

Л.С. 強图里什維利 著

在地形切割地区設計 道路時的電法勘探

地質出版社

在地形切割地区設計 道路时的电法勘探

物理数学科学副博士 (苏) Л. С. 強图里什維利著

向仲荣 譯 許宝文 校

A. И. 查博罗夫斯基教授主編

苏联高等教育部批准作为“公路”专业数学参考用書

地质出版社

1960·北京

Л. С. ЧАНТУРИШВИЛИ

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ДОРОГ НА ПЕРЕСЕЧЕННОЙ
МЕСТНОСТИ

АВТОТРАНСИЗДАТ

МОСКВА 1959

本書叙述了在复杂的地形条件下应用电法勘探的物理数学原理和野外方法,并且提出了定量解释方法。可供高等学校公路设计专业学生作参考用,也可以供在复杂地形地区进行电法勘探的物探人员参考。

在地形切割地区设计道路时的电法勘探

著者 Л. С. 强图里什维利
译者 向仲荣
出版者 地质出版社

北京西四羊市大街地质部内
北京市图书出版业营业登记证出字第050号

发行者 新华书店科技发行所
经售者 各地新华书店
印刷者 地质出版社印刷厂

北京安福门外大街40号

印数(京) 1—1300册 1980年5月北京第1版
开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 1980年5月第1次印刷
字数 90 000 印张 $4^{1/32}$
定价(10) 0.55 元

献給亲爱的城市

——梯比利斯誕生的1500周年

此参考书叙述了在复杂的地形条件下用直流电进行勘探的物理教学原理，以及电剖面 and 垂向电测深测量时的野外电法勘探工作的方法。

提出了野外测量结果定量解释推断方法，并且对计算地形影响的方法用勘察工作的资料作了例证，

本参考书供高等学校公路专业的学生使用，同样也可以供电法勘探专家们参考，它对那些研究道路路线通过地带的地质构造的人们，以及其他情况下，对勘探山区的人们給以帮助。

目 录

序言	5
----	---

在复杂的地形条件下用直流电勘探的数理基础

1. 均匀电场的畸变	7
三面柱状的地形	8
四面柱状的地形	13
半圆柱状及半椭圆柱状的地形	17
2. 格林别尔格法	22
3. 点电源场的畸变	25
踏波解法	26
光学解法	32
用半实验方法确定倾角	35
4. 勘探被充填的盆地	37

应用电法勘探的经验

5. 平面平行电场的畸变及环流问题上地形校正的研究	44
6. 点电源场的畸变	51
高尔边科及科罗罗夫的试验量板	51
在解释电剖面曲线时 E 量板的应用	55
維舍夫的试验量板	57
与山谷垂直的 $AMONB$ 排列电剖面	62
用电位梯度法进行勘探的新方法	64
悬崖上的电测深	66
踏勘性的室内工作	67
ρ_k 与接地深度的关系	68
在两层构造的山谷底部的电测深	69
7. 岩石和个别岩层的参数特性	71
8. 实例 1	73
9. 实例 2	80
10. 实例 3	86
11. 勘探滑坡地带的实例	88
12. 鑽探工作和电法勘探工作的技术经济对比	92
結論	94
附件	100
参考文献	101

序 言

我国工业实力的不断增长，荒地的开垦，人口稀少地区水利电力建设网的扩大，新矿产区的勘探，所有这一切对设计和建筑部门提出了更高的要求。

实际证明，所有各种道路的设计工作都大大地走在地质勘探的前面，因此在许多情况下往往拖延了完成设计书的期限。同时在现代科学发达的时候，可以用更为完善的形式（电法勘探）来代替繁重和昂贵的勘探工作。

现在直流电法勘探在工程地质勘探中获得了广泛的应用，它充实了地质工作，缩减了山地工作量，正确地指导了勘探，有可能在不久以后，电法勘探就可以使我们不揭露地表而研究各地区的地质构造。

如果在平原上用電法研究淺層的方法可以認為是已經解決了，則在地形切割的条件下对野外測量結果进行地形校正的問題就要提到首要的地位。这种勘探同样地能适用于在复杂地形条件下进行工程直流电法勘探的任何問題。

