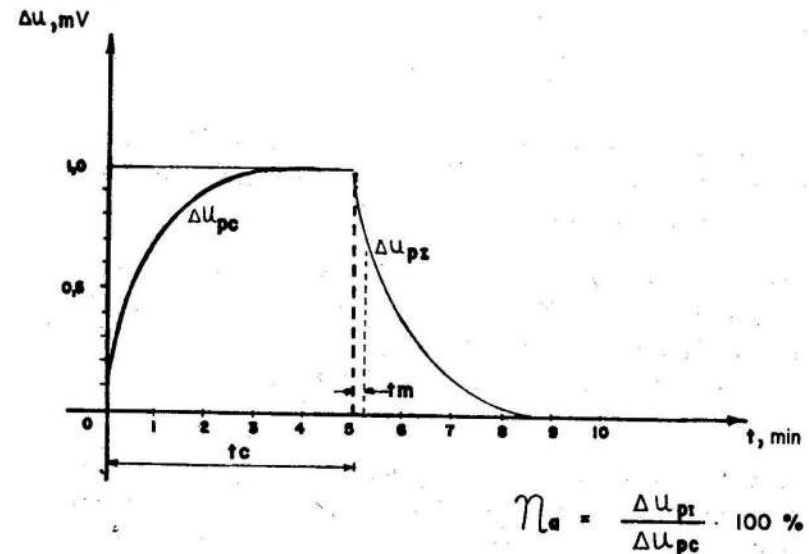


Fig. 2. Gráfico de  $\Delta u$  durante la observación de la polarización inducida en la variante de impulsos largos de corriente.

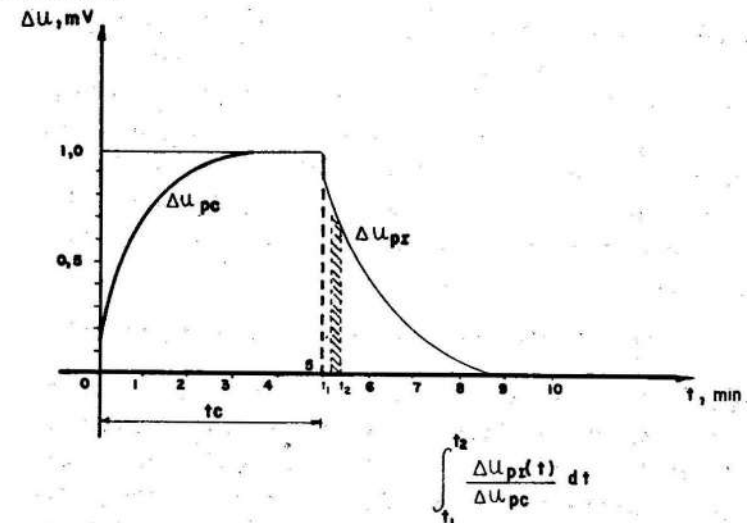


Fig. 3. Determinación de la integral de tiempo de la curva transiente de descarga en la variante de impulsos largos de corriente.

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta U_{PI}(t)}{\Delta U_{pc}} dt$$

se eligen dos tiempos  $t_1$  y  $t_2$  luego de la interrupción de la corriente; de esta forma las perturbaciones instantáneas son reducidas al mínimo.

Durante el trabajo con impulsos individuales de corriente para el estudio de la polarización inducida son utilizados numerosos equipos entre los que podemos citar los soviéticos VP-59, VPO-62, VP-62, VP-67 y el canadiense Seigel Mark VI.

Los resultados de los trabajos de campo de esta variante en diversas regiones del mundo se recogen en incontables artículos, libros e informes, donde se muestra su efectividad para la búsqueda y prospección de yacimientos sulfurosos y polimetálicos [22, 26, 40, 60].

En comparación con otras variantes de PI, la utilización de impulsos largos e individuales de corriente presenta la desventaja de poseer una baja productividad en los trabajos de campo. Por otra parte sus ventajas más sobresalientes radican en permitir el estudio detallado de las características de tiempo de la polarización inducida así como la ejecución de las mediciones con un error relativo no mayor que el 10 %.

#### 2.1.2. Impulsos periódicos de corriente de igual polaridad

La esencia de esta variante de medición de la polarización inducida consiste en hacer pasar a un medio, impulsos periódicos de corriente de igual polaridad y de longitud  $t_c$ , separados por pausas de tiempo  $t_p$ . Pueden distinguirse dos modificaciones en la medición de la diferencia de potenciales  $\Delta U_{PI}$ : con subcarga y sin ella [26].

#### a) Mediciones con subcarga

Su particularidad radica en que después de cada impulso de corriente se varía el punto de observación y las mediciones siguientes se realizan en otros puntos en el curso de un ciclo de impulsos. Para ello en el perfil investigado se distribuyen en forma simultánea unos cuantos pares de electrodos de medición, se compensa la diferencia natural de potenciales en todos ellos, se realiza una carga durante 2 o 3 minutos y finalmente se efectúan las mediciones de las diferencias de potenciales durante las pausas existentes entre pulsos cortos de corriente que de manera adicional se suministran al medio. La longitud de los períodos de conexión y desconexión de la corriente se elige por medio de trabajos experimentales, de forma que durante el tiempo de carga adicional o subcarga, la magnitud de  $\Delta U_{PI}$  aumente tanto como disminuyó durante la desconexión de la corriente [6, 14].

Las mediciones de  $\Delta U_{PI}$  con subcarga pueden realizarse con las estaciones VP-59 y VP-62 entre otras, y las mismas aumentan la productividad de los trabajos de campo en comparación con la variante de impulsos individuales de corriente, pero sólo cumplen con la precisión requerida para un nivel muy bajo de ruidos.

#### b) Mediciones sin subcarga

En esta modificación, para cada punto del perfil se mide la diferencia de potencial  $\Delta U_{PI}$  en el transcurso de una serie de impulsos de corriente en un momento determinado  $t_m$  de las pausas (Figura 4). El instrumento de medición se conecta en cada pausa entre los impulsos de corriente y con ayuda de un registro de memoria se mide en el tiempo  $t_m$  la diferencia de potenciales de polarización inducida.

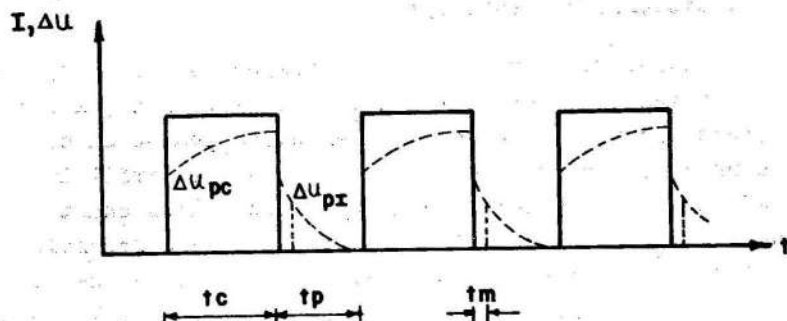


Fig. 4. Gráfico de los impulsos periódicos de corriente con igual polaridad.

En las mediciones de campo son utilizados equipos que poseen una elevada estabilidad ante el ruido de alta frecuencia, en los cuales la duración de los impulsos de corriente es igual que la de las pausas, como por ejemplo los de fabricación soviética KEP y Enicei, en los que las mediciones de  $\Delta U_{PI}$  se realizan 5 ms después de cada interrupción de la corriente; existen además otros equipos en los que se utilizan diferentes tiempos para la carga, la pausa y la medición. La dependencia de la magnitud de la polarización inducida respecto al régimen de medición ha sido ampliamente estudiada [1, 17, 21, 23, 25, 45, 47, 15, 8, 61].

