

地下地球物理論文集

苏联 B. H. 达哈諾夫等著

石油工業出版社

內 容 提 要

本集所載為有關應用各種新的地球物理方法探測油氣井剖面的四篇論著。這些論著都是莫斯科石油學院地下地球教研室人員在B·H·達哈諾夫教授指導下完成的。第一篇論述如何根據地下地球物理資料來研究油田內油滲性質和生產層含油飽和率的問題。第二篇為人工電位測井法，詳細地介紹人工激起電位差的理化原理，探測井剖面的方法，結果的解釋和應用儀器等。第三篇為如何利用屏蔽接地電阻測井法，測出易於被一般電測所漏失掉的含油可能性最大的薄層砂層和粘土層的交互層。第四篇為井溫微差測定法，則為在記錄井內差熱曲綫時，如何自動地消除地熱場的影響，並確切地記錄出地溫在局部熱場內傳佈的變化。

本集除供現場測井工作人員參考外，還可作為一般設有地球物理勘探課程各專業學院的補充教材。

因內容方面包括許多新的理論和方法，除譯者在翻譯過程中曾得到李澤鴻同志的不少幫助外，並曾由石油學院王曰才教授校閱過。

В. Н. ДАХНОВ, В. Н. КОБРАНОВА,

М. Г. ЛАТЫШОВА и В. А. РЯПОЛОВА

ПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОФИЗИКА

СБОРНИК СТАТЕЙ

根據蘇聯國立石油燃料科技書籍出版社(ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1952年列寧格勒版翻譯

統一書號：13037·8

地下地球物理論文集

(全蘇石油工作者科技工程學會會刊之一)

陳鳳祿譯

王曰才審訂

石油工業出版社出版 (地址：北京六鋪炕石油工業部小樓)

北京市書刊出版業營業許可證出字第083號

北京市印刷一厂排印

新華書店發行

787 × 1092 1/32 開本 * 印張5 1/4 * 99千字 * 印1—6, 100冊

1956年7月北京第1版第1次印刷

定價(10)0.90元

近几年来，地下地球物理在各种探测方法综合应用的基础上，成为一种不取岩心研究鑽井剖面有效的方法。地下地球物理方法之所以认为有完全适用的可能性，就是因为它不仅能够將井所鑽穿的地層分成一些主要类型的岩層，並對於鑽井剖面上有生產價值的岩層給出質量上的評價，而且也能对岩層孔隙率，滲透率，含油飽和率，含气飽和率以及含碳量等作出數量上的測定。十几年前，以H. M. 古勃金院士命名的莫斯科石油学院地球物理教学研究室根据岩層电阻率数值並綜合所具其他地球物理特征制定出測定岩層孔隙率，孔隙空間含油飽和率的各种方法，以及對於儲油層可能含油率評定的准則，而這些方法及准則与年俱增地在石油工業中得到了日益廣泛的应用。在測定孔隙率，含油飽和率以及在利用这些数据計算石油的地質儲量的許多工作中，都曾确証所提出的这些方法是具有很大的效果，而有細地研究岩心的物理性質，就能將所得結果和地下地球物理探测方法之間的依賴关系，应用到不同类型的儲油層中去。

但目前探测鑽井剖面的地球物理方法，對於解决以上所列举的一些問題，在有一些地区还不能給出足够完全的資料。在这些地区，根据地下地球物理資料，有时不能确切地測定油滲的性質和鑽井剖面上生產層的含油飽和度，因而也不能查明这样一些生產層，有时甚至連按岩層主要

类型把鑽井剖面上岩層加以正确地划分也办不到。

为了在解决有关生產層的揭露以及生產層的油滲性質和含油飽和率的研究这些問題上，給予石油工業以最大的协助起見，莫斯科石油学院地下地球物理教学研究室在最近几年应用實驗室的方法所進行的工作中，進一步地研究出岩層的物理性質依於这些岩層的岩石性質、油滲性質以及含油性能之間的依賴关系，並且由於制定出預測鑽井剖面的一些新的方法，因此促進地下地球物理好些主要問題的解决——得到不取岩心的鑽井剖面。这一本論文集，就是對於这些工作以及所得种种結果的敘述。