А.В. 布赫尼卡沙維里、Л.П. 高尔边科及 С.Г. 科馬罗夫、С.М. 舍因曼还在三十年代就从事研究地形对地下电場的影响，以后 А.В. 維舍夫、Н.П. 弗拉基米罗夫、А.С. 波利亚科夫、Л.А. 哈尔芬及 Д.Н. 車塔也夫也从事过这种研究，这类研究一般具有或者用分析法或者用实验的方法来解决問題的性質，本書內上述两种研究方法是相結合的，并在这基础上为某些地形制定了电法測量資料的地形校正方法。

格魯吉亞蘇維埃社会主义共和国科学院地球物理研究所进行了地形校正的研究。

由于国立工业设计院“全苏道路设计院”梯比利斯分院的倡議，从1955年起把电法勘探列入了设计勘探工作的組成中，从那时候起，

地質勘探工作与直流电法勘探同时进行，直流电法勘探的效果用控制鑽孔和浅井来检查。地球物理研究所所制成的校正法已經实际应用于上述国立工业设计院“全苏道路设计院分院”的許多設計对象。本書供高等学校公路专业的学生們及研究地形切割地区內道路通过地帶的地質构造的专家們及在高山地区从事地質勘探的电法勘探专家們使用。

作者認為必須感謝苏联科学院通訊院士 А. Н. 吉洪諾夫在工作中的总的指导，感謝 А. С. 庫巴索夫、А. Н. 阿里姆巴拉什維里、Н. А. 斯洛文斯基和 Ш. Д. 西古阿在道路的設計勘探工作中采用用电法勘探方面給予了实际帮助，感謝 А. И. 查波罗夫斯基、А. С. 謝苗諾夫教授，在将手稿整理付印时所提出的很多宝貴意見。

讀者对本書有何意見和愿望，即請函知以下通信地址：Москва, В-35, Софийская ноб., 34 Автотрансиздат。

在复杂的地形条件下用直流电勘探的

数 理 基 础

为了研究由地表不平所造成的电场畸变情况，必须把地形形状分类。考虑到地形形状很多，因此仅限于研究在一个方向上的地表不平。我们将探讨垂直断面为三角形、梯形、半圆形、半椭圆形及扇形的各种不平地形。

显然，这种分类只是近似于实际情况，研究这种分类的目的是要在复杂地形条件下进行的电法勘探资料中应用数学整理的方法。经验表明，实际的地形形状可能与上述的严格几何形状有些不同，但这种差别不会使电法测量结果的校正值发生很大变化。

切割地形使地下的电场畸变。可以研究区域性和局部性的电场。在第一种情况下畸变的是平面平行电场，在第二种情况下畸变的是点电源场。这两种情况下解决问题的方法是不相同的。

1. 均匀电场的畸变

平面平行电场的特点是空间任何一点上的梯度是不变的，以硬壁来代替电流面不会引起电场的畸变。因此，沿着地表的水平面，平面平行电流不变，地表的任何弯曲会使梯度值畸变，地形形状与梯度的畸变值之间的关系用解相应的命题的办法来确定。我们知道，与均匀电场的畸变有关的问题是比較容易解决的，在解决这些问题时保角映射法占有重要的地位。这种数学方法的有效性在物理意义上就是反射的思想。我们研究平面平行电流，并以地表的弯曲来使它畸变，然后把弯曲的境界线映射在映射面的实数轴上，则我们有可能对比两种图象。第二种情况是“有什么”，而第三种情况是“假如引入相当的干扰来代替地表弯曲那么可能会怎么样”。用数学的语言来讲，对于折线形状的不平(三角形、梯形等)来说，后者是被积函数的极或零。“对

