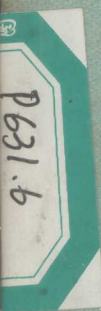


天然产狀放射性矿石 伽玛取样指南

A. Г. 格拉馬科夫 等著



地质出版社

天然产状放射性矿石 伽玛取样指南

A. Г. 格拉馬科夫
(苏) В. Л. 沙什金、著
М. В. 希里亚耶娃

于 銘 強 譯

地質出版社

1960·北京

А. Г. ГРАММАКОВ, В. Л. ШАШКИН, М. Б. ШИРЯЕВА
РУКОВОДСТВО ПО ГАММА-ОПРОВОБОВАНИЮ
РАДИОАКТИВНЫХ РУД
В ЕСТЕСТВЕННОМ
ЗАЛЕГАНИИ
АТОМИЗДАТ
Москва 1959

本書闡述放射性矿石輻射取样的理論基础和实际方法。說明了根据伽馬射綫取样的各种方法。对于輻射取样的仪器和其他輔助設備以及有关輻射仪校正方法、換算系数确定方法、編录和报告資料的編写、輻射取样的检查和輻射取样应用領域等都作了論述。

本指南可作为地質勘探人員、物探人員以及地質勘探系和地球物理系学生的参考資料。

天然产状放射性矿石伽瑪取样指南

著者 А. Г. 格拉烏科夫等
譯者 于銘强
出版者 地質出版社

北京西四羊市大街地質部內

北京市書刊出版业营业許可証出字第050号

发行者 新华書店科技发行所
經售者 各地新华書店
印刷者 地質出版社印刷厂

北京安定門外六鋪二40号

印数(京)1—2000册

1960年6月北京第1版

开本787×1092¹/₃₂

1960年6月第1次印刷

字数45000

印张2¹/₁₆

定价(10) 0.30元

目 录

序言

1. 放射性矿石的伽玛辐射	7
2. 单向伽玛辐射的区分	14
3. 影响伽玛取样结果的因素	23
4. 其他伽玛取样和孔内伽玛取样	29
(1) 其他辐射取样	29
(2) 其他伽玛取样	30
(3) 孔内伽玛取样	32
5. 仪器和辅助设备	33
6. 辐射仪的校正	38
7. 换算系数的确定	42
8. 伽玛取样方法和技术	47
(1) 带屏伽玛取样	47
(2) 薄矿体的带屏取样	50
(3) 孔内伽玛取样	51
(4) 伽玛取样中的编录和报告资料	52
9. 伽玛取样的检查	53
10. 伽玛取样的应用	59

参考文献

附表

序 言

根据鈾矿石和釷矿石的放射性輻射，不仅可以用實驗室放射性測量方法确定矿石中鈾和釷的含量，而且还可以用放射性測量方法直接在天然产状矿体上测定其含量。根据伽瑪輻射强度确定天然产状矿体中放射性元素含量和矿体厚度的方法称为放射性伽瑪取样（也称輻射取样或物探取样——譯者注）。按广义而言，輻射取样也包括伽瑪測井；利用伽瑪測井可以获得用于計算放射性元素儲量的定量解释数据。

本指南中所論述的伽瑪取样方法基本上是1946年—1948年間由 А. Г. 格拉馬科夫、В. И. 巴兰諾夫、В. Л. 沙什金、М. В. 希里亚耶娃和 М. Д. 布里塔也夫所研究成功的一种方法。以后其他物探工作者和地質工作者也对該种方法的理論和工作方法方面进行了研究。

在进行伽瑪取样时，伽瑪輻射的測量是根据矿化特点按一定測网进行的；并借助于專門的鉛屏把被測地点的伽瑪輻射与外部輻射屏蔽隔离起来，使之外部伽瑪輻射不致影响測量結果和測量准确性。

此种方法适用于对单組份的鈾、釷或鉀矿石进行取样，但該方法目前仅在鈾矿方面得到了广泛的采用。本指南中着重闡述輻射取样在平衡的鈾矿床上的应用。在不平衡的矿床（放射性平衡破坏了的矿床——譯者注）上运用伽瑪取样时，必須进行一些确定放射性平衡位移的研究工作，因为鈾和鐳之間放射性平衡的破坏和射气的扩散能够造成用輻射取样方法确定鈾含量的錯誤。