關於編寫这几篇論文所用的材料的收集整理工作，除本書作嘍面外，还有不少教学研究室科学工作人員，H. H. 謝菲尔、H. A. 奥尔津楚、B. M. 梅罗和尼柯以及泥礫岩岩石学教学研究室 B. П. 弗洛林斯基副教授，科学工作人員 B. C. 克尼亞澤夫和 A. H. 洛帕柯夫。在研究工作進行中並獲得工業部門工作人員，H. M. 卡尔平柯、H. Г. 涅斯捷林柯、П. Ю. 列彼申斯基、Ю. А. 巴索烏夫、B. Ю. 溫捷里什捷英和 Д. А. 厦皮格等相當大的帮助，作者們特向上述諸位同志表示感謝。

目 錄

序 言

第一篇 根据地下地球物理資料研究油田內油瀝 的性質和生產層的含油飽和率	
..... B. A. 达哈諾夫, B. H. 柯布蘭諾娃	
緒論	5
§1. 岩層岩性的確定	8
§2. 岩層孔隙率的測定	11
§3. 岩層含油飽和率的測定	46
§4. 岩層滲透率的測定	52
結論	54
参考文献	53
第二篇 应用人工电位法測井 (电解測井)	
B. H. 达哈諾夫, M. T. 拉迪紹娃, B. A. 利雅波諾娃	60
§1. 以研究岩層中人工电位为基础的地球物理測井法的 發展簡史	60
§2. 关于人工电位物理-化学性質的一些知識	64
1. 在帶有电子導电性和岩層礦物分界面上進行的 电化学过程	65
2. 在有离子導电性的岩層內進行的电化学过程	69
3. 對於含有帶电子導电性的礦物顆粒、並具有离子 傳導性的岩層所特有的电化学过程	73
§3. 应用人工电位法探測鑽井剖面	74
§4. 對於岩石和礦物試样進行人工电位研究的結果	84
1. 具有电子導电性的岩石和礦物	84

2. 碎屑岩層.....	37
3. 黃鐵礦化和碳質岩層.....	30
§5. 電解測井生產性試驗的種種結果以及電解測井勘 探油田和煤田中的應用範圍.....	91
參考文獻.....	100

第三篇 屏障接地電阻法 (C93).....

..... B. H. 達哈諾夫, B. A. 梁坡洛娃	
緒論.....	105
§1. 屏障接地電阻法 (C93) 理論上的一些問題.....	110
§2. 在井內進行屏障接地電阻探測的方法.....	124
§3. 勘測進行的結果.....	123
參考文獻.....	134

第四篇 井溫微差測定法 (微差熱測井).....

..... B. H. 達哈諾夫, B. A. 利雅波諾娃	
緒論.....	135
§1. 微差熱測法原理.....	141
§2. 微差熱測井在井內進行的探測方法.....	164
§3. 在井內應用井溫微差測定法所能解決的一些問題 以及工作進行一些實例.....	153
參考文獻.....	173

第一篇 根据地下地球物理資料研究 油田內油瀝的性質和生產層 的含油飽和率

B. H. 达哈諾夫
B. H. 柯布蘭諾娃

緒 論

为了切实有效地開發油田，就要通曉開採對象產狀和構造土所具的特征，油瀝的性質以及含油飽和率。有了這些資料，我們才能正確地制定地質部分的開採設計，並且使這種設計能够在石油工業中更为合理地實現。

直到最近，地質勘探部門还没有办法在井內直接進行油瀝性質和岩層含油飽和率的量測，仍旧是利用在鑽井過程中从所探測的岩層剖面部分採取岩心進行量測的方法，來確定岩層孔隙率，滲透率，含油飽和率（封存水的數量）以及岩石顆粒的粗細程度。

但是这样的分析，並不能給出岩層油瀝性質詳盡無遺的資料。

第一，由於岩樣物理性質的分析和岩樣的採取，費用都相當大，因而採取岩樣的數量是有所限制，所以研究過的這些岩樣並不能把所要探查的對象所具特征完全表示出來。

第二，因为在油瀝方面，我們最想知道的是岩層有疏松的差別（像細砂岩），往往由於岩心鑽頭的不够完善，不能將这样的松碎岩樣取到地面，这样就留下一些沒有能够

進行研究的岩樣。岩心採取率很少超過 50%，從鑽井每一間隔採得的岩心多半為 20—40%。

第三，由於在實驗室內進行岩樣分析時，對於含油飽和率 and 水的礦化作用這兩者之間產生了錯誤的概念。這種錯誤概念之所以產生，是由於泥漿在溫度和壓力改變下侵入岩石孔隙，填充孔隙空間（液混合物的成分發生變化的緣故）。