比”本身就以一定的数学公式表现出来，“对比”过程是保角映射的运用，因为它的方法已经很好地被制定了，所以在解决我们所探讨的问题时保角映射法是有效的。

三面柱状的地形

让我们将复变数 $z = x + iy$ 下半平面作为平行电场，则 X 轴位于大地和空气分界面上，而且和电流的方向一致， Y 轴垂直向下[20]。

设 X 轴的 $(-a, +a)$ 区间内境界线为一洼地(山谷)，深度为 h ；断面为三角形，我们将给出沿空气-大地的折线分界面的电位梯度的变化情况。

为此我们利用克里斯多夫-舒伐尔兹公式，利用此公式试将电流所处的区域映射在复变数 $w = u + iv$ 的下半平面上。假设谷的边界 $z = -a$ 和 $z = a$ 映射为 $w = -k$ 和 $w = k$ ，那么克里斯多夫-舒伐尔兹公式可以写成如下形式，

$$z = - \int_0^w \left(\frac{t^2}{t^2 - k^2} \right)^{1-\alpha_1} dt + ih,$$

此处 $(1-\alpha_1)\pi$ ——为等腰三角形的底角。

但 $\frac{dw}{dz} = E$ ，此处 E 为电位梯度，故

$$E = E_0 \left| 1 - \frac{k^2}{w^2} \right|^{1-\alpha_1} \quad (1)$$

此处 E_0 ——为电场畸变前的电位梯度

$$k = - \frac{h}{\sin \alpha_1 \pi \int_0^1 \left(\frac{r^2}{1-r^2} \right)^{1-\alpha_1} dr} \quad (2)$$

对于山脉来说我们将有：

$$E = \left| \frac{E_0}{1 - \frac{k^2}{w^2}} \right|^{\alpha'_1 - 1} \quad (3)$$

在这种情况下

$$k_1 = \frac{-h}{\sin \alpha'_1 \pi \int_0^1 \left(\frac{1}{t^2} - 1 \right)^{\alpha'_1 - 1} dt} \quad (4)$$

可以为不同的倾角 $(1-\alpha_1)$ 求 k 值, 如果考虑到

$$\int_0^1 \tau^n (1-\tau^2)^{\frac{n-1}{2}} d\tau = \frac{1}{2} B\left(\frac{m+1}{2}, \frac{n+1}{2}\right)$$

当 $(m$ 和 $n > -1)$

$$\text{则} \quad \int_0^1 \left(\frac{\tau^2}{1-\tau^2} \right)^{1-\alpha_1} d\tau = \frac{1}{2} B\left(\frac{3}{2} - \alpha_1, \alpha_1\right).$$

$$\text{但} \quad \sin \alpha_1 \pi = \frac{\pi}{\Gamma(\alpha_1) \Gamma(1-\alpha_1)},$$

式中 Γ ——伽玛函数

因为, $B(m, n) = \frac{\Gamma(m) \Gamma(n)}{\Gamma(m+n)}$, 于是为谷地求出,

$$|k| = \frac{2 \left(\frac{3}{2} - \alpha_1 \right) \Gamma \left(\frac{3}{2} \right) \Gamma(2 - \alpha_1)}{\pi (1 - \alpha_1) \Gamma \left(\frac{5}{2} - \alpha_1 \right)} \quad (5)$$

在山脉情况下 $|k|$ 式是相类似的, 仅 α'_1 为 α_1 所代替,

对于坡度倾角不同的谷地和山脉来说, 当 $h=1$ 时, 则 $|k|$ 值如下:

$(\alpha_1 - 1)\pi$	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°
$ k $	2.72	2.32	2.03	1.84	1.67	1.55	1.44	1.34	1.26	1.20	1.14	1.09
$(\alpha'_1 - 1)\pi$	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°
$ k $	1.14	1.19	1.25	1.33	1.42	1.54	1.68	1.84	2.06	2.32	2.72	3.27
	75°	80°										
	4.26	6.12										

在繪制 E 曲线时发现在 x 与 u 之间差不多存在着线性关系, 在 $x=0$ 附近有一些畸变。因此, 在映射的过程中, 不仅仅几乎保存了比例尺, 而且区间内的个别地段几乎均匀地被映射了, 根据这种情况, 繪制 E 和 x 的图解关系实际上是恰当的。