En general la productividad de los trabajos de campo de esta variante está próxima a la que utiliza impulsos individuales de corriente de larga duración.

### 2.1.3. Impulsos periódicos de corriente de diferente polaridad

En esta variante la corriente polarizante cambia periódicamente de polaridad tras un determinado intervalo de

tiempo. En cada punto de medición se realizan varios cálculos de  $\Delta U_{PI}$  en las pausas, y de  $\Delta U_{pc}$  durante el paso de la corriente (Figura 5), con el objetivo de determinar el valor de la polarizabilidad; así tenemos que:

$$\Delta U_{pc} = \frac{1}{2} (\Delta U_{pc} + \Delta U_{pc})$$

$$\Delta U_{PI} = \frac{1}{2} (\Delta U_{PI} + \Delta U_{PI})$$

donde los subíndices 1 y 2 indican los valores de las diferencias de potenciales medidos con las polaridades positiva y negativa de la corriente polarizante, respectivamente. También es factible la medición de los parámetros M y L [59], que presentan integraciones parciales bajo y sobre la curva de descarga (Figura 6).

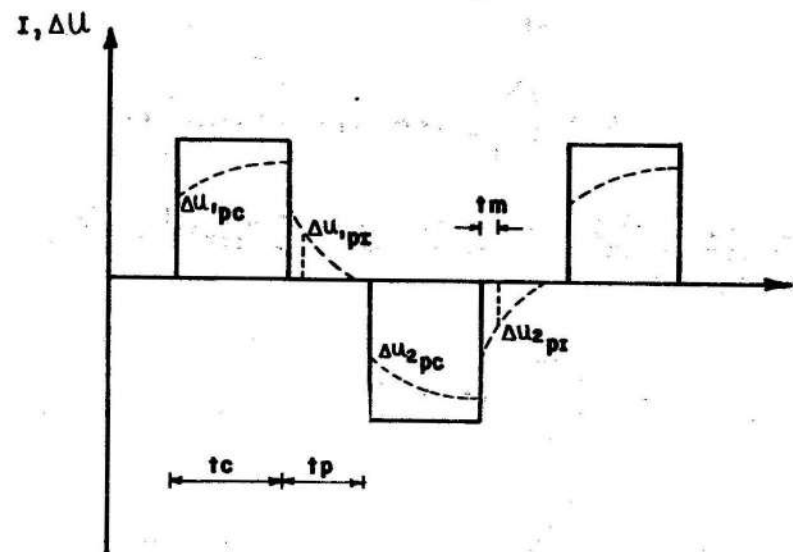
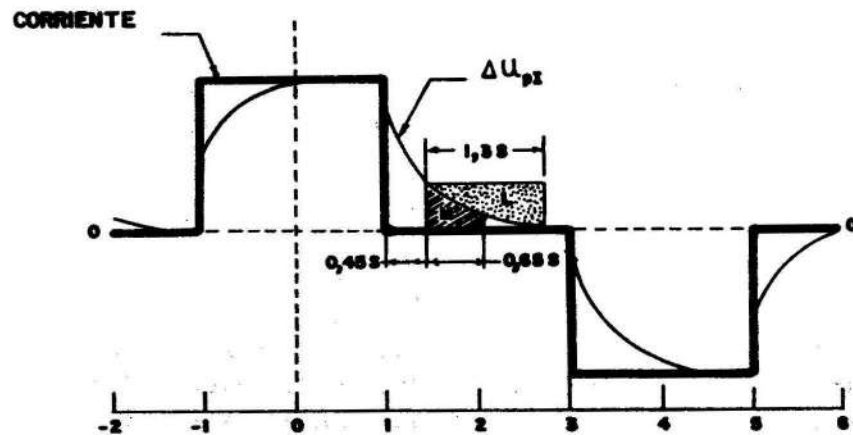


Fig. 5. Gráfico de los impulsos periódicos de corriente con diferente polaridad.





$$M = \int_{t_1}^{t_2} \Delta U_{pz}(t) dt$$

$$L = \int_{t_1}^{t_2} [\Delta U_{pz}(t=t_1) - \Delta U_{pz}(t)] dt$$

Fig. 6. Determinación de los parámetros M y L de la variante de impulsos periódicos de corriente con diferente polaridad (60).

$$M = \int_{t_1}^{t_2} \Delta U_{PI}(t) dt$$

$$L = \int_{t_1}^{t_2} [\Delta U_{PI}(t=t_1) - \Delta U_{PI}(t)] dt$$

El análisis de la dependencia de la polarizabilidad respecto al tiempo de carga con impulsos periódicos de corriente de diferente polaridad, muestra una disminución de dicho parámetro en la medida que disminuye el paso de la corriente, lo cual puede conducir a la pérdida de información de cuerpos minerales de carácter industrial que yacen a profundidad [17, 20, 28, 29]. La selección no sólo del tiempo de duración de la carga, sino también de las pausas, del momento de la medición y de las relaciones entre ellos, requiere un estudio minucioso de las condiciones geólogo-geofísicas del área de investigación [20, 26, 47, 62].

La determinación de la polarizabilidad en la variante de impulsos de corriente de diferente polaridad posibilita una elevada defensa contra los ruidos de baja frecuencia. Por otra parte la productividad de los trabajos de campo es mayor que la de la variante de pulsos largos.

Los equipos utilizados para las mediciones de la polarizabilidad aparente son variados en cuanto a los tiempos empleados para la carga, las pausas y la medición, así como por el parámetro medido.

Por ejemplo, los equipos soviéticos VPO-62, VP-62 y VPC-63 utilizan pulsos con tiempos de carga  $t_c$  iguales a 2,5, 5 o 10 segundos, con tiempos de pausa  $t_p = 1/2 t_c$ , en todos los casos  $\Delta U_{PI}$  se mide 0,5 segundo después de la interrupción de la corriente. En la RDA se diseñó el equipo Erstprospector, con  $t_c = 0,1$  s,  $t_p = 0,2$ . En Estados Unidos de Norteamérica y Canadá se han creado equipos muy variados en los que  $t_c = t_p$ , midiéndose la integral del voltaje en un determinado intervalo de tiempo en la curva de descarga, obteniendo de esta forma el área sobre o bajo la curva, o la relación entre ellas [54, 62].

En la aplicación de la variante de impulsos de corriente de diferente polaridad a los trabajos de campo han sido obtenidos resultados positivos por numerosos investigadores [17, 20, 5, 54]; sin embargo se coincide en señalar como desventaja la disminución de la profundidad de estudio en relación con la variante de impulsos largos.

## 2.2. Corriente alterna

En este tópico agrupamos las variantes de medición del método de polarización inducida utilizando corriente alterna; ellas son conocidas generalmente en la literatura especializada como de frecuencia variable o del dominio de la frecuencia. Ha sido demostrada por varios investigadores [24, 35, 62, 63] la equivalencia matemática entre los parámetros medidos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia cuando el fenómeno de polarización inducida tiene un comportamiento lineal.

El surgimiento de las variantes armónicas en el método de polarización inducida estuvo condicionado por el hecho de que para un medio con conducción iónica y electrónica, la impedancia macroscópica del mismo depende de la frecuencia de la corriente excitante, de tal forma que con el crecimiento de la frecuencia se observa una disminución de la impedancia [8, 11, 35, 60]. El desarrollo extraordinario de estas variantes ha estado dado en lo fundamental por la utilización de equipos de menor tamaño y peso, la simplificación en la interpretación de los resultados y por la elevada defensa contra los ruidos.

A continuación se presentan las características de las variantes monoarmónicas (de una frecuencia) y poliarmónicas (de varias frecuencias) de medición de la polarización inducida cuando la excitación se realiza utilizando corriente alterna.