第四，由於在採取岩心時改變了岩石結構，因而得出不正確的岩層油濕性質的概念。

如以從露頭上和淺井內所採岩樣進行分析作為研究岩層的根據，也會對岩層得到不夠明晰的概念，因為生產層的岩層性質常是隨着地區不同而改變的，而對於所進行探查的油田，和從淺井露頭採取岩樣所表現的岩石性質，可能有很大的差別的。

研究鑽井地質剖面的地球物理方法，近幾年來在探礦工業中獲得普遍的採用。研究井內的電阻率，自然電位差，放射性，熱場以及岩石的抗壓性成為辨認油田地質構造和一些個別油層性質確實可靠的方法，而被廣泛利用到實際工作中去。

由於一方面——岩層所具有的種種物理性質——電阻、放射性、熱能、磁性、機械力能；另一方面岩層的含油飽和率、含氣飽和率、含酸量、孔隙率、滲透率以及其它一些岩石性質，這些物理性質相互之間數量上關係的發現，可以斷言，對於鑽井地質剖面的詳細研究，特別是對於確定岩層儲油物質以及對於應用礦物（石油、天然氣、鹽）礦藏可採儲量的評價，地球物理測井法是有可能得到

更为广泛的利用。

在井内量得的岩石物理参数数据以及所量得的这些数据和我们所要探查的岩层储油性质，有用矿产含量之间数量上的依赖关系，就是用以解决上述这样一些问题的原始资料。

应当指出，由于运用综合地球物理方法对于岩层的各种物理性质进行探测，像岩层的孔隙率，就能根据井内量得的各种不同物理性质来评定，这样就大大提高应用这些地球物理法测定所要探查岩层参数的准确度。

必须注意到这一点，就是岩层的物理性质和所测定的岩石性质之间数量上的关系，并不总是规定的很严格。特别是有某些岩样，由于在构造和结构上发生局部变化，便不受推测出一定规律的支配而和所求得的数量关系有很大的偏差。但是这些偏差，对于范围很大的岩层应用一些地球物理测井法进行岩层物理性质的量测，是没有什么实际作用的。

在这些井内量得的参数当中，研究得最清楚的要算岩层的电阻率和电化学活动性^①。对于许多岩层来说，这些参数数值依于岩粒不均匀的程度、孔隙率、渗透率以及含油饱和率之间的依赖关系，现在都已经确定出来，这就有可能根据电测资料求得上述这些岩石性质的解释。关于这些依赖关系以及利用这些关系给出可能求得上述岩石性质，均在本书内详细阐述。

①“岩层的电化学活动性”，应理解为天然层列情况下的岩层被泥质泥炭充填的井身所交割而产生电场的性质。

§ 1. 岩層岩性的確定

根據岩層物理性質的測定，便能確定出岩層的岩性。這是以地球物理測井結果和被井鑽穿岩層顯示出岩性特徵進行多次對比的数据，以及岩層物理性質和岩石性質實驗室研究比較的材料作為基礎來確定的。在地球物理測井各種不同形式的曲綫圖上明晰地分劃出來的岩層種類，就是用這樣一些對比方法確定出來的[1,5,6,7]。

例如粘土層在視電阻率曲綫圖上，是以低電阻率表示，數值變動於1—10 歐姆·公尺範圍以內，只是在大陸性的粘土沉積內的電阻率才能達到20—30 歐姆·公尺。

粘土層的電阻率，和其他岩層一樣，是隨着岩層濕度（孔隙率）的減低和在飽和有水的岩層內鹽分濃度的減小而增加。但也隨着粘土顆粒不均勻程度的減小，就是隨着孔隙率的減低以及在岩層內砂質和碳酸質膠結物含量的增加而增加。

當泥漿比地層水還要淡時（像在实际工作中所常用的泥漿一樣）在自然電位曲綫圖上對着粘土層處，便會發現自然電位曲綫的正異常是隨着粘土層的分散度和密度的增大而增加。

粘土層在伽瑪射綫測井曲綫圖上，表示為伽瑪射綫強度的增加，數值是隨着粘土的含量，特別是隨着膠體物質和有機物質含量的增加而增加的。高的放射性表示出在介質還原條件下形成的作為一般生油層系的粘土沉積[6]。而在中子測井曲綫圖上對着粘土層處，則發現有二次伽瑪射綫強度的減小。粘土層的孔隙越多，分散度越大，則二次

