

列宁格勒大学学报

№ 249

地质系和物理系
地质学和物理学部分
第 10 期

地球物理问题

A. П. 克拉耶夫等著
张昌达 董国柱等译

中国工业出版社

中国科学院图书馆藏

地质研究所
地质研究所
地质研究所
地质研究所

地球物理问题

中国科学院图书馆藏
地质研究所

中国科学院图书馆藏

列宁格勒大学学报

№ 249

地质系和物理系

地质学和物理学部分

第 10 期

地球物理问题

A.Π. 克拉耶夫等著

张昌达 董国柱等译

中国工业出版社

本书收集的論文內容涉及各种物探方法。在电法勘探方面，研究了均匀和非均匀介质中直流电场、交流电场和自然电场的测量结果；在磁法勘探和重力勘探方面，论述了负磁异常的性质，列举出按磁场区分火成岩的实例，讨论了观测资料的整理方法和解释；有一篇文章专门谈到地震波的衰减；最后一篇文章叙述了水化学探矿法的应用成果。

本书由张昌达、许炳如、董国柱、未云祥、高莉青等同志译出，最后经周镛庭同志校阅。

УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ
ЛЕНИНГРАДСКОГО ОРДЕНА ЛЕНИНА ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА имени А. А. ЖДАНОВА
№ 249
(Геологический и Физический Факультеты)
СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК
Выпуск 10
ВОПРОСЫ ГЕОФИЗИКИ
ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛЕНИНГРАДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА 1958

* * *
地 球 物 理 问 题

张昌达 董国柱等译

*
地质部地质书刊编辑部编辑 (北京西四羊市大街地质部院内)

中国工业出版社出版 (北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*
开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $9^{7/16}$ ·插页1·字数244,000

1963年10月北京第一版·1963年10月北京第一次印刷

印数0001—1,330·定价(10-7)1.60元

*
统一书号：15165·2579(地质-253)

目 录

河流偶极测深的应用經驗.....	A. П. 克拉耶夫(1)
諧变低頻垂直磁偶极子的正常場.....	Л. Б. 加薩年柯(10)
水平层状构造上垂直諧变磁偶极子电磁場	
各要素間的关系問題.....	Л. Б. 加薩年柯(34)
水平层状构造上部水平磁偶极子的电磁場	
.....	Л. Б. 加薩年柯 Г. В. 莫洛契諾夫(43)
非均匀介质中电磁場的实验研究.....	Г. В. 莫洛契諾夫(62)
电法勘探中測量低頻交变电場的仪器...	Ю. И. 布尔加科夫(71)
垂直磁偶极子电磁場中的导体.....	
.....	Г. В. 莫洛契諾夫 В. Т. 巴洛巴耶夫(80)
各向异性半空間中点电源的場.....	
.....	A. C. 謝苗諾夫 A. B. 維謝夫 A. Ф. 佛金(90)
联合剖面法与平移电极剖面法的比較.....	Я. Н. 格隆托拉德(115)
均匀介质和非均匀介质中极化导体的电場	
.....	Я. Н. 格隆托拉德(135)
自然电場法中的表土影响.....	Г. А. 塔拉索夫(158)
岩石的負磁性.....	В. В. 梅塔洛娃(170)
安加拉依利姆地区矿石的磁化性质和負磁	
异常的成因.....	A. A. 斯梅洛夫(196)
东外貝加尔地区的构造地质分析資料和	
航空磁測結果对比的經驗.....	Н. Ф. 辛卡列夫(231)
用磁势的高阶导数来确定磁化体产状要素的	
量板.....	Л. П. 若戈列夫(237)
关于供重力勘探用的努米罗夫公式的应用	
問題.....	O. M. 拉斯波波夫(243)
估計到异常垂直梯度的重力值的校正方法	
.....	O. M. 拉斯波波夫(248)
地震波衰减現象的应用經驗.....	Н. В. 山金(263)
矿物的电极电位及其在硫化矿石溶解中的	
作用.....	Г. Б. 斯維什尼科夫(280)

河流偶极测深的应用經驗*

A. П. 克拉耶夫

由Л. М. 阿尔平首次提出并应用的偶极测深法〔1〕, 具有一定的特点, 它与广泛应用的对称装置测深法有本质的区别。通过以前的工作〔4、5〕, 我們获得了应用此法来研究深部的經驗。本文是对1947年在沃耳霍夫河上, 在我們领导下进行的工作方法和結果作一簡短叙述。除作者外, 参加野外工作的还有 С. Я. 列奥根基、Г. М. 麦拉穆德、Н. Е. 伏尔夫松和Т. Д. 格拉德基。