### 2.2.1. Variante monoarmónica

En la variante de corriente alterna utilizando una sola frecuencia, se emplea como parámetro de medición la diferencia de fase de la tensión en los electrodos de medición respecto a la corriente en la línea de alimentación, la cual caracteriza la polarizabilidad de las rocas y menas (Figura 7).

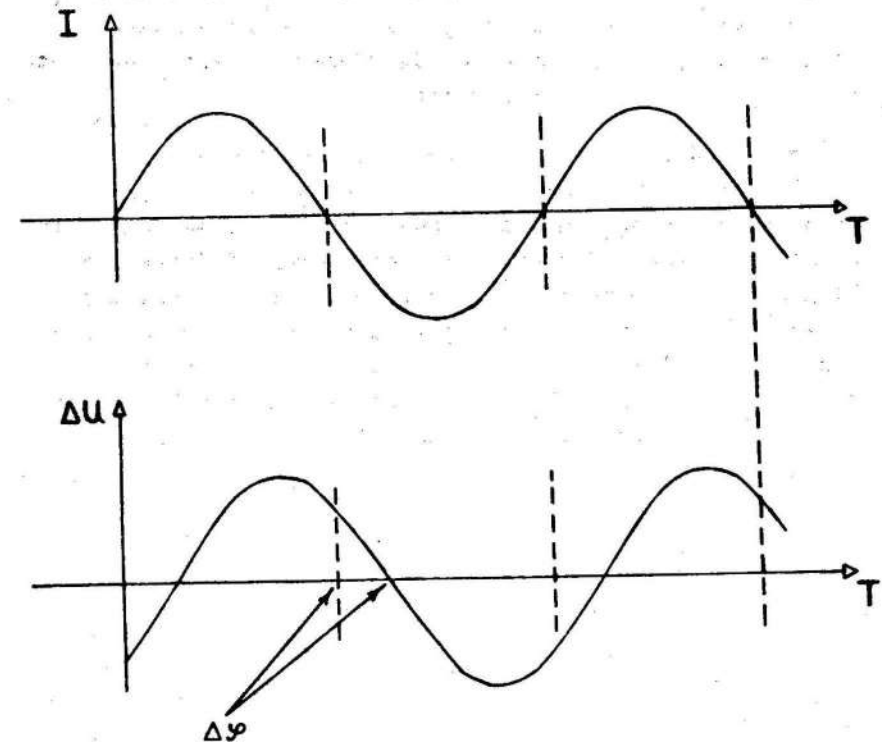


Fig. 7. Diferencia de fases en la variante de corriente alterna monoarmónica.

Varios trabajos de investigación han puesto de manifiesto que los procesos electroquímicos originados por el paso de la corriente polarizante en un medio geológico tienen un carácter capacitivo, lo que se refleja en las mediciones de la diferencia de fase entre el voltaje secundario y dicha corriente [7, 43, 33, 40, 62].

En general en esta variante se utilizan frecuencias bajas que van desde 0,01 hasta decenas de hertz, habiéndose detectado cuerpos minerales que yacen a profundidades superiores a los cien metros, los que no habían sido registrados por las variantes de PI de corriente constante ni por otros métodos eléctricos [31].

Los resultados de los trabajos de campo de las mediciones de fase de PI confirman su elevada efectividad en los casos de regiones con condiciones geoelectricas complejas en las que yacen cuerpos minerales a profundidades que llegan a los 150 metros [48, 50, 36]. Brinda particular interés el análisis de los resultados de las mediciones de fase con dos frecuencias distintas sobre cuerpos minerales y esquistos grafiticos, los cuales manifiestan la efectividad de esta variante para esclarecer la naturaleza de la anomalía de PI [42].

### 2.2.2. Variante poliarmónica

En el estudio de la polarización inducida mediante la utilización de corriente variable con varias frecuencias, pueden ser determinados distintos parámetros: la característica frecuencial de fase, la característica frecuencial de amplitud, el efecto porcentual de frecuencia, el factor metálico, el coeficiente de dispersión frecuencial, etcétera. Cada uno de ellos permite caracterizar al corte geológico estudiado dándonos informaciones más o menos completas del mismo. Así, por ejemplo, si la utilización

del método de polarización inducida se realiza en calidad de indicador de la mineralización, serán suficientes aquellas variantes de mediciones con dos frecuencias; por otra parte, si el objetivo del método de polarización inducida se enmarca en la solución de tareas más complejas, como por ejemplo la determinación de la forma y el carácter de la mineralización, de los grados de comparación de la mineralización y otros, entonces será imprescindible estudiar la característica frecuencial de fase o de amplitud en un amplio rango de frecuencias.

En Norteamérica está muy difundida la variante biarmónica en el estudio de la polarización inducida, utilizándose diversos parámetros tales como:

$$\text{Efecto porcentual de frecuencia PFE} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\sqrt{\rho_1 \cdot \rho_2}} 100 (\%)$$

$$\text{Factor metálico MF} = \frac{\text{PFE} \cdot 10^5}{\sqrt{\rho_1 \cdot \rho_2}} \text{ (mho/m)}$$

donde  $\rho_2$  es la resistividad medida a una frecuencia y  $\rho_1$  es la resistividad medida a una frecuencia 10 veces mayor, ambas en un rango no mayor de 2,5 cps.

En la Tabla 2 se muestran los valores característicos del efecto porcentual de frecuencia y del factor metálico para algunos tipos de rocas y de mineralización.

Las observaciones de campo para estos parámetros pueden efectuarse utilizando cualquier dispositivo de cuatro electrodos; por lo general se utiliza el dispositivo dipolar-dipolar con el objetivo de disminuir la inductancia mutua entre las líneas de corriente y de medición. Los resultados se trazan en forma bidimensional o de pseudosec-

ción (Figura 8). La corriente es aplicada al terreno en dos puntos separados una distancia  $X$ , en tanto los potenciales se miden en otros dos puntos separados entre sí por esa misma distancia y situados en la misma línea que los electrodos de corriente. La separación entre los electrodos de medición y de corriente contiguos es un número entero ( $n$ ) de veces la distancia  $X$ . Las mediciones son realizadas a lo largo de un perfil manteniendo la separación ( $nX$ ) entre dichos electrodos. El tipo de levantamiento (detallado o de reconocimiento) establece el número de valores que toma  $n$  para las observaciones consecutivas en un mismo perfil.

TABLA 2.

| Tipo de roca y de mineralización | Efecto porcentual de frecuencia (%) | Factor metálico (mho/m) |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Granitos no mineralizados        | 0,1 - 0,5                           | < 1                     |
| Rocas básicas no mineralizadas   | 1 - 2                               | 1 - 10                  |
| Sulfuros finamente diseminados   | 2 - 5                               | 10 - 100                |
| Sulfuros diseminados (1-3 %)     |                                     | 100 - 1 000             |
| Sulfuros en venas (3-10 %)       | 5 - 10                              | 1 000 - 10 000          |
| Sulfuros masivos                 | > 10                                | > $10^4$                |

Las mediciones así realizadas para cada conjunto de posiciones de los electrodos son trazadas en la intersección de las líneas de la cuadrícula, una desde el punto central de los electrodos de corriente y la otra desde el punto central de los electrodos de medición. El desplazamiento lateral de un valor dado es determinado por la ubicación a lo largo del perfil del punto centro entre los electrodos de corriente y de medición.