伽瑪射綫強度的減小也就格外顯著。

泥漿溫度高於岩層溫度時，粘土層在溫度曲綫圖上，一般是表示為溫度正異常，這就說明粘土層的热阻高並在鑽井時井壁易於坍塌。

砂層的電阻率，從歐姆·公尺的幾分之幾（被強烈礦化水飽和的砂層）變動到好幾個歐姆·公尺。如用礦化作用弱的泥漿進行鑽井，在砂層中用短電極系測量視電阻率，便能發現由於泥漿浸入岩層而引起電阻率表示增加的特徵。含氣和含油砂層的電阻率大於同一區域內的含水砂層的電阻率。砂層電阻率是隨著溶於地層水中鹽分濃度的減小以及砂層膠結作用的增大而增加，因之隨著砂層孔隙率的減小和孔隙空間油、氣飽和率的加大而增加。

如用淡泥漿鑽井，層列在粘土層中的砂層，在自然電位曲綫圖上，是以自然電位的負異常表示出來。而對於被粘土質岩層所包圍着的砂層來說，砂層的孔隙越多，分散度越小，顆粒不均勻的程度越大，則自然電位異常的幅度也就越大。通常，含油和含氣岩層的自然電位異常，是要比同一區域內含水岩層的自然電位異常小[5,6]。

在伽瑪射綫測井和中子測井曲綫圖上，砂層是根據一次和二次伽瑪射綫強度的減低辨認出來的。射綫強度隨著砂層和砂岩層孔隙率的減小和膠結作用的減弱而增強。在溫度曲綫圖上，砂層是以負異常表示，在對着含氣的砂質油層，負異常的幅度特別增大。

碳酸鹽岩層——石灰岩層和白云岩層——一般都具有很高的電阻率，其數值達到幾千甚至幾萬歐姆·公尺。碳酸鹽沉積岩層的電阻率和它的孔隙率成反比，並隨著孔隙

率的減小而急劇地增高。在自然电位曲綫圖上，對着在粘土層中的碳酸質沉積岩層處，可能發現有負異常，這種負異常的幅度，像在莫斯科石油學院岩石物理性質實驗室的實驗資料中最初所確定出的一樣，隨着碳酸質岩層孔隙率的增加和膠結作用的減弱而增大。如粘土物料在碳酸質岩層中所佔的數量不大，便能發現整個沉積組合岩層的自然电位的最大負电位。在致密的石灰岩層內，自然电位曲綫所表現顯著的異常，是由於碳酸鹽類岩層有負的擴散——吸附活動性的緣故[1, 2, 10]。

在伽瑪射綫測井曲綫圖上，碳酸質岩層是以伽瑪射綫強度低的數值表示的，而在中子曲綫圖上，碳酸質岩層則是以岩層中所含水量愈少，二次伽瑪射綫強度就愈大辨認出來。中子-伽瑪射綫測井曲綫圖能够可靠地把致密的碳酸質岩層从孔隙較水或石油所飽和的碳酸質岩層划分出來。碳酸質岩層在鑽速曲綫圖上也能明顯地加以划分，因為鑽速曲綫圖上能表明出由於石灰岩和白云岩的硬度大而引起鑽進時間顯著的延長。

在各種不同物理參數的曲綫圖上，有不少特性可表示出其他一些岩層。例如，水化學沉積岩層就可由電阻率非常大，以及在極大多數情況下，在自然伽瑪射綫強度減弱的同時，二次伽瑪射綫強度的增強這些特性來確定。在煤層中表現有自然电位的正異常和特別大的氡氡氡化电位。

根據地下地層物理資料研究岩層的一些基本特性，方

① 由於所含鉀的放射性同位素 $K-40$ 含量較高而引起與體能比強度較大的自然伽瑪射綫上辨認出來，這是由於最近在探測中所發現的一種例外

法上已經足夠完全，虽说这里面还有許多問題需要加以补充研究，但这篇論文是關於应用各种地球物理方法研究岩層的油滲性質和含油率，所以这些补充研究不在論題範圍以內。

§ 2. 岩層孔隙率的測定

根据在井內量測的岩層物理性質數據來確定岩層孔隙率對於極大多數情況來說，是最簡單而且所解決的問題也是很精確的。第一，由於孔隙水、石油、天然氣以及構成岩石骨架的礦物，在物理性質上都有很大的差別；第二，由於屬於不均勻介質的（岩石）的物理性質是和由不同物理性質介質組成的元素體積含量有關。因此，利用電阻率、伽瑪射線強度、中子效應以及其他一些參數，就都要取決於岩層的孔隙率，這就有可能從這些參數中求得岩層孔隙率的數值。研究得最清楚的就是岩層電阻率和岩層孔隙率之間的關係。