图1上示有按公式(1)和(3)绘制的 E 量板。
在非对称的三角形情况时问题的解的形式如下:

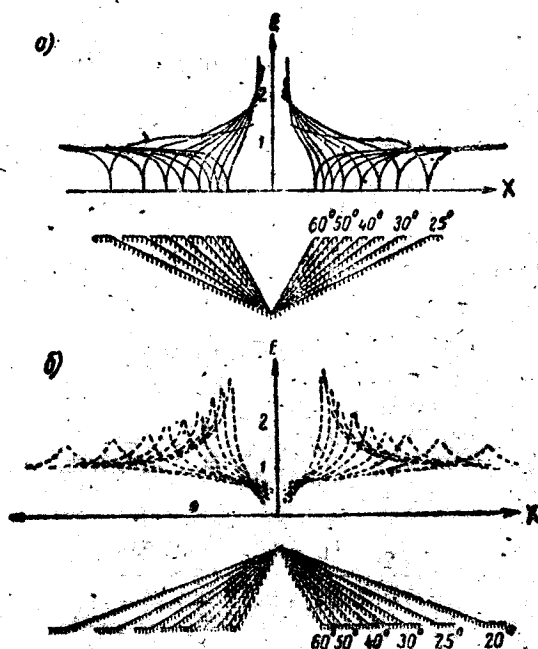


图1. 对于横断面为对称三角形的谷地(a)和山峯(b)的 E 量板

对于谷地

$$\bar{E} = E_0 \left| 1 + \frac{k}{w} \right| \left| \frac{1 - \alpha_1}{1} \right| \left| 1 - \frac{l}{w} \right| \left| \frac{1 - \alpha_3}{1} \right|, \quad (6)$$

对于山峯

$$E = E_0 \left| \frac{w}{w + k} \right| \left| \frac{\alpha'_1 - 1}{1} \right| \left| \frac{w}{w - l} \right| \left| \frac{\alpha'_3 - 1}{1} \right|, \quad (7)$$

此处 $(1 - \alpha_1)\pi$, $(1 - \alpha_3)\pi$, $(\alpha'_1 - 1)\pi$ 和 $(\alpha'_3 - 1)\pi$ ——为三角形左面和右面的底角。

当 k 值为已定时, l 由下列方程式确定:

$$\frac{h}{\sin(1-\alpha_3)\pi} = l \int_0^1 \left(\frac{\zeta}{\zeta + \frac{1}{\varepsilon}} \right)^{1-\alpha_1} \left(\frac{\zeta}{1-\zeta} \right)^{1-\alpha_3} d\zeta, \quad (8)$$

此处
$$\varepsilon = \frac{l}{k}.$$

公式(8)不便于数学计算,所以提出一种在数学上虽然是不严密的但实际上却是比较简单的方法,我们以大地-空气的分界线同时也是第一支电流线为出发点。当保角映射时,分界面变换为映射面的实数轴,同时 z 面上的无限远处变换为 w 面上的无限远。三角形边的不对称不应反映在转变为映射面上的线段的数值上,但是这不意味着电场仍旧未变,因为在 E 式的两个因式中都包括有各个被映射的区域。

如果线段 $(-k, +k)$ 相当于相应的各个边 $(-a, +a)$ 则 $(-k, +l)$ 应该相当于不对称的边 $(-a, +b)$ 。

写出其比例

$$\frac{k}{l} = \frac{a}{b}.$$

由此
$$l = k \frac{b}{a}. \quad (9)$$

我们来探讨 k 值,很容易看出公式(9)对于任何角的组合都合适,假设 $(1-\alpha_1)\pi=60^\circ$,相应的 $|k|=1.34$,假设谷的另一坡是倾斜的,设倾角为 $(1-\alpha_3)=30^\circ, 45^\circ \dots \dots$ 一直到 60° 。公式(9)中相应的 l 将为2.32; 1.67……即正是那些当 $(1-\alpha_1)\pi=30^\circ, 45^\circ \dots \dots$ 时符合于 k 的数字。