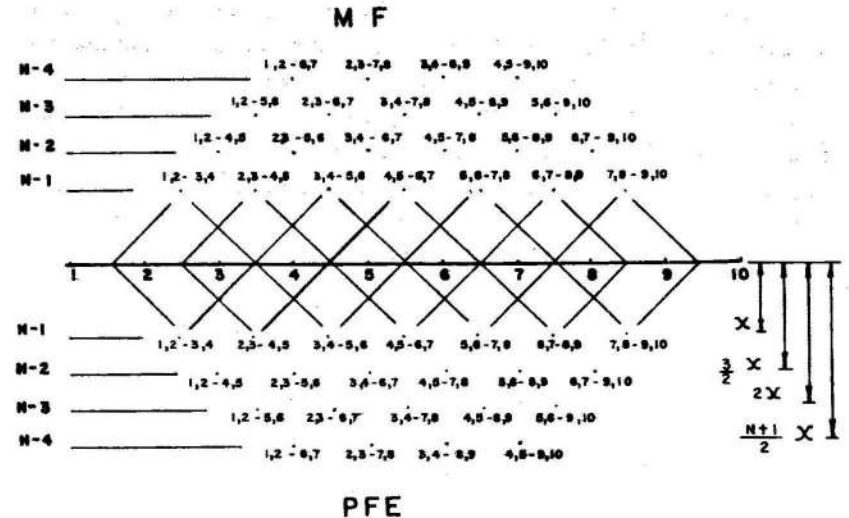
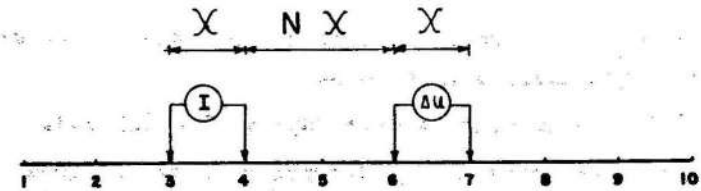


Fig. 8. Representación de los resultados de los parámetros PFE, MF,  $\rho_a$ , utilizados en la variante de corriente alterna poliarmónica.

Según el investigador norteamericano P. Hallef, para la realización de las observaciones de los parámetros PFE y MF deben tenerse en cuenta las siguientes restricciones:

- a) El espaciamiento entre los electrodos no debe ser mayor que 150 para  $n$  mayor o igual a 3.
- b) El rango de frecuencias no debe superar los 2,5 cps.
- c) La resistividad aparente del terreno no debe ser inferior a 25 ohm-m .

La literatura especializada recoge numerosos ejemplos en los que la aplicación de esta variante del método de polarización inducida ha arrojado resultados satisfactorios en la búsqueda de mineralización sulfurosa diseminada y masiva [10, 42, 11, 13, 54]. La sensibilidad para detectar mineralización metálica a profundidades que alcanzan hasta los 200 metros y con una baja concentración es considerable, quedando demostrado aun en zonas en las cuales la aplicación de diversas modificaciones de los métodos electromagnéticos no había arrojado resultados positivos [43, 45], fundamentalmente en áreas de intemperismo y oxidación a gran profundidad, típicas de las regiones tropicales y semitropicales.

Otros parámetros utilizados en la variante poliarmónica del método de polarización inducida son el coeficiente de dispersión frecuencial, la característica frecuencial de fase y la característica frecuencial de amplitud.

El coeficiente de dispersión frecuencial  $K$  se determina a partir de las mediciones de la diferencia de potencial en los electrodos receptores por lo menos a dos frecuencias. Valores de hasta 0,18 en un fondo de 0,02 han revelado mineralizaciones significativas de casiterita [16].

Los dos restantes parámetros consisten en el estudio del comportamiento de la amplitud o la fase con la frecuencia, obteniendo así su característica, lo cual posibilita realizar un análisis más profundo del carácter y la forma de la mineralización en un rango determinado de frecuencias [39, 41]. Recientes investigaciones [44], han mostrado que existen diferencias significativas entre las respuestas espectrales de sulfuros masivos, sulfuros diseminados y grafito, logrando aclarar la naturaleza de las anomalías de PI para estos casos.

### 3. VARIANTES DE ESTUDIO DE LA POLARIZACION INDUCIDA ATENDIENDO A LA LINEALIDAD DEL CAMPO EXCITANTE

A continuación analizaremos aquellas variantes del método de polarización inducida para las que la dependencia lineal entre la fuerza electromotriz, surgida en el contacto de los minerales de conducción electrónica y el medio circundante de conducción iónica, y la corriente eléctrica polarizante deja de cumplirse. Con anterioridad diversas variantes de PI han sido examinadas y en su generalidad cumplían dicha dependencia.

#### 3.1. Polarización inducida no lineal

Diversas investigaciones experimentales y de laboratorio [9, 27, 38, 45, 59] han demostrado que cuando la densidad de la corriente polarizante sobrepasa un cierto nivel, la dependencia lineal entre ella y la fuerza electromotriz de polarización inducida no se mantiene. Se ha establecido mediante experimentos [26] que para el grafito es característica la preponderancia de la polarización anódica mientras que para las menas sulfurosas es la catódica, de ahí que las respuestas de ambos objetivos geológicos sean dependientes de la dirección e intensidad de la corriente polarizante y por tanto la separación de las anomalías en



uno u otro caso sean un hecho factible [38, 39]. En la Tabla 3 se muestran los resultados alcanzados por Komarov en el estudio de la polarización de algunos minerales.

TABLA 3.

| MINERAL     | E, mV |        |
|-------------|-------|--------|
|             | ANODO | CATODO |
| Pirita      | 66    | 75     |
| Pirrotina   | 4     | 4      |
| Calcopirita | 64    | 100    |
| Galenita    | 20    | 25     |
| Magnetita   | 78    | 99     |
| Grafito     | 159   | 141    |

Polarización de los minerales en una solución 0,1 normal de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  pH = 7,  $j = 1 \mu\text{a/cm}$ ,  $t_c = 1 \text{ min}$ ,  $t_m = 0,5 \text{ s}$  (según Komarov, 1972).

Teniendo en cuenta los resultados de las investigaciones en laboratorios y sobre modelos, en la década actual tuvo lugar la aparición del llamado método de polarización inducida no lineal, entendiéndose por tal al método geofísico que se basa en la utilización de aquellas particularidades del campo eléctrico secundario en la tierra, las cuales están condicionadas por las desviaciones de la dependencia lineal entre la fuerza electromotriz de polarización inducida y la corriente eléctrica de excitación [27].

Diversas variantes de estudio de la polarización inducida no lineal se emplean en el presente con resultados satisfactorios. Así, por ejemplo, Ya. V. Markuchin y otros investigadores han logrado separar con éxito las anomalías producidas por objetos geológicos de diferente naturaleza, utilizando sus respectivas respuestas ante el cambio del sentido de la dirección de la corriente polarizante. Esta variante, conocida como polarización ánodo-catódica, consiste en medir la polarizabilidad aparente en la forma usual que se emplea para el método de PI con el dispositivo de gradiente medio, con la particularidad de que el mismo perfil se recorre en dos ocasiones, primero con un sentido de la corriente donde se obtiene  $\eta_a^{A+B^-}$  y tras un largo intervalo de tiempo, con el otro sentido se obtiene  $\eta_a^{A^-B^+}$ .

La diferencia entre los parámetros,  $\Delta\eta_a = \eta_a^{A+B^-} - \eta_a^{A^-B^+}$ , cuando sobrepasa el nivel del error efectivo medio, se considera como la anomalía en esta variante, lo que atestigua sobre la presencia de mineralización masiva o venosodiseminada de carácter industrial, en tanto que cuando sus valores se encuentran en los límites del error los mismos se corresponden con la mineralización diseminada o con las rocas carbono-grafitizadas [38]. De igual forma se estudia la dependencia del parámetro  $\Delta\eta_a$  con respecto a la intensidad de la corriente en el epicentro de la anomalía, quedando establecido que para los objetos meníferos la magnitud de  $\Delta\eta_a$  disminuye con el crecimiento de la intensidad de la corriente, en tanto que para los objetos grafitizados, aumenta o se mantiene aproximadamente constante.