为了消除平衡破坏的影响，最近几年正在試驗采用貝他

(β) 射綫取样和貝他一伽侶射綫綜合取样。后一种方法类似于實驗室中采用的貝他一伽侶方法[1、12、13]；在某些情況下，当和氡之間的放射性平衡破坏时，用此种方法可以确定鈾含量。但是，由于貝他射綫和伽侶射綫的穿透性能相差很大，造成了在天然产状条件下比較岩石貝他射綫放射性測量結果和伽侶射綫放射性測量結果的困难，再加之其他一系列因素的影响，使这种方法目前还不能广泛地应用于实际工作中。

除了沿山地工程表面进行的带屏伽侶取样（即在測量时儀器的探測器上帶有鉛屏——譯者注）之外，还采用孔內伽侶取样，这种方法在很大程度上与进行定量解釋的伽侶測井相似。在有利的地質条件下，孔內伽侶取样可能会是一种最适合的取样方法，特别是在能够利用爆破炮眼的情况下，采用此种取样更为有利。

伽侶取样簡單、成本低，而且可以直接在測量地点取得測定結果，这样便为伽侶取样的广泛采用开辟了道路。此种方法可作为一种快速取样方法使用，借助于这种取样能够对矿石的質量进行快速检查。

最近几年，伽侶取样已經在各种地質条件下經過了实践的驗證；目前在地質勘探工作中，特别是在开采鈾矿床工作中广泛地采用此种取样方法。

伽侶取样結果与采用最广的刻槽取样結果的比較証明，甚至在矿化不均匀的矿床上，如果矿体中鈾、鐳之間放射性平衡沒有显著破坏时，伽侶取样也能提供較好結果（按平均值計算比較），其准确性不次于刻槽取样，而刻槽取样还必须采取样品，然后才能对样品进行分析。

由于伽侶取样方法越来越广泛地推广采用，因而出版一

本有关此种放射性测量工作的专门工作指南就非常必要了。

在该指南中，作者的任务是对伽玛取样方法作详细和全面的阐述，从方法的物理基础讲起到取样结果的检查问题終了。编写本指南的目的在于向读者——物探工作者和地质工作者提供有关取样方法理论和实际应用的概念。指南中对放射性测量方法的一般问题和放射性测量仪器来作论述，有关这些问题读者可参考其他资料[1、3、13]。

对取样方法的一般问题（如在山地坑道中样品的排列位置、取样网的选择等）也来作阐述，因为在现行指南中[17]已对这些问题进行了详细论述。

Д.Я. 苏拉斯基、Ю.П. 布拉谢维奇、Г.П. 塔菲也夫、П.К. 科罗文、А.И. 尼科诺夫；М.М. 索科洛夫、Л.Н. 波西科莫、С.А. 苏彼、В.И. 加尔金、С.А. 沙弗兰诺夫审阅了本指南，并提出了一些宝贵意见；为此作者特向他们表示深厚谢意。

指南的总校订由 Д.Я. 苏拉斯基和 А.И. 尼科诺夫完成。

1. 放射性矿石的伽玛辐射

为了正确解决伽玛取样工作中的测量方法问题（计数管类型的选择、探管厚度的选择等）和对所取得的结果进行解释，对被测量的伽玛辐射必须具有明确概念。

在铀系中，伽玛辐射主要与 $UX_1 + UX_2$ 和 $Ra (B+C)$ 有关。对能谱的硬辐射部分而言，例如在用 GI 型计数管测量时， $Ra (B+C)$ 的伽玛射线几乎占总放射强度的 98%；在用 BC 型计数管或闪烁计数管（器）测量时， $UX_1 + UX_2$ 的软伽玛辐射的作用将增大。 $Ra (B+C)$ 的伽玛辐射由不同能量（由 0.2 至 2.4 兆电子伏特）的光子组成。从 $UX_1 + UX_2$ 和氢衰变产物的伽玛辐射比例关系中可以看出，对铀矿石所进行的伽玛取样实际上是确定矿石中氢的含量，因而铀与氢之间的放射性平衡破坏^①能够造成根据伽玛测量确定铀含量的错误。

钍系元素的伽玛辐射主要与 $MsTh_2$ 和 $Th (G+G')$ 有关，由能量 0.13 至 2.62 兆电子伏特的光子组成。在天然条件下，钍系中放射性平衡的破坏较少见。