資料的室內整理和解释是由作者和 А. С. 謝苗諾夫共同完成的。

* * *

偶极测深象通常的测深一样, 观测結果得到的是有效电阻率与电极距的关系曲綫。有效电阻率 $\bar{\rho}_d$ 的数值可按下面大家都熟悉的公式求出:

$$\bar{\rho}_d = k_d \frac{\Delta u}{i} \quad (1)$$

式中 Δu 和 i ——接收和供电綫路中测出的电位差和电流强度;
 k_d ——按下面已知公式計算出的系数;

$$k_d = \frac{2\pi}{\frac{1}{AN} - \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}, \quad (2)$$

AM, AN, BM, BN ——相应电极間的距离 (图 1)。

在供电和接收綫路相互排列的特殊情况下, (2) 式可相应簡化〔2〕。

* 这篇文章是 А. П. 克拉耶夫在 1949 年写成的, 虽然現在离他写作的时间已經很久, 但在方法上或地质意义上, 仍有它的价值, 这是本文在論文集中发表的理由 (原編者注)。

在偶极测深中，装置（电极距）的大小是用供电电极和接收电极中心之间的距离来表示的。用偶极和对称装置测出的有效电阻率之间具有一定的关系〔2〕。就解释我们得到的曲线而言，下列情况具有重要的意义，即测深曲线末端的渐近线与对数量板轴的方向成 45° 。渐近线上的 $\bar{\rho}_d$ 值具有如下的比例关系：

$$\bar{\rho}_d = \frac{\bar{\rho}}{2} \quad (3)$$

式中 $\bar{\rho}$ ——相应于半电极距为 $\frac{AB}{2}$ 的对称装置的有效电阻率，

半电极距与电阻率为 $\bar{\rho}_d$ 的偶极装置的电极距 ($00'$) 相等。由 (3) 式可知，偶极测深曲线的渐近线较通常测深 B33 曲线的渐近线沿电极距轴向下移动 $\frac{AB}{2}$ 。偶极测深得出的纵向电导 S 的值相应地

比通常测深的大一倍。上述规律将在下面解释河流偶极测深的观测曲线时应用。河流偶极测深是以不动的接收电极和移动的供电装置进行观测的。200个容量为240安培小时与放电电流为120安培的酸性蓄电池用作电源。供电线用截面积为700平方毫米的海洋铜电缆。测量仪器使用ЭП-1电位计。接收线用PCM导线。

每进行一次测深，在岸上布置长各为100、300与1000米的几条接收线，在水中用铜销钉接地。就在这里布置电位计和无綫电台。在船上装着供电装置，即蓄电池组和一段长500米的电缆，利用长的裸铜线接地（图1）。电缆上每隔50米挂一浮标。拖着电缆的船从接收装置出发逆流向上移动，经过一定的间距停住。在每次船只停泊的时间内，用无綫电和接收站联系然后进行观测。第一次观测在船离接收极中心500米处进行。在接通短的接收回路后，根据操作员的信号使供电线路逐一闭合，此时观测接收线路的电位差和供电线路的电流强度。然后船移动到下一点再观测。距供电装置远时，短的接收回路用较长的回路代替。

在以后的工作中，偶极测深以在岸上用最小的电极距开始工作为宜，而浮动的供电装置则使用不同长度的电缆供电。

供电电极和接收电极间的距离按航运图测量或沿河岸直接测量（电极距在1000米以内时）。在电极距相当大时，则可根据音的传播速度测定距离。为此，必须设计出一种时间指示图，用它定出信号通过无线电和经过空气到达的时间。

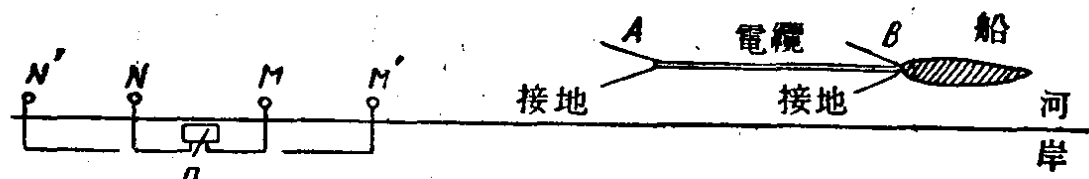


图 1 河流偶极测深装置略图

在我们的工作中，供电装置的方向是按照河岸线确定的，并保证其精度达 $5-10^\circ$ 。下一步工作应该是注意正确确定供电线的长度（因电缆可能下垂）并保持不变。否则在不利的条件下，由于上述原因，在有效电阻率数值的测量中，可能会产生相当大的误差。工作是沿整个沃耳霍夫河进行的，开始于拉多加湖，终于伊尔明湖（图2）。

总共作了电极距 OO' 达4—7公里的偶极测深12点。除了最后一个点以外，每一点还附带作了电极距达640米的普通测深，它是从接收电极的中心开始的。图3中举出了最初两点的测深曲线（偶极测深曲线用虚线表示，而普通测深曲线用实线表示）。