Otra variante de estudio de la polarización inducida no lineal consiste en la utilización del dispositivo receptor de compensación. Las mediciones de PI no lineal se obtienen colocando, para un sentido de circulación de la

corriente polarizante, los electrodos receptores sobre una línea equipotencial del campo PI, de manera tal que la diferencia de potenciales, entre ellas  $\Delta U_{PI}^{A^+B^-}$ , sea pequeña. Posteriormente se invierte el sentido de la corriente y manteniendo la posición de todos los electrodos, se mide nuevamente la diferencia de potenciales, convirtiéndose en  $\Delta U_{PI}^{A^-B^+}$ . La divergencia entre ambas magnitudes se toma como una medida de la polarización inducida no lineal, lo que atestigua la presencia de mineralización sulfurosa industrial cuando su signo es negativo y de rocas grafitizadas cuando es positivo [27, 57].

En la práctica las mediciones de la polarización inducida no lineal se llevan a cabo después de un levantamiento ordinario de PI y con el objetivo de detallar el estudio y de clasificar las anomalías de polarizabilidad aparente.

#### 4. VARIANTES DE ESTUDIO DE LA POLARIZACION INDUCIDA ATENDIENDO AL TIEMPO DE MEDICION EN LA CURVA DE DESCARGA

Es conocido que en las variantes convencionales de estudio de la polarización inducida aparente, el tiempo de medición se elige por lo general a 0,5 segundo de interrumpido el paso de la corriente; sin embargo, en los últimos años se han venido empleando procedimientos que estudian la curva de caída de PI en tiempos relativamente cortos.

El estudio de la característica de tiempo de la polarización inducida ha ocupado la atención de numerosos investigadores, lo cual ha dado lugar a una posible vía para el ulterior desarrollo del método [3, 18, 21, 23], y fundamentalmente a la diferenciación de la mineralización sulfurosa diseminada y de las rocas carbono-grafitizadas.

Los resultados de los diferentes trabajos de laboratorio y sobre modelos [8, 18, 23] caracterizan la dependencia de la velocidad y forma de la curva de caída de PI respecto a la humedad, la permeabilidad, los tamaños de los granos del medio, la temperatura, el pH, la concentración del electrolito que rellena los poros y del tiempo de carga. Por otra parte, no sólo en las condiciones de laboratorio sino también en el campo, se ha observado una mayor duración de la caída de PI sobre los cuerpos minerales que sobre las rocas de conducción iónica.

#### 4.1. Estado temprano de la polarización inducida

Para la medición de la característica de tiempo en esta variante de la polarización inducida en las condiciones del trabajo de campo, se utilizan los mismos dispositivos de medición que los habituales de la prospección eléctrica de corriente constante y los del método de PI, con la ventaja de poder utilizar como electrodos de medición a cualquier electrodo metálico en lugar de los no polarizables.

Por lo general se emplean dos tipos de dispositivos ALNB, uno para investigaciones de poca profundidad en el que las líneas AB y MN son paralelas, y otro para investigaciones de mayor profundidad en el que las líneas AB y MN son perpendiculares [21]; la posición relativa y el desplazamiento de los electrodos de corriente y de medición en el área de estudio es diversa, atendiendo a los objetivos de la investigación.

En cada punto de observación de esta variante se determinan las siguientes magnitudes: la intensidad de la corriente en la línea de alimentación I, la diferencia de potenciales entre M y N durante el paso de la corriente  $\Delta U_{pc}$ , la diferencia de potenciales pasados 100  $\mu s$  de inte-

rrumpida la corriente  $\Delta U_{PI}$ , y el cambio de potencial  $\Delta U_{PI}$ , en el intervalo de tiempo  $\Delta t$  de 100 a 200  $\mu s$ .

Con las magnitudes anteriores se calculan los tres parámetros que caracterizan el corte geológico:

$$\text{polarizabilidad aparente: } \eta_a = \frac{\Delta U_{PI}}{\Delta U_{pc}} \cdot 100 (\%)$$

$$\text{resistividad aparente: } \rho_a = K \frac{\Delta U_{pc}}{I} \text{ (ohm-m)}$$

$$\text{velocidad de cambio de PI: } S_a = \frac{\Delta U_{PI}}{\Delta t \cdot \Delta U_{PI}} \text{ (ms}^{-1}\text{)}$$

siendo k la constante del dispositivo de medición.

Los resultados de estos parámetros se presentan en forma de gráficos de perfiles y planos de isolíneas. La interpretación de  $S_a$  tiene como base los resultados del estudio de la velocidad de cambio del potencial del estado temprano de PI en muestras de minerales y el análisis de los trabajos experimentales sobre yacimientos conocidos. Así, por ejemplo, las mediciones en muestras de pirita manifiestan un amplio rango en la magnitud de  $S_a$  atendiendo a su actividad electroquímica en función de las condiciones físico-químicas de su formación. Los tipos diagenético-sedimentarios, metamorfo-genos e hidrotermales se caracterizan por un alto valor de  $S_a$ , que varía de 1,0 a 5,0  $ms^{-1}$ , en tanto que la pirita de la etapa tardía en asociación con sulfuros y sulfosales presenta valores más bajos, que oscilan entre 0,2 y 1,0  $ms^{-1}$ , los que son también característicos para la arsenopirita, la galenita, la calcopirita, la pirrotina y otros minerales [21].

Durante los trabajos de campo, muestran particular interés las áreas que se caracterizan por una disminución de  $S_a$ , lo que atestigua el desarrollo de asociaciones minerales económicas, y una elevación de  $\eta_a$ , lo que muestra un aumento del contenido de minerales de conducción electrónica. La complejidad de la interpretación se manifiesta en las áreas con presencia de rocas grafitizadas o carbonosas, las que se caracterizan por valores bajos de  $S_a$  debido a su gran pasividad electroquímica; en tal caso los cuerpos minerales se revelan por un aumento de la magnitud de la velocidad de cambio de PI. La interpretación más racional y completa se lleva a cabo mediante el análisis conjunto de los resultados de  $\eta_a$ ,  $\rho_a$ ,  $S_a$ , lo que a grandes rasgos se resume en la Tabla 4.

TABLA 4.

| $\eta_a$ (%) | $\rho_a$ ( $\Omega$ -m) | $S_a$ (ms) <sup>-1</sup> | Posible causa geológica   |
|--------------|-------------------------|--------------------------|---|
| Elevada      | Baja                    | 0,8-2,0                  | Rocas grafitizadas y carbonosas   |
| Elevada      | Baja                    | 2,5-4,5                  | Cuerpos minerales masivos   |
| Baja         | Elevada                 | 4,5-5,0                  | Mineralización sulfurosa diseminada                                     |
| Baja         | Baja                    | 4,5-5,0                  | Rocas grafitizadas con presencia de mineralización sulfurosa diseminada |

Comportamiento de los parámetros de la variante del estado temprano de PI.

#### 5. VARIANTES DE ESTUDIO DE LA POLARIZACION INDUCIDA ATENDIENDO A LA FORMA DE LA INVESTIGACION

En la Tabla 1 se señalan las distintas formas de investigación de la polarización inducida: superficial, paramétrica, en pozos, en minas y en laboratorios. Todas ellas presentan una numerosa variedad de técnicas de medición, dispositivos y equipos empleados, parámetros medidos,

regímenes de carga utilizados, etcétera. A continuación se ofrece una breve descripción de cada una de estas formas.

### 5.1. Superficial

Esta forma de investigación de la polarización inducida se caracteriza porque todos los electrodos, de alimentación y de medición, se colocan sobre la superficie del terreno, utilizando los mismos dispositivos que el método de resistividad y en las modificaciones de perfilaje y de sondeo.