钾的放射性同位素 K^{40} 也能够放射出伽玛射线。钾的伽玛射线的能量等于 1.46 兆电子伏特；但是按伽玛放射强度比较，一克钾仅相当于与其衰变产物处平衡状态的 $2 \cdot 10^{-4}$ 克铀。因此在对钾含量很少超过 3—5% 的放射性矿石进行取样时，钾的伽玛辐射可以忽略不计。

① 铀—钍之间放射性平衡的破坏，射气的扩散。

在大体积的矿石上进行伽倻取样或其他伽倻测量时所记录的伽倻辐射的能谱成分主要不是取决于天然放射性元素的伽倻射线的原始成分，而取决于伽倻射线在矿石或岩石中散播时所产生的散射伽倻辐射。

大家知道，对于能量为0.5至3兆电子伏特的伽倻量子来说，与基本上由轻元素构成的岩石的相互作用过程决定于康普顿散射。在体积足够大的放射性物质中产生伽倻射线的多次散射，当伽倻光子的能量减少到一定数值（与该岩石的平均原子序数有关）之后，伽倻射线的散射便以光电吸收而结束；而且岩石的平均原子序数越小，则具有一定起始能量的伽倻光子在其光电吸收之前所经受的散射次数越多。

由于某些研究者[6、9、18]对散射伽倻辐射进行了理论分析和实验研究，因而可以对铀、钍矿石饱和层的伽倻辐射能谱作出特性曲线（图1）。

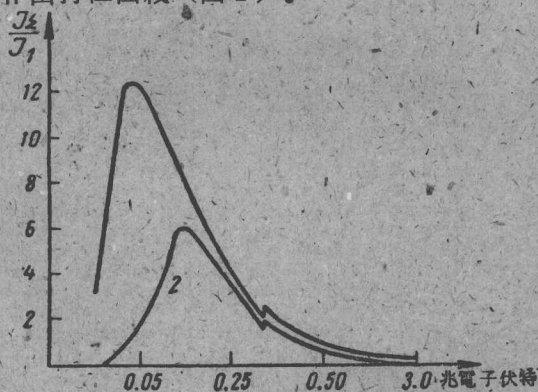


图1. 原始伽倻辐射能量为2.55兆电子伏特时在同质的辐射—吸收介质中总和散射伽倻辐射的能谱强度
1—煤；2—花岗岩（根据Г.М. 沃斯科博依尼科夫资料）。纵坐标——以原始射线强度单位表示的能谱强度；横坐标——以对数比例尺表示的散射量子的能量

这些飽和层的能量大于0.5兆电子伏特的硬伽玛辐射为强度較小的散射伽玛射线的連續譜，在这个連續譜中原始伽玛射线的高强度譜綫将特別显示出来。硬伽玛辐射的强度和能譜成分实际上与岩石成分无关^①（鈾或釷含量超过5%的富鈾矿石和富釷矿石例外）。在該部分能譜范围内，鈾系和釷系的原始伽玛辐射中的差別仍然完全保持不变。

在能量小于0.5兆电子伏特的軟伽玛辐射范围内，被岩石所散射的伽玛射线强度随着量子能量的减少而迅速增大，而且原始伽玛辐射的单能譜綫在連續譜中完全消失。在該辐射范围内，岩石的伽玛辐射强度和能譜分布实际上与原始伽玛辐射的成分无关，对鈾矿石和釷矿石來說都是相同的。

由此可見，对所有的岩石來說（除了富鈾矿石和富釷矿石外），随着岩石成分的不同所产生的伽玛辐射强度的变化实际上完全是由最軟伽玛辐射（主要是能量小于0.25兆电子伏特的辐射）的强度变化所造成的。从这里便得出了一个重要的結論：在用对軟伽玛射线不灵敏的計数管（GC型計数管）或用外部加有屏蔽层（即計数管的探管用原子序数較大的材料制成，并且具有足够厚度能够防止軟伽玛辐射穿透）的計数管記錄伽玛辐射时，伽玛辐射强度实际上与放射层的成分无关。用充气計数管和閃爍計数管記錄的伽玛辐射的效应与伽玛辐射能量有关。图2是充气計数管和閃爍計数管^②的能譜灵敏度特性曲綫。