在山脉的情况下利用相似比例,得出,

$$l = k \frac{a}{b}. \quad (10)$$

如果现在仔细看一下第9页上的 $|k|$ 值,则容易看出是满足于与上述相似的条件。对于彼此相加等于 90° 的角的一对 $|k_1|$ 值相当于同样的这些角的两 $|k|$ 值,只是次序相反。

根据公式 (2) 和 (5) 可以得到更为严密的证明, 关于三角形各边的相互关系就象它们的映射那样, 为此必须把公式 (8) 右部的积分列表, 用相应的表式来取代 l 和 k , 以检验 (9) 式。

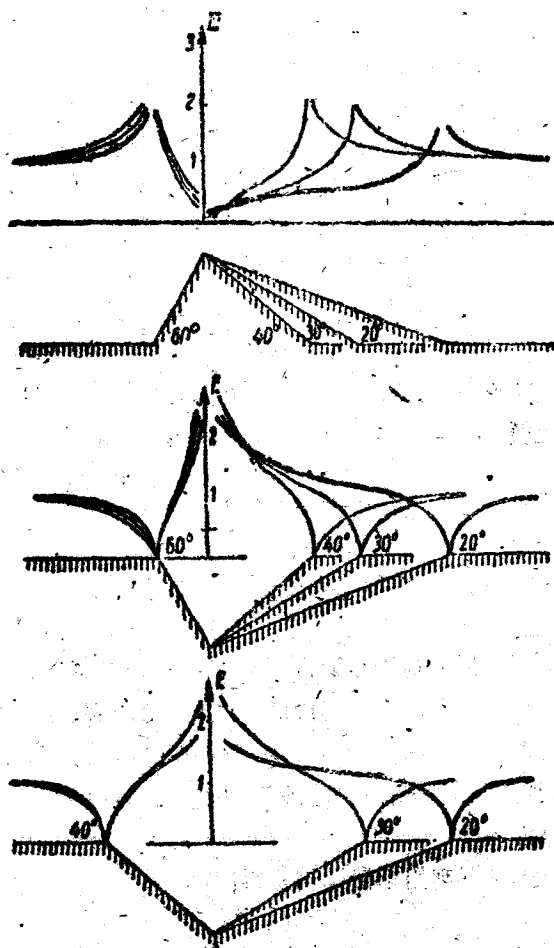


图 2. 对于横断面为不对称三角形的谷和山峯的 E 量板

但这个問題超出了本書的范围, 它对于那些研究椭圆积分性質的人可能感到兴趣。

图2上示有在不对称的不平地形上进行测量时所得的 E 图表, 比例关系用各綫段間的簡單比例确定。

E 量板(請看图1)易于使用, 为此应该把測綫的地形剖面与相当的三角形重合起来, 应该把距地形不平甚远处所計算的 ρ_k 值作为一, 假定在电阻率为400欧姆米的玢岩上进行测量, 必須把这个值作为一而相应地換算其余的数值。

四面柱状的地形

假設 X 軸上 $(-a, +a)$ 区間內境界綫为一深度为 $-h$ 的等腰梯形。

当我們把平面映射在平面 $w = u + iv$ 时, 令点 $z = -a$ (不平地形左面边界), $z = -b + ih$ (底边的左角), $z = ih$ (不平地形的中点), $z = +b + ih$ (底边的右角), $z = +a$ (不平地形的右面边界), $z = \infty$ 并相应地变为 $w = -m$, $w = -n$, $w = 0$, $w = n$, $w = m$, $w = \infty$ 。