Diversos son los factores que determinan la elección del dispositivo de electrodos en el método de polarización inducida: características del campo excitante, escala y objetivos de los trabajos de campo, profundidad de estudio, disminución de los efectos de acoplamiento y facilidad en la interpretación [1, 26, 29, 51, 54].

Se encuentra muy difundido el dispositivo de gradiente medio durante los trabajos de búsqueda con la variante de corriente constante debido a su productividad, profundidad de penetración y poder resolutivo. Por otra parte, con la variante de corriente alterna, específicamente con dos frecuencias, es utilizado universalmente el dispositivo dipolar axial, entre otras causas por la magnitud de la respuesta, la penetración y los bajos efectos de acoplamientos inductivos.

En los trabajos de detalle que se realizan en los límites de las áreas anómalas con el objetivo de esclarecer la naturaleza geológica de las anomalías y los parámetros geométricos y físicos de los cuerpos polarizantes, se emplean los dispositivos de tres electrodos en la modificación de perfilaje, y simétrico de cuatro electrodos en el sondeo de PI [29].

### 5.2. Paramétrico

Este tipo de trabajo de polarización inducida, aunque puede incluirse en el punto anterior, lo separamos por su importancia en la interpretación cuantitativa de los resultados de PI, teniendo por tanto características especiales y propias.

Como es conocido, en toda interpretación de cualquier método geofísico existen ambigüedades por cuanto a una distribución de un campo físico le puede corresponder más de una causa geológica. Precisamente la forma paramétrica de investigación de la polarización inducida, que utiliza la modificación del sondeo eléctrico vertical, persigue la reducción de dichas ambigüedades.

Los SEV-PI paramétricos no se diferencian, por su metodología, de los correspondientes de resistividad. Ellos se llevan a cabo con dispositivos simétricos de cuatro electrodos cuyos centros se ubican en las proximidades de una perforación, para la que se conoce la columna litológica así como los registros de carotaje, de resistividad y de polarizabilidad.

La interpretación del SEV-PI paramétrico, teniendo en cuenta los datos litológicos y los registros de la perforación, permite establecer la polarizabilidad verdadera de cada capa, logrando con ello precisar la correspondencia entre la litología y los valores de polarizabilidad, cuestión sumamente importante para la interpretación de los trabajos ulteriores en la zona de estudio.

### 5.3. En pozos

En los últimos años, con el incremento de la búsqueda de cuerpos minerales que yacen a grandes profundidades y la necesidad, por tanto, de aumentar la profundidad de pene-



tración de los métodos geofísicos, ha ido creciendo el empleo de esta forma de investigación de la polarización inducida.

Según la forma de distribución de los electrodos de corriente y de medición, Komarov distingue tres clases de medios de investigación, a saber:

- a) pozo-superficie
- b) superficie-pozo
- c) pozo-pozo

en dependencia de la posición de los electrodos de corriente (primera palabra), y los electrodos de medición (segunda palabra).

Los trabajos de PI en pozos emplean los mismos dispositivos y equipos que los trabajos en superficie, manteniéndose en la misma tanto el bloque generador como el de medición y distinguiéndose sólo por la utilización de los accesorios necesarios para los trabajos en pozos. Por otra parte, en dependencia del medio de la investigación son elegidos los tipos de electrodos y de cables apropiados para la misma.

Por regla general se utilizan dos regímenes de corriente polarizante: cargas largas con impulsos individuales de corriente y cargas periódicas con impulsos de diferente polaridad. El tiempo de carga puede ser de 1 o 2 minutos, en tanto la medición de  $\Delta U_{PI}$  se realiza a 0,5 segundo de interrumpirse la corriente.

La experiencia acumulada en la realización de la variante de PI, en pozos en la Unión Soviética, señala que en los yacimientos de cobre y polimetálicos es posible detectar cuerpos minerales a una distancia de hasta 60 m de los

pozos, así como estudiar el espacio entre pozos distantes entre sí hasta 100 m.

#### 5.4. En minas

Con el objetivo de aumentar las reservas minerales industriales, recientemente se han venido aplicando distintos métodos geofísicos en las minas, con lo que se logra el estudio detallado de aquellas zonas que se encuentran entre los pozos y galerías; el método de polarización inducida no es ajeno a estos avances [3].

La variante "minera" del método de polarización inducida presenta varias ventajas sobre la superficie, fundamentalmente la ausencia de la influencia de la capa conductora suprayacente a los depósitos minerales, aunque sobre ella influyen un número mayor de factores que son fuentes de ruidos.

Desde el punto de vista de la metodología de los trabajos, no hay diferencia alguna con la variante superficial, pues los dispositivos y modificaciones utilizados son los mismos. Pueden ser empleadas instalaciones de 3 o 4 electrodos, ya bien en perfilaje o en sondeo.

Para esta variante las exigencias en cuanto al aislamiento de los cables, bobinas, panel de medición, fuente de corriente, etcétera, son mayores debido a las condiciones de humedad en las que se trabaja.

Juzgando por la experiencia soviética [3], puede afirmarse que es posible descubrir cuerpos minerales ciegos hasta 50 m de distancia de las labores mineras.

#### 5.5. En laboratorios

Pueden distinguirse dos tipos de mediciones de la polarización inducida en los laboratorios. Una de ellas es la



que se ejecuta directamente sobre muestras de rocas o de menas, y la otra, la que se lleva a cabo sobre modelos que semejan en mayor o menor grado las condiciones en la naturaleza.

Existen numerosos trabajos [2, 8, 18, 19, 23, 25, 26, 27, 34, 36, 28, 32, 46, 56, 57, 59, 60], que ponen de manifiesto los esfuerzos de los investigadores para analizar la influencia sobre la polarización inducida de diversos parámetros que caracterizan al medio: composición, grado de mineralización, tamaño de los granos, resistividad, concentración del electrolito, y que no pueden ser variados en el campo libremente, y de otros parámetros tales como las dimensiones, forma, profundidad, posición de los cuerpos minerales, que se reflejan de una u otra manera en el campo de polarización inducida, todo lo cual permite establecer determinadas reglas con vista a la interpretación de los resultados de los trabajos de campo de PI.

Diversas son las instalaciones y los dispositivos que se emplean para los trabajos de laboratorio en dependencia de los estudios que hay que realizar, y los objetivos que se persiguen. Así, por ejemplo, para las mediciones sobre muestras, Komarov cita algunos tipos de instalaciones que permiten estudiar la polarización inducida de conductores electrónicos, rocas de conducción iónica y de rocas con mineralización diseminada.

Por otra parte, las mediciones sobre modelos utilizan tanques rellenos con material prácticamente no polarizable o papel electroconductor, simulando las condiciones que tienen lugar en la naturaleza.

En general pueden extraerse algunas conclusiones generales de los trabajos de laboratorio:

- la polarización inducida aumenta con el porcentaje de componentes metálicos en la roca;
- la polarización inducida aumenta con la resistividad de la roca encajante;
- la polarización inducida aumenta en la medida en que el tamaño de las partículas metálicas disminuye;
- la polarización inducida disminuye cuando la concentración del electrolito crece, en muestras porosas con polarización de membrana;
- para una instalación de gradiente, el máximo de la anomalía de polarizabilidad aparente y el centro de un cuerpo de forma esférica se encuentran aproximadamente a la misma distancia de la fuente de corriente polarizante;
- los cuerpos de menas conductoras y masivas, rodeados de aureolas de mineralización diseminada, crean anomalías de PI, como regla, superiores a las creadas por cuerpos de menas diseminadas de similares dimensiones;
- la intensidad y forma de las anomalías de PI dependen de la forma del cuerpo, su conductividad eléctrica y su orientación.