根据很多理論上和實驗上的研究，確定出岩層的電阻率數值，主要是由下列各項來決定：

- (1) 岩層體積濕度 ω ；
 - (2) 岩層孔隙內所含液體的電阻率 e_0 ；
 - (3) 岩層的構架和結構。
- 對於沉積岩的礦物組成，所起的作用不大，所以研究極大多數沉積岩層電阻率時，可以不考慮它的礦物組成。

由於上述情況，沉積岩層的電阻率數值，可由下列關

系式表示:

$$e_v = B_g P_w^t e_0, \quad (13)$$

式中 P_w^t ——對於理想的岩石(顆粒形狀正規顆粒大小相等的一塊岩石)確定岩層電阻率依於體積溫度而改變的關係函數;

B_g ——岩層構造和結構對於電阻率數值發生作用的係數[3]。

函數 P_w^t 為另外兩個函數 P_v^t 和 P_q 的乘積, 這里面函數 P_v^t 是和岩層的孔隙率有關, 而函數 P_q 是和岩層孔隙空間的含水飽和率有關。

由公式(1), 可以得出下列的結論, 就是當解釋視電阻率曲綫圖時, 必須要經常注意到岩層電阻率是和岩層孔隙空間所飽含液體的電阻率 e_0 成正比, 如在理論上抽象地對於電測圖進行解釋, 對於這種情況估計不足, 往往會對於油滯的含油和含水作出不正確的結論。

只有在了解岩層所含液體電阻率的情況下, 才能正確地估計出岩層的孔隙率和在下面將要談到的岩層含油情況。

和 $B_g P_w^t$ 相等的比值 e_v/e_0 , 則為岩層所具構造特性和結構特性的函數, 並且也是岩層孔隙空間含水飽和率的含數。

岩層電阻率和岩層孔隙率之間關係上所表現的特征, 是假定岩層孔隙完全為含水所飽和是從理論上和實驗上研究出來的。如圖1所示一些曲綫就是從某些研究中得出的結果。

在確定上述關係方面, 對於理論上的研究, 不祇過於

詳述,只是對於假定岩層孔隙空間完全被水所充滿($P_g=1$)構造均勻的岩層來提一下,有很多的研究工作者根據所採用不同的岩層模型,得出各種不同公式來確定岩層的電阻率(ρ_v)對岩層孔隙內所充滿水的電阻率 ρ_0 的比值(P_v)依於孔隙率(k_v)而變動的關係。

這些公式具有下列形式[1,6]:

$$P_v^t = \frac{\rho_v}{\rho_0} = \frac{3-k_v}{2k_v} \quad (2)$$

(馬克斯維爾,圖1,曲綫5);

$$P_v^t = \frac{\rho_v}{\rho_0} = \frac{3}{2k_v}; \quad (3)$$

$$P_v^t = \frac{\rho_v}{\rho_0} = \frac{3}{k_v} \quad (4)$$

(宗德別爾格,圖1,曲綫6);

$$P_v^t = \frac{1}{1-\sqrt[3]{(1-k_v)^2}}; \quad (5)$$

$$P_v^t = \frac{1+0.5\sqrt[3]{1-k_v}}{1-\sqrt[3]{(1-k_v)^2}}; \quad (6)$$

$$P_v^t = \frac{1+0.25\sqrt[3]{1-k_v}}{1-\sqrt[3]{(1-k_v)^2}} \quad (7)$$

(達哈諾夫,圖1,曲綫7和8);