使用克里斯多夫-舒伐尔茲公式可以求得,

对于谷地來說

$$E = E_0 \left| \frac{t^2 - m^2}{t^2 - n^2} \right|^{r_1}, \quad (11)$$

对于山峯來說

$$E = E_0 \left| \frac{t^2 - n_1^2}{t^2 - m_1^2} \right|^{r_1}, \quad (12)$$

式中

$$r_1 = 1 - \alpha_1, \quad r_1 = \alpha'_1 - 1.$$

此处对保角映射还附加一个条件, 即要使 $(-m, +m)$, 这对值相应于为补充成三角形的梯形的边界所映射的 $(-k, +k)$ 值。

下列这一对数值 $(-n, +n)$ 可用求曲綫交点的图解法求得。

$$p = \frac{m+n}{m-n}$$

和

$$q = \frac{(b+n)2m}{l \sqrt{(m^2 - n^2)}},$$

式中 b ——为短底边宽度之半。

值 b 和 q 应该在 $n \leq -b$ 时求出。

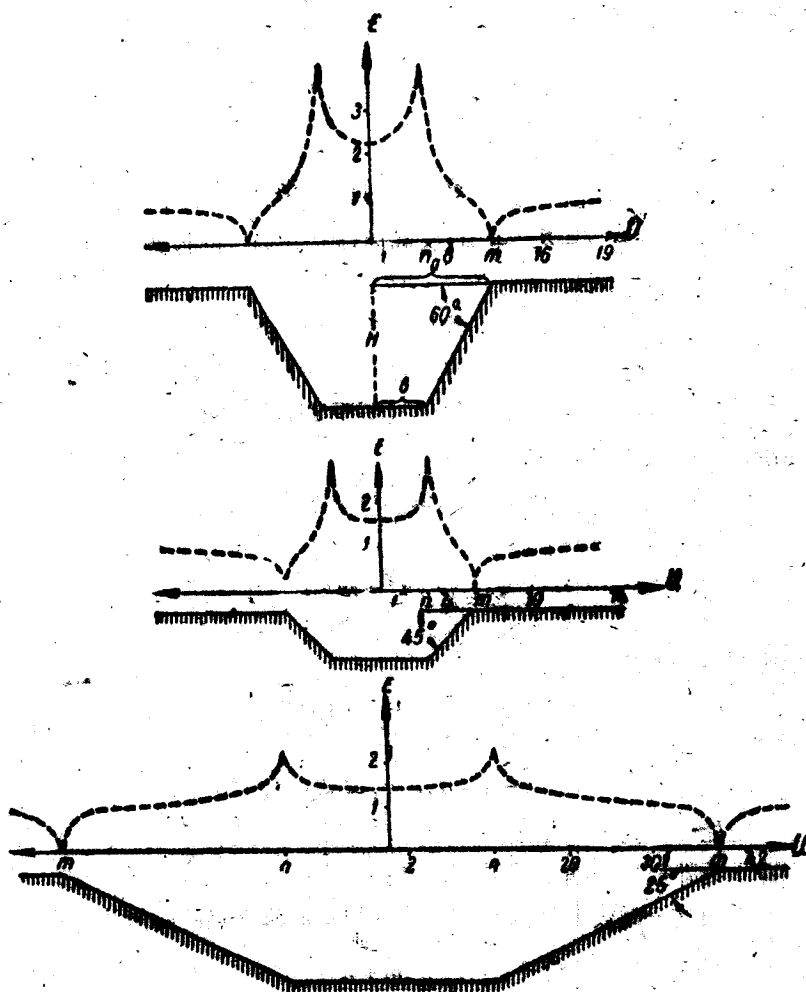


图 3. 用于具有对称梯形横断面的谷地的 E 量板

图 3 上示有具有各种横断面的谷地内 E 的变化曲线，同时利用了

第10頁上所提到的比例关系。

不对称梯形的情况比较复杂，因为对于谷地的边界必须采用一对不相同的参数，然后对于短底边的边界也得出一对不同的数值。所以稍微放松一些数学证明的严密性，试将这个问题分部分地来解决，研究半个梯形上 E 的情况时，可以不考虑梯形的不对称性，而且认为梯形的另一半是前者的镜像，我们用相类似的方式处理梯形的第二个一半，此时认为梯形的第一半是梯形第二半的镜像。

显然，在一定的范围内是可以把对称的境界线代替不对称的境界线，要确定这个范围却具有很大的理论上的困难，而且需要进行专门的研究。

当 $x=0$ 时

$$E_0\left(\frac{m}{n}\right)^{2r} \cong E_0\left(\frac{m_1}{n_1}\right)^{2r_1}.$$