当天体积的放射性矿石的伽玛辐射的能譜成分比較繁雜

①因为岩石的平均原子序数可算为固定不变的。

②閃爍計数管的灵敏度根据計算数据列出。

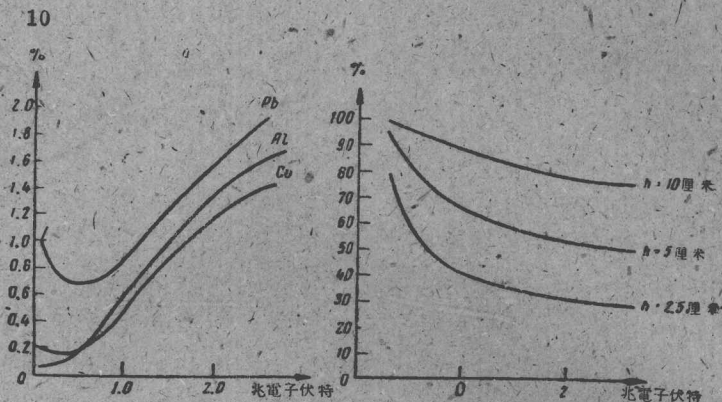


图2. 计数管效应与伽偶辐射能量的关系
a—阴极用不同材料制成的充气计数管；b—直径为5厘米的不同高度 h 的闪烁计数管

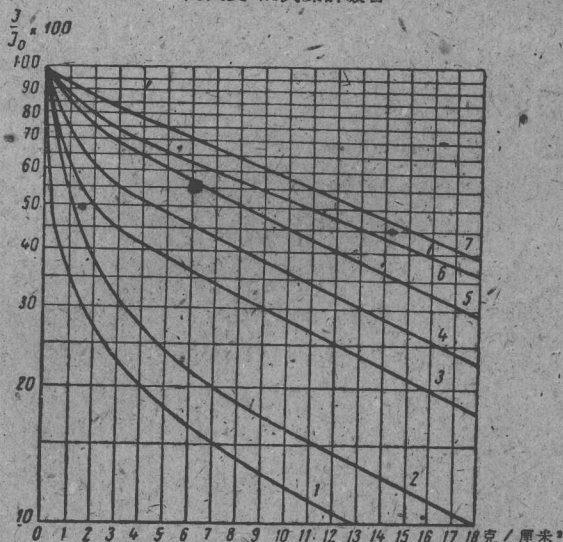


图3. 用不同计数管所测定的在圆筒铅屏中铀矿石矿层的伽偶辐射减弱曲线(铝制探管的壁厚为1毫米):

- 1—BC型计数管, 灰份为16%的煤; 2—BC型计数管, 矽酸盐岩石;
- 3—MC型计数管, 灰份为16%的煤; 4—MC型计数管, 矽酸盐岩石;
- 5—GC型计数管, 煤和矽酸盐岩石; 6—MC型计数管, 屏蔽点状镭源;
- 7—GC型计数管, 屏蔽点状镭源

时，被记录的伽玛辐射强度值的大小如何要看用何种计数管进行测量。用套在计数管探管上的圆筒式铅屏减弱伽玛辐射的实验可以证明上述观点。图3所列的伽玛辐射减弱曲线是用三种类型充气计数管（BC、MC和FC）在铀矿层模型上测定的。BC型计数管的阴极是钨制的，MC型的阴极是铜制的，FC型的阴极是石墨制的。在计数管所记录的总和辐射中，其他辐射占3—4%。

在用对能量大致小于0.3兆电子伏特的软伽玛射线很灵敏的BC型计数管测量时，在曲线的开始部分铅屏对伽玛辐射的减弱较显著，这说明在铀矿石矿层的伽玛射线能谱中有很多软伽玛辐射，这些软伽玛辐射大部分被将近2克/平方厘米厚的屏所吸收。在用MC型计数管所测得的曲线上软伽玛辐射的影响也较显著；但是在用FC型计数管测量时，几乎看不出什么影响，这种计数管实际上不记录软伽玛辐射。

铀矿石无限矿层的伽玛辐射的能谱成分与岩石的平均原子序数的关系，可以从用BC型和MC型计数管在矽酸盐岩石上和灰份较少的煤层上测得的减弱曲线的差别看出。在煤中，和在其他原子序数较小的介质中一样，软散射伽玛辐射的成分较多。在用FC型计数管测量时，在这些岩石上所测得的伽玛辐射减弱曲线的差别实际上将消失。