普通测深曲线反映了古生代剖面上部层位的特性，它们在这里是奥陶纪^①和泥盆纪地层。偶极测深的曲线下支受前寒武纪结晶岩石的影响。因为在所有偶极测深曲线上，曲线的下支都或多或少地受到前寒武岩石的影响，因此根据这点测定剖面的平均纵向电导 S （ S 值从横坐标等于0.5处截取，而不是普通测深时的1——参看（3）式）是可能的。

为了利用 S 值来估计结晶岩的深度，研究了古生代岩石电阻率依其埋藏深度而变化的规律。为此，利用了分布在离测深剖面不同远近的五个深井区内（卡尔多希、楚多沃、包尔霍夫、旧

① 在图2上根据过去的地层划分，表示为下志留纪的。

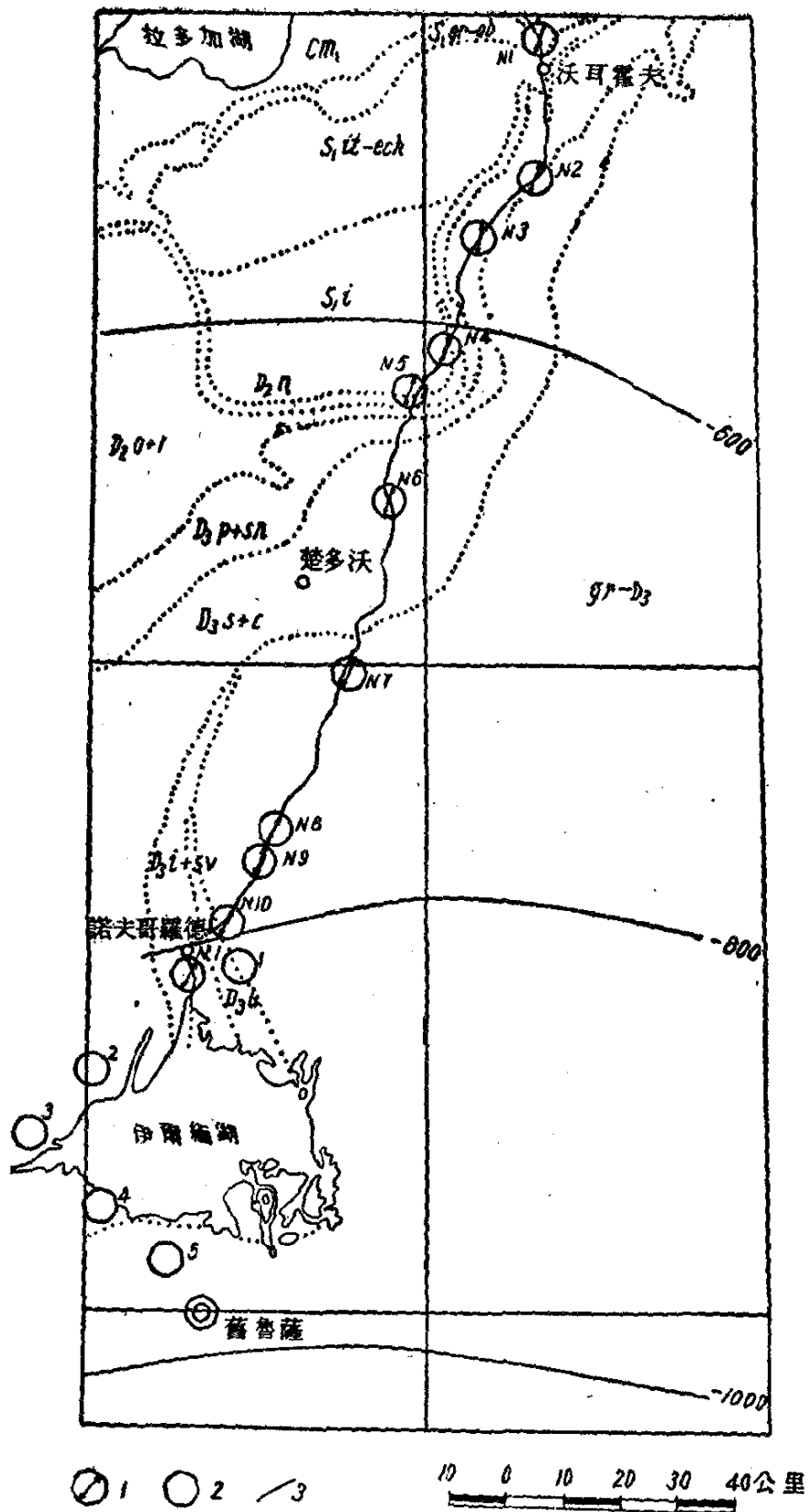


图 2 B33测点分布图

1—偶极测深，2—普通测深，
3—结晶岩石的地形等高线（按照旧有的资料）