$$P_v^t = \frac{\rho_v}{\rho_0} = \frac{4.25}{k_v} \quad (8)$$

(塔爾霍夫[11],圖1,曲綫9)。

如果我們將如圖1所示實驗室研究結果的曲綫和理論

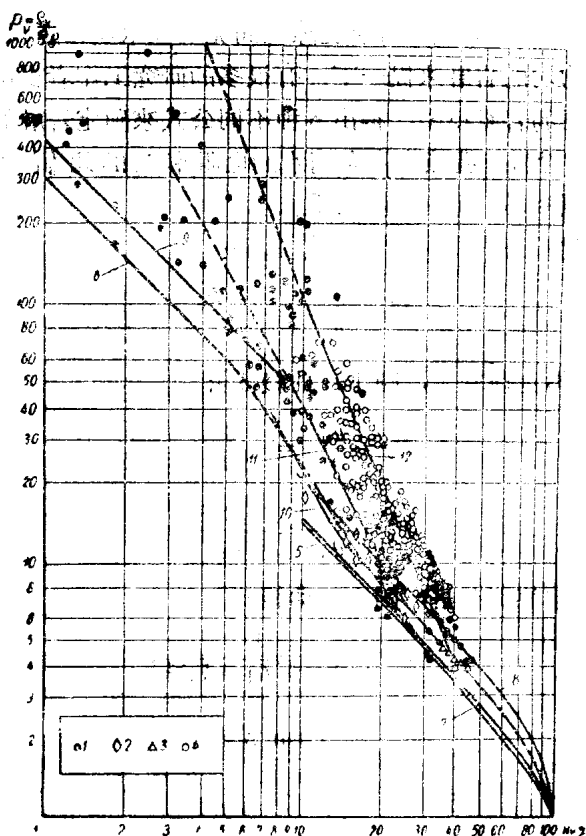


圖 1 根据原有的一些实验上和理論上数据得出岩層相对电阻率

($\rho_v = \frac{\rho}{\rho_0}$) 依於岩層孔隙率($k_v\%$)而变动的关系曲线

1—莫斯科石油学院(МНН)岩層物理性質實驗室對於砂層、細砂岩層、粘土層以及石灰岩層的實驗数据；2—阿塞拜疆石油研究所(АзНИИ)對於阿普希朗半島油田砂層的實驗数据；3—格羅茲內中央石油研究所地球物理實驗室(ЦНИГПИ Грознеорти)對於砂岩層的實驗数据(Г. С. 馬羅作夫)；4—對於砂岩層和石灰岩產油層的實驗数据(根据資料档案室(Archive))；5—對於球形顆粒的理論曲線(馬克斯維爾)；6—對於球形顆粒的理論曲線(宗德列爾格)；7和8—對於立方形顆粒在兩種不同集積下確定的理論曲線(Б. Н. 達哈諾夫)；9—對於小孔隙率岩層的理論曲線(А. Г. 達爾霍夫)；10、11、12—各相當於膠結性不好的一般以及膠結性良好的岩層的預想曲線(Б. Н. 達哈諾夫)。

上的曲綫对比一下，就可以证实这两条曲綫之間在左面部分是有極大的分歧。这是由於用以計算岩層电阻率的模型，在孔隙率小时，是和存在於岩層內的电阻率和孔隙率之間的实际关系不相符合。各点的不能重合(或者散在)是由於在進行第一次研究时，將結構(如岩層孔隙率小，則岩層所受結構的影响就很大)不同岩層進行的量測和進行實驗不够仔細所得的結果繪在一張曲綫圖上所造成的。

如在同一类型的岩層進行研究並正确地佈置实验工作，則各点的散在就正如莫斯科石油研究所岩層物理性質實驗室数据中所指出的一样，会大大地減少，並且所有測点都沿一条曲綫的方向聚集起來。如圖 2、3、4、5 和 6 所示各曲綫，便是上述情况的証明，这些曲綫，是由莫斯科石油研究所岩層物理性質實驗室對於烏拉尔地区西部上古生代和下古生代地層(圖 2，3 和 4)，對於北高加索的第三紀沉積岩層(圖 5 和 6)，在和岩層層理为垂直方向(圖 3 和 5)以及平行於岩層層理的方向(圖 4 和 6)所進行量測的电阻率。圖 3 和 4 所示烏拉尔区西部下古生代地層各相当於和層理垂直量測的电阻率 $P_{\perp}$ 以及与層理平行量測的电阻率依於体积湿度 ω 而变动的关系曲綫，証明在这些曲綫的繪制上，是具有足够高度的准确性，确定所得結果是以最大稠密度挨近曲綫主要方向聚集起來。

根据理論数据和實驗室多次研究的結果，可能得出这样的結論，就是如果岩層孔隙空間完全是被地層水所飽和，則岩層电阻率和岩層所含有的水的电阻率之間的关系，应当適合於以下式來表示：

$$\epsilon_0 = B_c P_c \epsilon_0 = P_c \epsilon_0, \quad (9)$$