在根据伽玛射线进行各种定量放射性测量时（其中也包括辐射取样），根据伽玛辐射仪的校正结果将伽玛辐射强度用微伦琴/小时表示[1、2、12、13]。

在校正仪器时应保证适当的校正条件，以使被校正的计数管仅仅记录镭源的原始伽玛射线[2、18]。

① 线体积的增加不再引起伽玛辐射增高的矿层为伽玛射线《无限》矿层或饱和层。

鋁探管中的各种計数管的灵敏度

表 1

計 数 管	BC-4	MC-4	TC-4
$\frac{\text{脉冲/分}}{\text{微倫琴/小时}}$	9.9	4.7	5.3

由于体积相同但阴极材料不同的計数管的能譜灵敏度有一定差別,因而它們的积分灵敏度(以 $\frac{\text{脉冲数}}{\text{I 微倫琴/小时}}$ 表示)也各不相同。表 1 中列出了对装在壁厚 1 毫米的探管中的不同計数管一个微倫琴 / 小时每分鐘所造成的大致脉冲数 (点状鐳源)。

由于鐳标准源和大体积的鈾矿石 (例如在天然产状中) 的伽伐輻射能譜之間有一定差別,因而在用不同类型計数管测量时或用同一类型計数管但輻射仪探管厚度不同时,同一个矿层的伽伐輻射强度却用不同的微倫琴/小时数量表示出来。这說明微倫琴/小时仅仅是輻射强度的假定单位。

在对伽伐测量結果进行定量解释时,換算系数的数值具有很大意义;換算系数說明在 γ -射綫沿走向和厚度达到飽和的鈾矿石飽和层表面上 (半无限矿层) 或在飽和层內 (无限矿层) 所測得的 γ -輻射强度和岩石中鈾含量 (与其衰变产物处于平衡状态的鈾) 的关系。

根据上述可知,換算系数值大小取决于輻射仪探管的厚度,而在使用薄探管工作时系数值則又取决于計数管的阴极材料和岩石成分。表 2 中列出了在鈾矿石矿层模型上所測得的实验数据。这些数据适应于平衡的和没有射气扩散的矽酸盐成分的矿石。

各种計数管的換算系数

表 2

矿层特点	微倫琴/小时 換算系数 0.01%U					
	探管1毫米Al			探管1毫米Fe+3毫米Pb		
	計 数 管 类 型					
	ГC	MC	BC	ГC	MC	BC
无 限 矿 层	89	144	234	70	74	77
半,无 限 矿 层	43	56	79	36	39	37
无限矿层的系数与半无限矿层系数的比值	2.07	2.57	2.96	1.96	1.90	2.08

无限矿层的系数实验值与理论值很相符合。根据Г. М. 沃斯科博依尼科夫的计算，对花岗岩来说，在用铜阴极的计数管测量时无限矿层的系数等于140微伦琴/小时，在用铅阴极的计数管测量时则等于240微伦琴/小时；这一点更证明了上述有关大体积铀矿石的伽玛辐射能谱成分的概念的正确性。由这些概念中可以看出，对BC型和MC型计数管来说，在探管壁比较薄的情况下，岩石的平均有效原子序数 Z_{ϕ} 越大，无限矿层的系数越小。计算证明，用铜阴极计数管测量时，对铀含量为0.1%的无灰份煤（ $Z_{\phi}=6.9$ ）来说，无限矿层的系数等于 $\frac{214 \text{ 微伦琴/小时}}{0.01U\%}$ ，对晶质铀矿（ $Z_{\phi}=8.6$ ）来说则等于 $\frac{47 \text{ 微伦琴/小时}}{0.01U\%}$ 。

由于测量的几何条件的不同，无限矿层的系数应比半无限矿层的系数大一倍。实际上在用对软伽玛辐射灵敏的计数管测量时，这些系数之间的比值大于2（见表2）。在钻孔

或炮眼条件下(无限矿层)进行测量时, 辐射强度的偏高与反向散射的伽玛射线的影响有关; 此种散射伽玛射线是以大于 $\pi/2$ 的角度(入射射线的方向和散射射线方向之间的角度)被散射出来的射线。表 2 中列出了无限矿层的系数值和半无限矿层系数值的比值。在辐射仪的探管较厚的情况下, 由 Γ C 型计数管转换为 BC 型计数管时这个比值将显著增大, 这说明反向散射射线的能量是较低的。在用 Γ C 型计数管测量和用较厚探管屏蔽计数管时, 实际上觉察不到反向散射射线的影响。