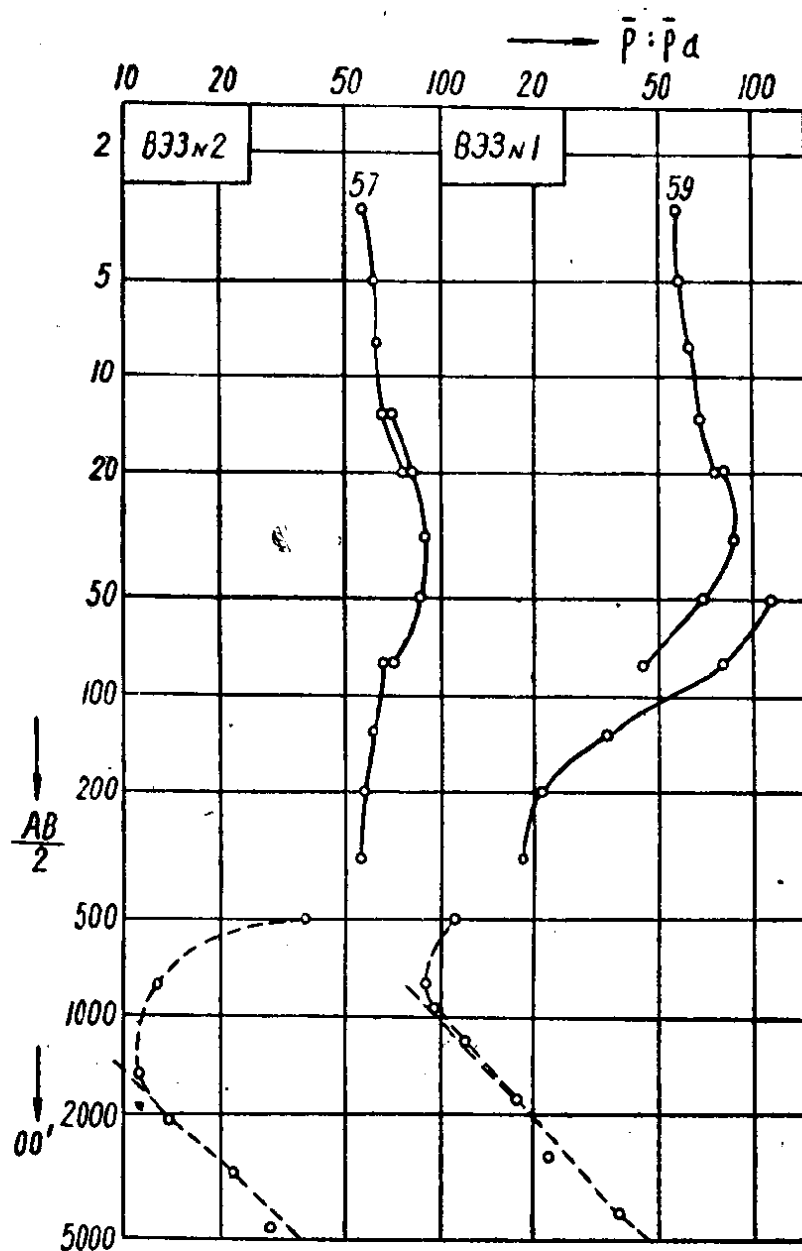


图 3 有代表性的B93曲线

魯薩、瓦尔代) 的测井曲线和测深曲线图。根据测井曲线可以确定某些一般的规律和电阻率的数量级。首先，寒武纪、奥陶纪和部分泥盆纪岩石的埋藏深度增大时，其电阻率显出减小的趋势。寒武纪岩石的电阻率在20到2欧姆米的范围内变动，奥陶纪岩石是从200—500变到10—12欧姆米或更小。泥盆纪地层的电阻率的变化范围很大，但随深度的增大，趋向于减小。

根据井旁测深曲线图，并考虑到测井的资料，得出寒武纪岩石电阻率与它的埋藏深度的概略关系（图4）。电阻率随深度的

减小，与温度的增加仅有部分关系，但基本上是决定于水的矿化变化，也可能与岩石的水饱和度随深度的变化有关。根据计算的结果，温度的影响不超过30%（计算时采用在瓦尔代探井内观测到的资料，在深度1100米时温度为+19°C）。