## CONCLUSIONES

A pesar de la corta existencia del método de polarización inducida, el mismo presenta una extraordinaria diversidad de variantes que permiten optar, de acuerdo con los fines, intereses y recursos de la investigación, por aquella que óptima y racionalmente resuelva la tarea planteada.

Uno de los problemas contemporáneos del método de polarización inducida consiste en separar las anomalías producidas por mineralización de carácter industrial de las originadas por mineralización disseminada o por esquistos grafiticos. De esta forma los investigadores se han planteado múltiples variantes buscando la posible solución sin lograr hasta el momento un resultado totalmente exitoso.

La utilización en nuestro país de prácticamente una sola variante, la correspondiente a fuente de corriente constante, limita extraordinariamente las posibilidades de este método así como incrementa los costos de la investigación. Sin lugar a dudas los organismos de la producción y los centros dedicados a la investigación geológica tendrán que evaluar las variantes que habrán de utilizar en un futuro próximo, dando así respuesta a las tareas planteadas entre ellos.

## REFERENCIAS

1. ALEKSIEV, A. A. y A. F. KONDRATENKO: Primenenie pulsi-ruiushij tokov pri elektrorazvedochnij rabotaj metodom vizvannoi poliarizatsii (V.P.). Venedrenie novoi metodiki i tejniki elektrorazvedochnij rabot y geologorazvedochnuju sluchbu. Dokladi k seminaru po tematiceskoi vistavke. Moscú, 1964.

2. AIKEN, C. L., D. A. HASTINGS, and J. R. STURGUL: "Physical and Computer Modeling of Induced Polarization". *Geophysical Prospecting*, vol. 21, no. 4, 1973.
3. BALADIAN, C. V.: "Rudichni variant metoda vizvannoi poliarizatsii". *Metodika i tejnika razvedki*, no. 59, 1967.
4. BESPALOVA, N. C.: "O vliianii plotnosti pitaiushevo toka nakoefitsient poliarizuemosti pri polevij issledovaniaj metodom vizvannoi poliarizatsii". *Vestnik Moskovskov universiteta*, no. 6, 1967.
5. BRANT, A. A.: Newmont Exploration Staff. "Examples of Induced Polarization Field Results in the Time Domain". *Mining Geophysics*, vol. 1, Seg, 1966.
6. BORISOV, N. A. y G. YA. SHALDUROV: "Ob ispolzovanii estetvennij elektromagnitnij poliei dlia videlenia potentsialov vizvannoi poliarizatsii". *Metodika i tejnika razvedki*, no. 81, 1972.
7. COGGON, J. H.: "A Comparison of IP Electrode Arrays". *Geophysics*, vol. 38, no. 4, 1973.
8. COLLET, L. S.: Laboratory Investigation of Overvoltage. Overvoltage Research and Geophysical Applications. Pergamon Press, 1959.
9. GUENNADINIK, B. I., V. P., MELNIKOV, y G. V. GUENNADINIK: Teoria vizvannoi elektrojimicheskoi aktivnos-gornij porod. Yakutsk. kn. izd-vo, 1976, 159 pp.
10. HALLOF, P. G.: "A Comparison of Variable Frequency IP Results with Turam Electromagnetic Conductors". *Mining-Geophysics*, vol. 1, Seg, 1966.
11. HALLOF, P. G.: An Appraisal of the Variable Frequency IP Method after 12 Years of Application. Symposium on Induced Polarization. University of California, February, 1967.
12. HALLOF, P. G.: The Use of Induced Polarization Measurements to Locate Massive Sulphide Mineralization in Environments in which EM Methods Fail. *Mining and Groundwater Geophysics*, Ed. Revolucionaria, La Habana, 1967.

13. HALLOF, P. G.: The Use of the Variable Frequency IP Method to Locate Massive and Disseminated Mineralization at Depth. Prepared for presentation at the International Geological Congress Prague, Czechoslovakia, August 1968.
14. HEINRICH, W. E. JR. and C. S. LUDWIG: "Results of an Induced Polarization Survey Employing Both Time and Frequency Domain Techniques". Mining Geophysics, vol. 1, Seg, 1966.
15. HOHMANN, G. H., P. R., KINTZINGER, G. D. VAN VOCHIS, and S. H. WARD: "Evaluation of the Measurements of Induced Electrical Polarization With and Inductive System". Geophysics, vol. 35, no. 5, 1970.
16. ISAEV, L. T., R. V. ULITIN: "Primenenie metoda vizvannoi poliarizatsiina peremennom toke pri poiskaj i razvedke rudnij mestorochnii". Metodika i tejnika razvedki, no. 95, 1975.
17. IOFFE, L. M.: "Ob impulsnij sposobaj izmerenij y metode vizvannoi poliarizatsii". Metodika i tejnika razvedki, no. 49, 1965.
18. JASABALLA, R. C., B., YAKUBOVSKI, A. V. MAKAROV, V. P. MELNIKOV: "Osobennosti vizvannoi poliarizatsii sulfidnij mineralov na rannij vremenaj". Geologija i razvedka, no. 11, 1973.
19. JLOPONINA, L. C.: "Nekotorie osobennosti elektricheskij poliei, sviazannij s nelineinoy poliarizatsiei elektronoprovodiaschij mineralov". Metodika i tejnika razvedki, no. 81, 1972.
20. KANEEV, A. T., V. M. PUZANOV: Opit izmerenij poliei vizvannoi poliarizatsii sposobom raznopoljarnij impulsov. B cv.: Primenenie metoda vizvannoi poliarizatsii pri poiskaj rudnij mestorochnii. M. Nedra, 1964.
21. KARACEV, A. P., R. C. CEIFULLIN, O. V., BULAGUIN, V. I. KRASNIKOV: Primenenie vremennij jarakteristik rannei ctadii vizvannoi poliarizatsii pri poiskaj sulfidnij mestorochnii. M. Nedra, 1973, 128 pp.
22. KOMAROV, V. A.: Metod vizvannoi poliarizatsii - sredstvo poiskov rudnij mestopochdenij. V sv.: Primenenie metoda vizvannoi poliarizatsii pri poiskaj rudnij mestopochdenij. M. Nedra, 1964.
23. KOMAROV, V. A.: "Vremennije jarakteristiki vizvannoi poliarizatsii". Metodika i tejnika razvedki, no. 49, 1965.
24. KOMAROV, V. A.: "O sviazi vizvannoi poliarizatsii, sozdavaemoj postoiannoju i peremennim tokom". Metodika i tejnika razvedki, no. 59, 1967.
25. KOMAROV, V. A.: "Vremennije i chastotnie parametri vizvannoi poliarizatsii. Metodika i tejnika razvedki, no. 81, 1972.
26. KOMAROV, V. A.: Elektrozrazvedka metodom vizvannoi poliarizatsii. L. Nedra, 1972, 340 pp.
27. KOMAROV, V. A., L. M., IOFFE, A. A. SMIRNOV: "Printsipy metoda nelineinoy vizvannoi poliarizatsii". Metodika razvedki, no. 81, 1972.
28. KOMAROV, V. A., N. A. PICHAREVA: "Eksperimentalnie dannic o vizvannoi poliarizatsii elektronnij provodnikov". Metodika i tejnika razvedki, no. 49, 1965.
29. KOMAROV, V. A., N. A. PICHAREVA, M. V., CELENOV y L. C. JLOPONINA: Teoreticheskie osnovi interpretatsii nabliudenij y metode vizvannoi poliarizatsii. L. Nedra, 1966, 204 pp.
30. KONDRATENKO, A. F.: "Primenenie pulsiruiuschij tokov dlja kompleksnij elektrozrazvedochnij issledovanij metodami vizvannoi poliarizatsii, stanovlenija polia i soprotivlenija". Geofizicheskaja razvedka, vip. 9, 1962.
31. KULIKOV, A. V., E. A. SCHEMIKIN: "Fazovije izmerenija V. P. narudnij mestorochnij vostochnovo Kazajstana". Razvedka i ojrana nedr, no. 10, 1969.
32. KELLER, G. V.: Analysis of Some Electrical Transient Measurements Onizneus, Sedimentary and Metamorphic Rocks. Overvoltage Research and Geophysical Applications, Pergamon Press, 1959.
33. KELLER, G. V., F. C. FRISCHKNECHT: Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Ed. Revolucionaria, La Habana, 1966.
34. LIAJOV, L. L., V. P. MELNIKOV: "O vozmochnosti ispolzovania fazovochastotnij jarakteristik V. P. dlja klassifikatsii anomalij polarizuemosti". Geologija u Razvedka, no. 7, 1968.