换一句话说，为梯形两半部分别绘制的 E 曲线应在原点处差不多能联接起来，所以在进行粗略的计算时，可以利用下列关系：

$$\left(\frac{m}{n}\right)^r = \left(\frac{m_1}{n_1}\right)^{r_1},$$

此处 r 和 r_1 在野外条件下确定，而 m 和 m_1 可从第9页（即按9页上的表）的资料中得出。

图4上表示深度为常数 H 的不对称梯形上的 E 曲线，如果谷的倾角和深度不变，则斜坡上曲线的形状也不变，谷底宽度的增大只会导致谷底上 E 纵坐标的下降。

上述实例表明，保角映射能清晰地对大地空气的曲折分界面表明均匀电场电位梯度的变化情况。

从下面所述的实验工作的结果可以看见， E 在谷边或者在谷底不变为零或变为无限大，但曲线的下降和上升情况却表现得很清楚，这与问题的理论是很一致的。

因此，一般来讲在映射的地方境界线角点引用特殊点是正确的，这种方法的主要缺点可以认为是在特殊点附近将难于估计干扰体的存在。

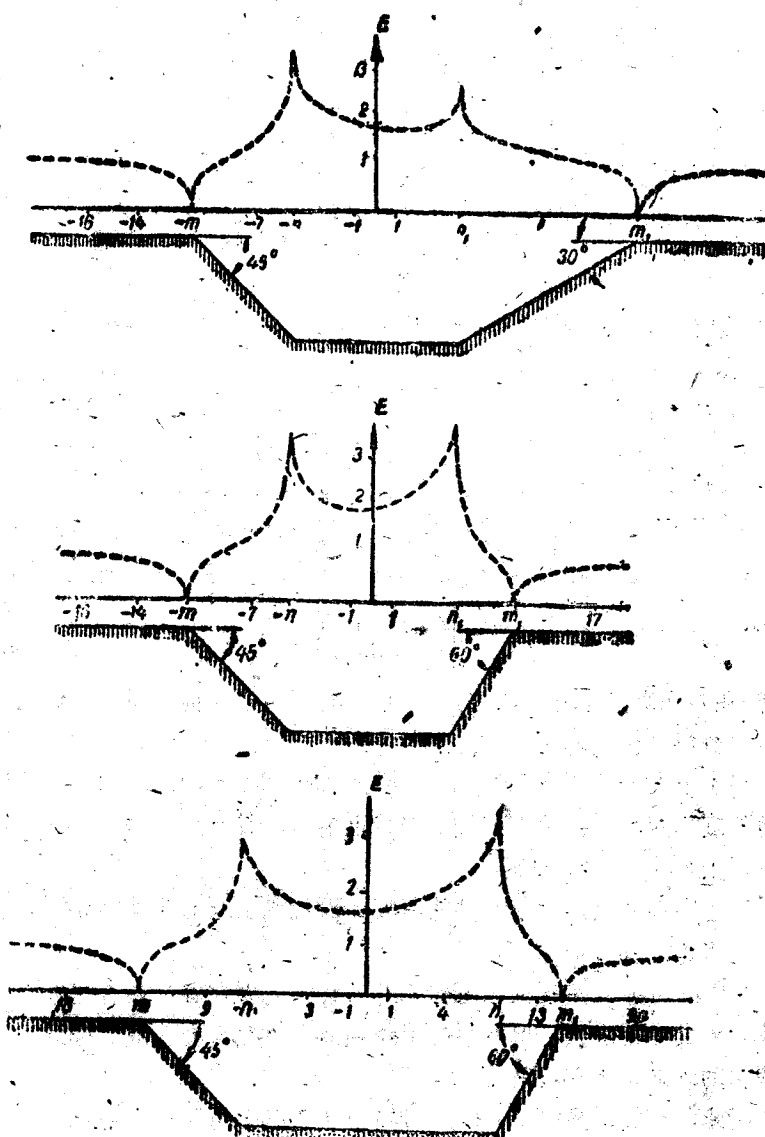


图 4. 用于横断面为不对称梯形的谷地的 B 量板