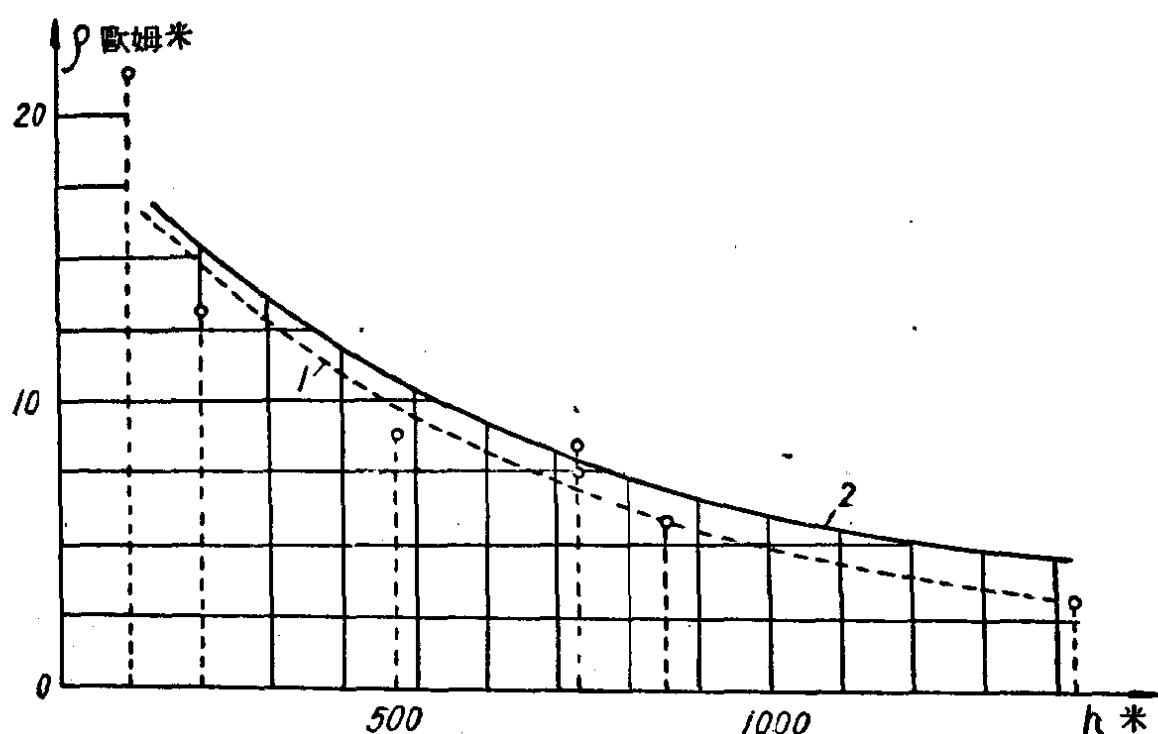


图 4 寒武纪岩石电阻率与它的埋藏深度关系曲线

1—根据实际数据平均的曲线；2—换算到恒定温度的曲线

志留纪岩石的电阻率随深度的变化更为强烈。此外，还观测到奥陶纪和泥盆纪岩石的电阻率有着局部性的剧烈变化，这点可以由偶极测深剖面南部所作的普通测深曲线图上看到。

研究了井旁测深曲线图之后，可以确定出：在某些情况下奥陶纪和下泥盆纪岩石与寒武系合并为一个导电层，在另一些情况下它们却与寒武系截然不同，表现为高电阻层。这样就给曲线的解释造成了困难，即使我们所确定出的寒武纪电阻率变化的规律与实际情况十分接近，困难同样存在。考虑每个单独层位的电阻率是不可能的，因此我们只能在应用沉积层平均纵向电导的基础上作出粗略近似的解释。根据井旁测深曲线图和测井资料，我们作出这个参数与前寒武纪岩石的深度间的关系曲线（图5）。