35. MADDEN, T. R., T. CANTWELL: "Induced Polarization, a Review. Mining Geophysics, vol. 2, Seg, 1967.
36. MALMQUIST, L.: "Some Applications of IP Technique for Different Geophysical Prospecting Purposes". Geophysical Prospecting, vol. 26, no. 1, 1978.
37. MARKUCHIN, YA. V., V. D., BORTSOV, I. C. CHUPRIN: "Sravnitelnie osobennosti vizvannoi poliarizatsii nekotorykh rudnykh i porodno obra zuiuschiy mineralov". Fizika Zemli, no. 2, 1973.
38. MARKUCHIN, YA. V., I. C. CHUPRIN, O. A. EVSTIGNEEV: "Razdelenie elektricheskikh anomalii metodom anodno-katodnoi poliarizatsii". Razvedka i ojrana neдр, no. 2, 1972.
39. MARKUCHIN, YA. V., I. C. CHUPRIN, O. A. EVSTIGNEEV: "Kompleksnaia metodika razdelenia geofizicheskikh anomalii pri poiskakh rudnykh mestorochnenii". Razvedka i ojrana neдр, no. 5, 1974.
40. MARSHALL, D. J. and T. R. MADDEN: "Induced Polarization, a Study of its Causes". Geophysics, vol. 24, no. 4, 1959.
41. MELNIKOV, V. P.: "O fazovo chastotnoi zavisimosti vizvannoi poliarizatsii gorniy porod i rud". Gueologua i Razvedka, no. 11, 1967.
42. MELNIKOV, V. P.: "Opit izmerenia vizvannoi poliarizatsii y garmonicheskikh poliaj". Razvedochnaia Gueofizika, vip. 24. 1967.
43. MELNIKOV, V. P., B. I. GUENNADINIK, L. Z. BOBROVNIKOV, V. A. POPOV, YU. V. ALADINSKII: Osnovi amplitudno-fazoviy izmereniy vizvannoi poliarizatsii. Yakutsk, Kn, izd-vo. 1974, 222 pp.
44. PANTELEIMONOV, V. M., V. A., BLINOV, M. A. GUERFAS: "Primenenie metoda KSPK dlia uviazki rudnykh perecheniy y gorniy virabotkaj na mestorochnenii Jandiza". Metodika i tejnika razvedki, no. 76, 1971.
45. PAVLOV, V. B.: "Issledovanie vremenniy i nelineinyykh parametrov vizvannoi poliarizatsii pri otsenke geofizicheskikh anomalii". Metodika i tejnika razvedki, no. 95, 1975.
46. PELTON, W. H., S. H. WARD, P. G., HALLOF, W. R. SILL, P. H. NELSON: "Mineral Discrimination and Removal of Inductive Coupling with Multifrequency IP". Geophysics, vol. 43, no. 3, 1978.
47. PONOSOV, V. A.: "Zaviscimosti kachestvenna poliarizuemosti ot velichiny otnochniya vremeni zariadki k vremeni izmereniy". Gueofizicheskie iziskania. Uch. zap. Permskovo universiteta, no. 359, vin. 2, 1976.
48. POPOV, V. A., L. Z., BOBROVNIKOV, A. P. ERICHEV, YU. B. ALADINSKII: "Fazovye izmereniy vizvannoi poliarizatsii y slochniy gueologicheskix uslovij BSSR". Gueologua u razvedka, no. 3, 1970.
49. RISS, YU. G.: "Otsenka velichiny poverjnosti i lineinyykh raznerov rudnykh tel metodom KSPK". Metodika i tejnika razvedki, no. 76, 1971.
50. RODIONOV, P. F., R. V., ULITIN, A. I. CHELOVECHKOV: "Primenenie metoda V. P. na peremennom toke pri poiskakh rudnykh mestorochnenii". Razvedka i ojrana neдр, no. 4, 1971.
51. ROY, A., S. C. JAIN: "Comparative Field Performance of Electrode Arrays in Time - Domain Induced Polarization Profiling". Geophysical Prospecting, vol. 21, no. 4, 1973.
52. SCHAUB, YU. B.: "Ob ispolzovanii affektov nelineinoy elektroprovodnosti pri obnaruchenii vkraplenniykh sulfidnykh rud". Fizika Zemli, no. 1, 1969.
53. SEIGEL, H. O.: "Mathematical Formulation and Type Curves for Induced Polarization". Geophysics, vol. 24, no. 3, 1959.
54. SEIGEL, H. O.: The Induced Polarization Method. Mining and Groundwater Geophysics, Ed. Revolucionaria, La Habana, 1967.
55. SEIGEL, H. O.: "The Magnetic Induced Polarization (MIP) Method". Geophysics, vol. 39, no. 3, 1974.
56. SMIRNOV, A. A.: "Eksperimentalnye issledovaniya faradeevskovo vipramleniya peremennogo toka elektronoprovodiaschimi". Metodika i tejnika razvedki, no. 81, 1972.



57. SMIRNOV, A. A.: "Laboratornie issledovania polia nelineinnoi vizvannoi poliarizatsii elektronoprovodiaschij mineralov". Metodika i tejnika razvedki, no. 81, 1972.
58. SUMMER, J. S.: Geophysical Aspects of Porphyry Copper Deposits. Mining and Groundwater Geophysics, Ed. Revolucionaria, La Habana, 1967.
59. SWIFT, C. M. Jr.: "The L/M Parameter of Time Domain IP Measurements". A computational analysis. Geophysics, vol. 38, no. 1, 1973.
60. WAIT, J. R.: Criteria from the Transient Decay Curves. Overvoltage Research and Geophysical Applications, Pergamon Press, 1959.
61. WAIT, J. R.: The Variable-Frequency Method. Overvoltage Research and Geophysical Applications, Pergamon Press, 1959.
62. WAIT, J. R. (editor): Overvoltage Research and Geophysical Applications, Pergamon Press, 1959.
63. ZONGE, K. L., W. A., SAUCK, and J. S. SUMMER: "Comparison of Time, Frequency and Phase Measurements in Induced Polarization. Geophysical Prospecting, vol. 20, no. 3, 1972.

CDU: 551.2/551.3 (729.1)

## POSICION DE CUBA ORIENTAL EN LA GEOLOGIA DEL CARIBE

El territorio comprendido entre la denominada falla Cauto y la falla Oriente reviste singular importancia para la geología del Caribe, por lo que varios geólogos y geofísicos han supuesto que este es un bloque cortical incorporado al resto de Cuba durante la era Cenozoica.

Los autores realizan un estudio de los principales rasgos geológicos existentes a ambos lados de las fallas Cauto y Oriente, concluyendo que los argumentos planteados al respecto no son acertados, por cuanto no existen evidencias geológicas de que las estructuras geológicas cubanas se originaran a partir del choque de la corteza oceánica del Pacífico con la plataforma de Bahamas.