根据上述可以作出结论: 在使用对软伽玛辐射灵敏的、外部仅有一层薄探管的计数管测量时, 必须考虑被记录下来的伽玛辐射强度与岩石的平均原子序数、计数管阴极材料和辐射仪探管壁厚的关系, 并采用根据实验所确定的能将伽玛辐射强度换算成岩石中放射性物质含量的换算系数。根据硬伽玛辐射进行定量测量较为适宜。在进行此种测量时采用对软伽玛辐射不灵敏的计数管(如 Γ C 型计数管)或任何类型的充气计数管^①, 但计数管的外部必须屏蔽有壁的总厚近 3—4 克/平方厘米的探管。

在这种情况下, 具有中等原子序数的岩石成分将不会影响伽玛辐射强度的测量结果。

2. 单向伽玛辐射的区分

辐射取样的任务是在被研究地区的一定地段上的天然产状矿体上确定放射性元素的平均富集量^②和矿体厚度。为了

① 本指南中没有研究关于运用闪烁计数管的问题。

② 在取样工作中常以术语“含量”代替术语“富集量”。

完成这个任务，必須从辐射仪所测量的总伽玛辐射中区分出取样者所要测量的那块岩石地段的辐射。采用各种鉛屏或定向测量辐射仪即可达到此种目的。

根据用途不同鉛屏可分为下列两种类型：①部分吸收被测地点辐射的鉛屏，②部分吸收周围岩石辐射的鉛屏。

在伽玛取样的实际工作中通常采用属于第一种类型的直角角柱形的平板式鉛屏和包括两种类型鉛屏要素的帶衬条的圓筒式鉛屏。

現在我們較詳細地研究一下在使用第一种类型鉛屏时区分被测地点的单向辐射問題。假定在同質飽和层之上的不大高度上放置一个测量岩石伽玛辐射的仪器（见图4）。仪器的中心与O点相符合。

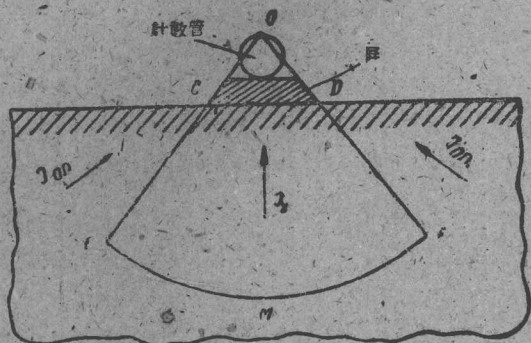


图4. 测量伽马辐射强度时计数管和屏的位置示意图

O点中的辐射由岩石的CDFME段的辐射、相邻地段的辐射和周围岩石的辐射及仪器底数組成。这样，仪器所测量的总和辐射强度值 I_z 便可用下列加数式表示：

$$I_z = I_x + I_{on} + I_{\Phi} \quad (1)$$

式中： I_x ——CDFME层在O点造成的伽玛辐射强度（微伦琴/小时）；

I_{on} ——相邻地段、对应壁和侧壁及坑道中空气的辐射强度，即除了底数之外的其他全部辐射（微伦琴/小时）；

I_d ——底数辐射（微伦琴/小时）。

我們在仪器和岩石表面之間放置一个能部分地吸收岩石伽玛辐射的屏，并且使仪器离地面的高度保持固定不变。被屏所吸收的和散射的辐射为 I_x 辐射的某一部分 $\alpha < 1$ 。

因而在有屏的情况下，仪器所测量的辐射强 I_2 将少于 I_1 并可用下式确定：

$$I_2 = (1 - \alpha)I_x + I_{on} + I_d, \quad (2)$$

式中： $(1 - \alpha)I_x$ ——穿过屏而射到接收器上的辐射强度（微伦琴/小时）。

因此
$$I_1 - I_2 = \alpha I_x. \quad (3)$$

这样，被屏所减弱的辐射应该与被屏蔽的岩石段CDFME的辐射成比例。CDFME层的辐射为同一放射性物质含量和同一矿物成分的无限走向矿层的辐射的某一部分

$\left(\frac{1}{\beta}\right)$ ，因此将 I_x 值乘以 β 便可得到无限走向层的辐射强度 I_∞

$$I_\infty = \frac{\beta}{\alpha}(I_1 - I_2), \quad (4)$$

而且 $\beta > 1$ 。

大家知道，飽和层表面上的伽玛辐射强度以下式表示：