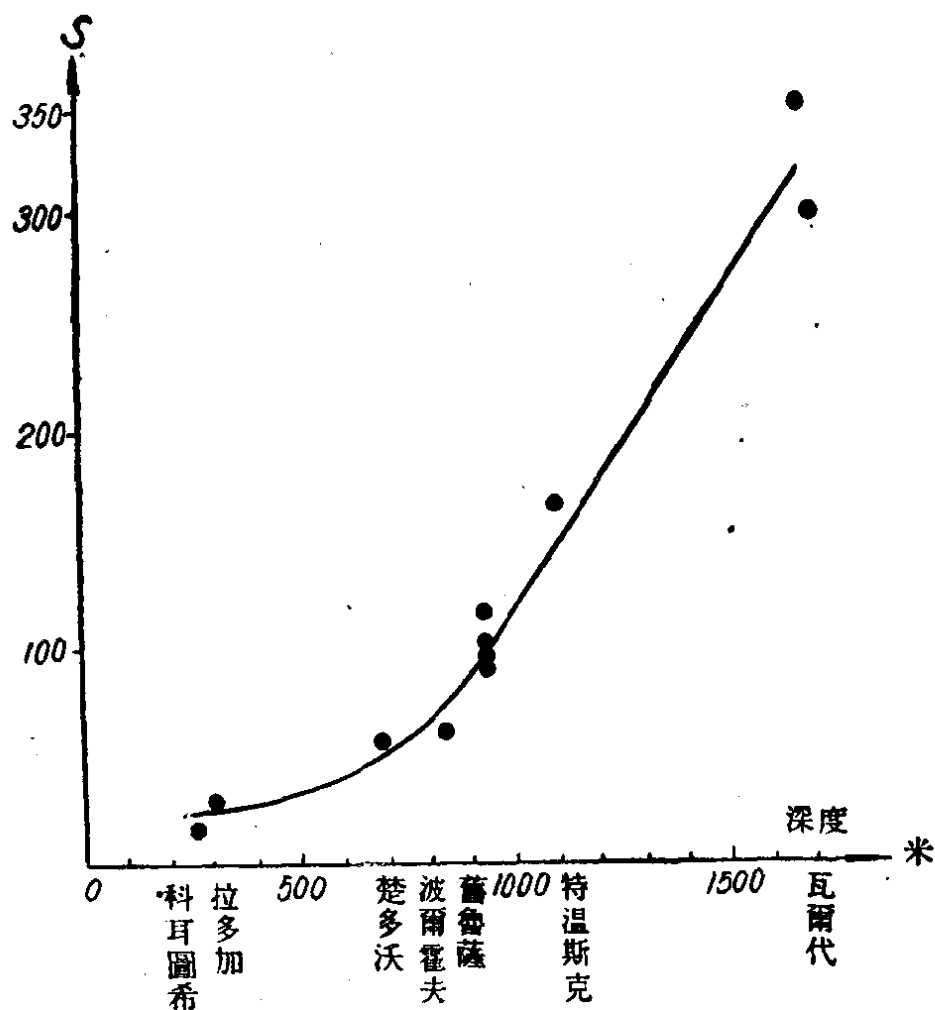


图 5 古生代沉积岩层的縱向电导 S 与
結晶岩的深度关系曲綫

根据測深剖面确定了結晶基底的深度，工作中以图 5 的曲綫作为标准。整理的結果和曲綫的解釋見图 6，它是一张 S 曲綫（在上面）和結晶基底深度的剖面图。

剖面的南部是根据謝苗諾夫领导下所作的普通 B33 曲綫图繪制而成的，它已与旧魯薩的深井相連測。

虽然測深点不多，解釋很粗略，基本資料是利用新的、尚不够完善的方法得出的，但是所得到的結果还是具有一定地质意义的。

、首先，在 5 号与 6 号測点間发现了幅度約 300 米的前寒武紀台阶式的傾伏。在剖面地区內，前寒武紀的等高綫不是象以前推想的呈东西綫方向，而是接近于南北方向。結晶基底的这种情况

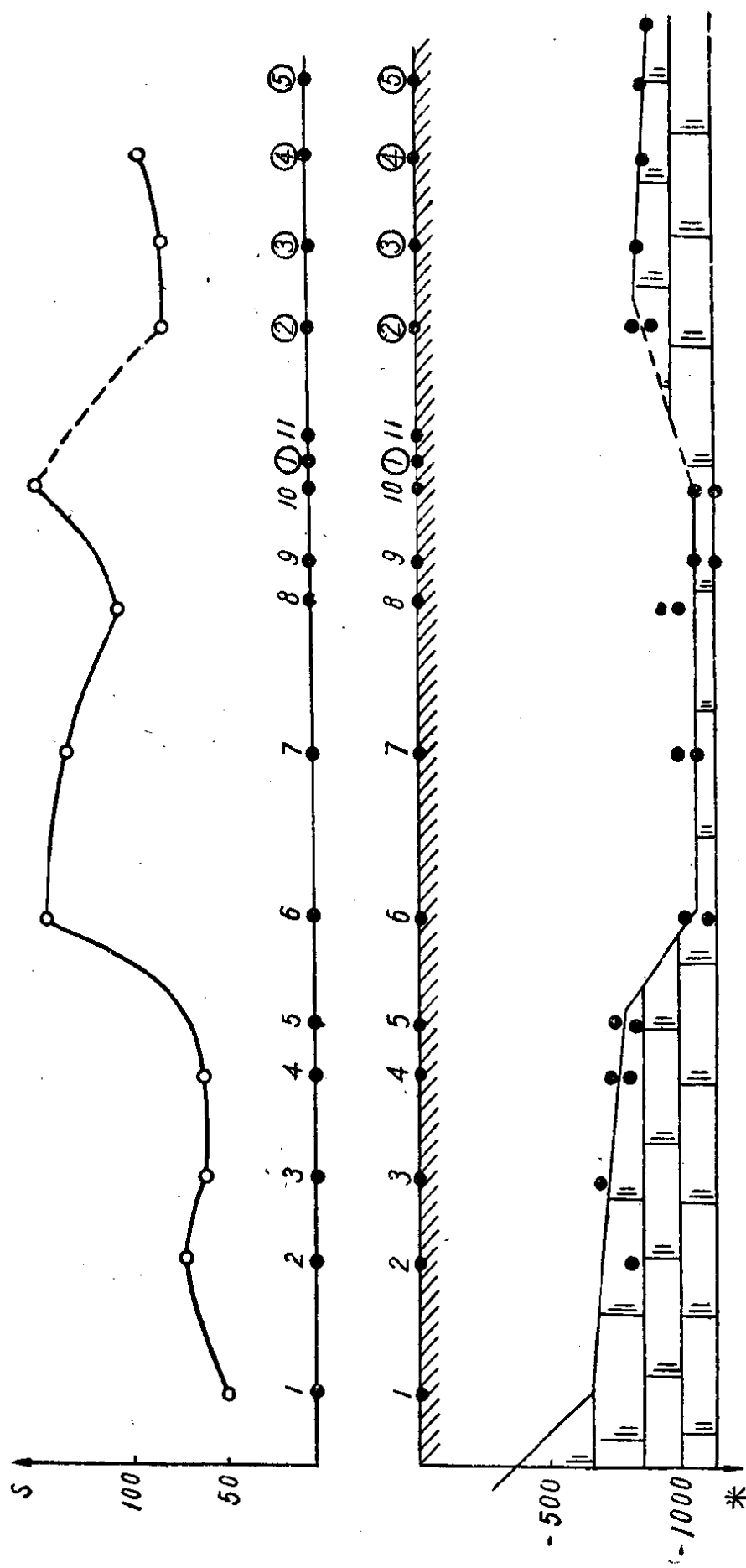


图 6 沿新拉多加——旧鲁萨綫的 S 曲綫和結晶基底地形剖面
(对称电测深的测点用圈內的数字表示)

与地质图上奥陶紀和泥盆紀岩石分布界綫的形状〔3〕很相符合。由后两种岩石的界綫可以推測結晶基底內断层的位置。

上泥盆紀岩石反映了已經确定的断层，根据这个情况，可以認為断层运动发生在泥盆紀以后的时期。

值得注意的是，所发现的断层綫平行于磁异常，并与反映前寒武紀成分和构造的重力場符合。因此說，在已經确定的断层和前寒武紀主要构造綫方向之間有着一定的联系。在所获得的地质結果的基础上，使我們能够提出在俄罗斯陆台，特别是在所工作的地区，为了构造地质研究而如何开展物探工作的問題。

前述例子指出了广泛应用偶极測深法并利用水系来研究构造的可能性。此类工作在难于通行的地区有着重大的意义〔6〕。我們以前进行的超測深工作，使我們有可能提出研究結晶基底和整个地壳深层的方法。

为了推广应用这一方法，必須进一步改进和完善观测技术和方法的理論。特别是对偶极測深而言，必須改进測定距离的方法，并制出高精度的示波仪与功率大的发电站。还必须把普通測深用的量板换算成偶极測深的量板，并完成水平不均匀影响的各种計算。

参 考 文 献

1. Л. М. Альпин. Дипольное электрическое зондирование. Разв. недр № 1, 1938.
2. Л. М. Альпин. Теория дипольных зондирований. Гостоптехиздат, 1950.
3. Б. П. Асаткин, В. А. Котлуков. Геологическая карта СССР масштаба 1:1 000 000, лист 0—36. Госгеолиздат, 1941.
4. А. П. Краев, В. Н. Зацепин, Н. Б. Яновская. Сверхглубокое зондирование в морских условиях. Вестник ЛГУ, 1947.
5. А. П. Краев, А. С. Семенов, А. Г. Тархов. Сверхглубокое электрозондирование. Разв. недр. № 3, 1947.
6. А. Г. Тархов. Опыт применения геофизических методов к разведке геологических структур Европейского севера СССР. Материалы ВСЕГЕИ, геофизика сб. II. Госгеолиздат, 1947.

許炳如譯

諧变低頻垂直磁偶极子的正常場

П.Б. 加薩年柯

一、緒 言

对交流电法勘探而言，在均匀岩体表面的場——正常場是有很大的意义的。由水平电偶极子和无限长直綫电綫所产生的正常場已經很詳細地研究过了[1,4,5,6]。

表示垂直和水平磁偶极子的正常場分量的公式在 1931 年早已得出[2]，但是仅部分地进行了数量方面的研究，针对几种不同距离（参数 p ），計算了各个磁場分量的数值。例如在И.Г. 米哈依洛夫的論文[3]內，除了一些其它的表格外，还給出了与垂直磁偶极子的磁場垂直分量成比例关系的数值表。在戈尔頓的論文[7]內計算了参数 p 由 0.2 到 2.0 的 7 个不同数值的磁場垂直分量和径向分量的数值。在約斯特的文章[8]和捷謝尔的文章[9]內，列出了表示垂直磁偶极子正常場垂直分量的振幅、相位和参数 p 的关系曲綫。

但是，迄今还没有发表过导电率为有限值的均匀半空間上垂直磁偶极子电磁場分量的足够完整的数据表；也沒有确定出表示場分量与距离关系曲綫上的特征点。因此，把到 1954 年为止所进行的数量分析結果加以闡明是完全必要的[10]。

二、場分量的表达式

若在均匀半空間的表面（ $z=0$ ）上置一諧变垂直磁偶极子，其磁矩为：

$$\vec{M} = \vec{M}_0 e^{i\omega t}$$

則由它造成的电磁場具有矢量势 $\vec{\Pi}$ ，此矢量势仅有垂直分量，且

等于

$$\vec{\Pi}_0 = 2\vec{M} \int_0^{\infty} J_0(n\rho) e^{-n_0 z} \frac{n dn}{n_0 + n_1} \quad (\text{在空中, 即 } z \geq 0 \text{ 时})$$

$$\vec{\Pi}_1 = 2\vec{M} \int_0^{\infty} J_0(n\rho) e^{n_1 z} \frac{n dn}{n_0 + n_1} \quad (\text{在地下, 即 } z \leq 0 \text{ 时})$$

式中

$$n_k = \sqrt{n^2 + \chi_k^2}; \quad \chi_k = \frac{4\pi}{c} \sqrt{i \frac{\mu_k f}{2} \left(\sigma_k + i \frac{\epsilon_k f}{2} \right)}$$

f ——频率; $c = 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒; $i = \sqrt{-1}$; μ_k ——导磁率; σ_k ——导电率; ϵ_k ——第 k 号介质的介电常数; 脚碼 0 代表空中的; 脚碼 1 代表地下的; ρ 、 φ 、 z ——观测点的圆柱座标; 偶极子位于座标原点; z 軸垂直向上。

电场和磁场的矢量各为:

$$\vec{E} = -\frac{2\pi}{c} \mu f i \cdot \text{rot } \vec{\Pi}; \quad \vec{H} = \text{grad div } \vec{\Pi} - \chi^2 \vec{\Pi}$$

其各分量则为:

$$E_\rho = E_z = 0; \quad E_\varphi = \frac{2\pi\mu f i}{c} \frac{\partial \Pi}{\partial \rho},$$

$$H_\varphi = 0; \quad H_\rho = \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{\partial \Pi}{\partial z}; \quad H_z = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial z^2} - \chi^2 \Pi = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \Pi}{\partial \rho} \right).$$

这些分量在空中及地下各为:

$$E_{\varphi_0} = -\frac{2\pi\mu f}{c} i 2M \int_0^{\infty} J_1(n\rho) e^{-n_0 z} \frac{n^2 dn}{n_0 + n_1};$$

$$H_{z_0} = \frac{2M}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \int_0^{\infty} J_1(n\rho) e^{-n_0 z} \frac{n^2 dn}{n_0 + n_1};$$

$$H_{\rho_0} = 2M \int_0^{\infty} J_1(n\rho) e^{-n_0 z} \frac{n_0 n^2 dn}{n_0 + n_1};$$

$$E_{\varphi_1} = -\frac{2\pi\mu f}{c} i 2M \int_0^{\infty} J_1(n\rho) e^{n_1 z} \frac{n^2 dn}{n_0 + n_1};$$

$$H_{z_1} = \frac{2M}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \int_0^{\infty} J_1(n\rho) e^{n_1 z} \frac{n^2 dn}{n_0 + n_1};$$

$$H_{\rho_1} = -2M \int_0^{\infty} J_1(n\rho) e^{n_1 z} \frac{n_1 n^2 dn}{n_0 + n_1};$$

对位于地表 ($z=0$) 的各点, 场分量公式可简化, 并可用佛科 (Φ_{OK}) 积分^[1]化为已有表可查的函数:

$$\int_0^{\infty} J_0(n\rho) \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^{\nu} \frac{n dn}{n_0 n_1} = L_{\nu},$$

式中

$$L_{\nu} = I_{\nu} \left(\rho \frac{x_1 - x_0}{2} \right) K_{\nu} \left(\rho \frac{x_1 + x_0}{2} \right),$$

而函数 I_{ν} 和 K_{ν} 是虚宗量的贝塞尔函数。

通过相应的计算, 可得:

$$E_{\varphi} = -\frac{4\pi\mu f}{c} i \frac{M}{\rho^4 (x_1^2 - x_0^2)} \{ e^{-x_0 \rho} (3 + 3x_0 \rho + x_0^2 \rho^2) - \\ - e^{-x_1 \rho} (3 + 3x_1 \rho + x_1^2 \rho^2) \}$$

$$H_z = -\frac{2M}{\rho^5 (x_1^2 - x_0^2)} [e^{-x_0 \rho} (9 + 9x_0 \rho + 4x_0^2 \rho^2 + x_0^3 \rho^3) - \\ - e^{-x_1 \rho} (9 + 9x_1 \rho + 4x_1^2 \rho^2 + x_1^3 \rho^3)],$$

$$H_{\rho} = M \frac{x_1^2 - x_0^2}{4} \frac{\partial}{\partial \rho} [L_0 - L_1].$$

现在, 我们可以转入对低频的, 也就是说, 当空中和地下的位移电流可忽略时 ($x_0=0$; $x_1=x\sqrt{i}$) 的场的分量表达式进行数量分析。

此外, 我们还假设空气和大地的磁导率是一样的, 它们都等于 1 ($\mu_0=\mu_1=1$)。

三、电场的切向分量

在低频时, 电场的切向分量为: