

普查金属矿床的 航空伽玛能谱测量方法

(方法指南)

〔苏〕 В. П. 沃罗比约夫
A. B. 叶菲莫夫 等著
M. И. 阿里特舒列尔

地质出版社

普查金属矿床的 航空伽玛能谱测量方法

(方法指南)

〔苏〕 B. II. 沃罗比约夫
A. B. 叶菲莫夫 等著
M. И. 阿里特舒列尔

张文斌 徐 岩 译
崔霖沛 吴荣祥 校

地质出版社

内 容 提 要

本书介绍航空伽玛能谱测量普查金属矿床的地质依据、方法的物理依据、苏联仪器、测量工作方法、航空伽玛能谱测量资料初步处理的方法以及数据自动处理的设备和方法。阐明了用于普查金属矿床的航空伽玛能谱测量资料在野外及室内期间的推断解释方法并叙述了在初步解释阶段机载分类装置 БУК—4 和乘-除装置 МЦУ 的使用方法。详细地分析了经实践证明行之有效的解释航空伽玛能谱测量信息的模式识别统计方法。

书中描述了作为普查最后阶段的航空伽玛能谱异常地面检查的方法。阐述了在普查若干重要矿产原料（锡、金、钽、钼、钨、铝土矿等）时航空伽玛能谱测量方法的应用特点。

书中还介绍了应用航空伽玛能谱测量方法普查各种金属矿床的具体工作方法。

本书可供从事矿产普查的物探、化探及地质人员使用。

АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОИСКОВ РУДНЫХ МЕСТРОЖДЕНИЙ

Методическое руко Воство

Авт. В. П. Воробьев, А. В. Ефимов,

М. И. Альшулер и пр.

Ленинград

«НЕДРА» ЛЕНИНГРАДСКОЕ

ОТДЕЛЕНИЕ 1977

普查金属矿床的 航空伽玛能谱测量方法

(方法指南)

[苏] В. П. 沃罗比约夫
А. В. 叶菲莫夫 等著
М. И. 阿里特舒列尔

张文斌 徐岩 译
崔霖沛 吴荣祥 校

*

责任编辑：殷德钧

地质出版社出版

(北京 西四)

张家口地区印刷厂印刷

(河北省张家口市)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本：850×1168 $1/32$ 印张：6 $3/4$ 字数：175,000
1985年11月北京第一版·1985年11月张家口第一次印刷

印数：1—1,380册 定价：1.95元

统一书号：13038·新169

前 言

航空伽玛能谱测量方法，借助于安装在飞行器（飞机、直升飞机）上的设备，研究近地表岩层中铀（镭）、钍和钾的面积平均含量。第一台普查用苏制航空伽玛能谱仪（АГГ—48型综合站的组成部分）是在六十年代初制造出来的，然而，测量方法在六十年代末、七十年代初在全国航空物探工作技术更新（АГГ—48М、АГГ—48М2型综合站）的基础上才得到了大规模推广。1970年研制出ГСА—70型高精度航空伽玛能谱仪，它的技术指标达到世界上最好产品的水平。称为АГГ—71с的仪器，是АГГ—71新型综合站的组成部分，这种综合站于1975年开始批量生产。应当指出，早在1971—1975年期间已经有相当多的航测队使用ГСА—70型样机进行了测量。

在研制仪器的同时，深入研究和完善了航空伽玛能谱测量的工作方法。适用于铀矿床普查的那些研究成果，在方法指南〔4〕中曾加以阐述。

随着航空伽玛能谱测量工作经验的积累，可以清楚地看到，该方法解决地质问题的潜力还相当大。生产实践向航空伽玛能谱测量提出了新的任务，其中最重要的是普查有色、稀有和贵金属矿床。

普查金属矿床的航空伽玛能谱测量方法的很多特点在现有方法指南中没有反映出来。由于对某些问题研究得不够充分，或与此相反，由于某些问题在出版的文献中已有详细阐述，所以在本书中并没有对航空伽玛能谱方法中的所有问题都讲得一样详细。有两个重要问题完全没有涉及：（1）根据航空伽玛能谱资料进行地质填图；（2）航空伽玛能谱测量与其它航空物探方法的综

合应用——这两个问题远远超出本书题目的范围。

本书中讨论了应用航空伽玛能谱测量普查金属矿床的地质依据：不同成因类型矿产的成矿元素与放射性元素的共生关系，以及在各种不同景观条件下“含矿的”放射性地球化学异常所经历的那些变化。从而介绍了研究对象，而用航空伽玛能谱测量普查矿化的实质就在于圈出并评价这种对象。书中还叙述了航空伽玛能谱测量方法的物理依据和批量生产的航空伽玛能谱测量仪器以及机载分类装置БVK—4和乘-除装置(МДУ)，介绍了航空伽玛能谱测量的工作方法和测量结果的初步处理方法；提出了根据地质任务选择航空伽玛能谱测量的测区和比例尺的标准。放射性元素含量图的绘制精度具有特殊的意义，因此，详细地研究了仪器的标定和航空伽玛能谱测量结果的调平等问题。

使用电子计算机对航空伽玛能谱测量数据进行自动处理的设备和方法将在第Ⅳ章中叙述。与手工整理资料相比，计算机处理资料的优越性是人所共知的。然而，为了最有效地应用电子计算机，必须记录飞行器的瞬时座标，这在目前只是在能够利用无线电定位进行航空伽玛能谱测量的平原地区才有可能。航空伽玛能谱测量数据的有效电子计算机解释系统目前尚处在研制阶段。

应当指出一个重要情况：任何一种航空伽玛能谱测量资料的计算机处理系统，在近期内只能在室内阶段实现，不能保证随时地划分出有远景的航空伽玛能谱异常，然而这对于在航测的同时进行地面检查却是必需的。

因此，航空伽玛能谱测量资料解释的自动化应当朝着两个互相关联的方向发展：（1）用电子计算机处理资料；（2）使用机载分类装置，在记录航空伽玛能谱测量资料的同时形成关于远景性的信号。

本书还给出适用于普查金属矿床的航空伽玛能谱测量资料的解释方法。根据航空伽玛能谱测量工作的任务，解释分两个阶段

进行：初步（野外）阶段——及时划分出作地面检查的异常；最终（室内）阶段——要求从更加精确的资料中最充分地提取地质信息。

本书中讨论了在初步解释阶段使用机载装置 БУК—4 和乘除装置 МДУ 的方法。详细分析了经实践证明行之有效的用于资料解释的模式识别的统计方法。简述了航空伽玛能谱场的无标准分类方法的功能。

本方法指南由下列作者集体编写：沃罗比约夫（В. П. Воробьев—前言、结束语及 I、II. 1、II. 4、III、IV. 3、IV. 6 等章节）、叶菲莫夫（А. В. Ефимов—I. 4、II. 1、II. 4、IV. 5、V、VI. 2、VI. 4）、阿里特舒列尔（М. И. Альтшулер—II. 3、VI. 5）、瓦维林（Л. Н. Вавилин—II. 2、II. 3）、泽列涅茨基（Д. С. Зеленецкий—IV、V. 4）、克拉夫苏特（В. Ф. Клавсут—VI. 1）、克留科夫金（С. Л. Клюковкин—II. 2、II. 3）、拉乌宾巴赫（А. И. Лаубенбах—VI. 7、VI. 8）、谢苗诺娃（О. Г. Семенова—IV、V. 5）、斯科瑟列娃（Л. Н. Скосырева—VI. 7、VI. 8）、斯拉维亚基娜（И. И. Славягина—VI. 7、VI. 8）、菲利莫诺夫（В. В. Филимонов—II. 2）、福格特（П. Н. Фогт—I）。

本书中所利用的资料是作者们在共同工作或许多生产单位的航空物探队协作的过程中所获得的。在研究普查性航空伽玛能谱测量问题方面，赤塔地区地质局、远东地区地质局的航测队及西方物探托拉斯第一野外大队的工作人员作出了巨大的努力。

在编写本方法指南过程中利用了库兹明（Г. И. Кузьмин）、皮涅金（Ю. Д. Пинегин—“地球物理”科研生产联合公司）、伊斯托明（В. И. Истомин）、萨丘诺夫（Н. В. Сачунов）、普罗科卜丘克（Г. Н. Прокопчук—赤塔地区地质局）、日丹（Н. К. Ждан）、古利亚耶夫（Б. И. Гуляев）、兹多里钦科

(В. П. Здориченко—远东地区地质局)、卡尔布什金 (В. Т. Карпушкин—滨海地区地质局)、叶列姆 (Г. А. Ерем)、卡尔梅科夫 (Д. В. Калмыков—西方物探托拉斯)、赫瓦洛夫斯基 (А. Г. Хваловский)、科特列亚列夫斯基 (Л. Н. Котляревский—塔什干地质托拉斯) 的航空伽玛能谱测量资料, 作者对所有上述人员深表谢意。

作者对费丁斯基 (В. В. Федьнский)、切鲍塔廖夫 (М. В. Чеботарев)、斯米尔诺娃 (З. И. Смирнова)、尼基特斯基 (В. Е. Никитский)、费久克 (В. И. Федюк)、赫罗莫夫 (Ю. В. Хромов)、沙茨金 (К. А. Шацкин—苏联地质部)、勃列季欣 (И. С. Бредихин)、基谢廖夫 (М. И. Киселев)、丘基诺夫 (Ю. Л. Чудинов—俄罗斯共和国地质部)、沃尔科夫 (В. А. Волков—哈萨克共和国地质部)、奥戈罗德尼科夫 (В. Д. Огородников—赤塔地区地质局)、伊万诺夫 (Г. И. Иванов)、尚岑 (К. А. Шанцын—远东地区地质局)、钦佐夫 (Н. П. Ченцов)、克柳耶夫 (В. К. Ключев)、卡什塔耶夫 (Б. И. Каштаев—滨海地区地质局)、巴勃金 (П. В. Бабкин)、斯塔罗沃伊托夫 (В. Н. Старовойтов—东北地区地质局)、克里莫夫 (В. И. Климов—萨马尔罕地质托拉斯)、鲍勒古尔采夫 (Н. Н. Болгурцев)、别利亚耶夫 (В. М. Беляев—西方物探托拉斯)、谢尔久科夫 (М. И. Сердюков)、卡尔佩耶夫 (И. П. Карпеев—哈萨克矿物原料研究所) 等人在研究工作中所给予的帮助表示感谢。

目 录

前 言	(I)
I. 应用航空伽玛能谱测量普查金属矿床的地质-地球 化学依据	(1)
I.1. 成矿元素和放射性元素的共生关系	(1)
I.2. 含矿建造的主要放射性地球化学特点	(4)
I.3. 放射性元素在表生带中的迁移	(14)
II. 航空伽玛能谱测量方法的物理依据和用于航空物探 综合测量的仪器	(17)
II.1. 岩石的伽玛辐射及其测定方法	(17)
II.2. 铀(钍)、钍和钾分开测定的依据	(19)
II.3. 航空物探仪器	(24)
II.4. 对航空伽玛能谱测量结果作初步解释的机 载装置	(26)
III. 航空伽玛能谱测量的工作方法和资料的处理方法	(29)
III.1. 航空伽玛能谱测量的用途、测量比例尺及 如何确保普查方针的执行	(29)
III.2. 航空伽玛能谱测量的工作方法	(32)
III.3. 航空伽玛能谱测量资料的处理	(59)
III.4. 金属矿床上的方法试验工作	(66)
IV. 应用M-222型电子计算机自动处理资料	(69)
IV.1. “航空综合”系统的数学保证	(70)
IV.2. “航空综合”系统的处理程序	(75)
V. 在矿产普查中航空伽玛能谱测量资料的解释	(87)
V.1. 总 则	(87)

V.2. 野外解释	(88)
V.3. 最终解释	(96)
V.4. 以模式识别方法为基础的解释	(97)
V.5. 采用无标准分类方法进行解释的可能性	(105)
VI. 航空伽玛能谱测量异常的地面检查	(108)
VI.1. 总 则	(108)
VI.2. 异常检查的步骤	(111)
VI.3. 异常的初步检查	(112)
VI.4. 异常的详细检查	(115)
VII. 航空伽玛能谱测量方法在普查不同种类矿床时的应用特点	(122)
VII.1. 稀有金属碳酸盐岩矿床	(122)
VII.2. 稀有金属钠长岩矿床	(126)
VII.3. 锡、钨、钼云英岩矿床	(134)
VII.4. 金、钼中温热液矿床	(147)
VII.5. 锡石-硅酸盐-硫化物建造组矿床	(159)
VII.6. 金-银建造低温热液火山岩矿床	(174)
VII.7. 铝土矿床	(182)
VII.8. 生物化学成因的沉积矿床 (以磷块岩为例)	(190)
结 束 语	(199)
参 考 文 献	(201)
附 录	(206)

I. 应用航空伽玛能谱测量 普查金属矿床的地质-地球化学依据

I.1. 成矿元素和放射性元素的共生关系

从地球化学观点看来,所有的矿床都是综合性的。在金属矿体或它们的外围除了形成有工业价值堆积的元素以外,还集中了很多其它元素(有时达几十种),其中也有放射性元素。如果放射性元素和成矿元素的聚合是稳定的,而且在大多数(甚至全部)同类型矿床中都是如此,那么,就可以通过航空伽玛能谱测量方法利用这种聚合圈定含矿区。

稳定的地球化学聚合只能是共生聚合,而且,这里所谓的共生关系应理解为放射性地球化学异常与成矿作用之间在空间上的密切联系,这种联系受其成因的共同性制约:发生在同一矿化阶段,即同一成矿作用过程中。因此,航空伽玛能谱测量找矿法是根据伴生元素普查矿化的地球化学方法的特殊形式,这种方法长期以来已经成功地应用于找矿实际工作中^[21, 69]。

考虑到放射性元素与矿化之间为共生关系的特点,应当以含矿建造——“具有共同结构、在统计学上稳定的共生聚合体(岩石、矿)”作为符合航空伽玛能谱法普查要求的矿床分类的基础^[61]。建造的结构是由分带性(组成建造的共生关系在空间上的规律性分布)所决定的。放射性元素的异常含量或它们的异常比值可能是任何一种或其中某几种共生关系的固有特性。要想使几种共生关系在空间完全分隔开来,任何时候都是不能实现的,有些矿物组合或多或少地都迭加在较早期的形成物上,这使得矿

床上放射性异常的分布呈错综复杂的局面。由此可以得出结论，航空伽玛能谱法普查的对象不是矿体或含矿带，而是整个矿田，即地面上显示成矿作用各阶段（期）的地段，即矿体、交代蚀变岩石及原生分散晕的总和。

矿田规模大小不一：由几分之一平方公里到10平方公里，但通常为2—4平方公里。因此，矿床和远景地段可以根据面积性航空伽玛能谱异常划分出来。这种含矿建造所固有的放射性地球化学特点，在矿床上远比在矿点和矿化点上表现得明显。这是可以理解的，因为矿床是复杂的、在长期过程中形成的产物，而与此同时，小矿点通常是经过1—2个矿化阶段形成的。因此，航空伽玛能谱法普查的目标是成矿物质的大规模堆积。

在矿田范围内，矿带和放射性元素含量最高地段的空间关系可能是各种各样的。如果成矿作用和放射性成矿作用系同一阶段发生，则放射性异常存在于矿体或原生分散晕之中，而如果它们分别形成于不同阶段，那么，放射性元素富集于相应的交代柱的带中，距离矿体几米到二、三百米远。第一种情况，比如说，在稀有金属碳酸盐岩和钠长岩矿床上是常见的，其中钽和铀集中于金属矿物中；第二种情况在大多数脉型热液矿床中可以见到。如果“最高值的错动”不大（不超过100米），那么，航空伽玛能谱测量就察觉不出来，而如果相隔达数百米，则在圈定远景地段时，应当考虑航空伽玛能谱异常的内部结构。在地面检查工作中必须考虑放射性地球化学异常和成矿作用的相对位置，否则，评价异常地段的含矿性时可能出现严重错误。

因此，当确定航空伽玛能谱测量方法用于普查某种矿产的前提时，必须判明在母体矿床上存在着面积性放射性地球化学异常并证实其与成矿作用有共生关系。

论证这种共生关系可以有几种方法。矿物分析有助于可靠地判定在成矿作用过程中所形成的矿物组合中是否有放射性矿物形成。遗憾的是，该方法的效能有限，因为只有钾总是组成单独的

矿物，而钍，特别是铀常常以非矿物形式出现。放射性异常在矿田带状分布中所处的位置是个通用标志。如果异常受矿化岩石带或近矿交代岩控制，则它们与矿化的成因上的共同性是存在的。而如果异常不分带，则放射性元素是在成矿作用的另一阶段被带进来的，并且两个阶段只是偶然地出现在同一矿田（我们知道有时铬铁矿体中有含铀岩脉穿插）。最后，地面或航空物探工作结果经统计处理后，有可能在若干同一类型金属矿床上发现相似的放射性地球化学规律，这显然反映矿床的成因特点。然而，要可靠地进行纯统计性评价就要求有有关大量矿床的数据，其数目远比研究人员通常所掌握的要多。

综合使用上述几种方法，我们就能单值地解决有关放射性地球化学异常与成矿作用之间关系的性质的问题，从而，也就能确定航空伽玛能谱测量方法对普查类似矿床是否适用。

不过必须注意到，这种关系的共生特点并不意味着航空伽玛能谱异常总是单值地对应于矿化地段。譬如说，当利用航空伽玛能谱资料普查热液矿床时，可以划分出控制该地区矿床的一定类型的交代岩（例如，云英岩、黄铁长英岩、变安山岩等）。大家知道，所有热液矿床赋存于交代岩带中，然而，逆论断是不正确的。根据同样的航空伽玛能谱异常所圈定的同一类型的交代岩可能含有、也可能不含有工业矿体。这种不确定性在原则上只用航空伽玛能谱测量是无法排除的，至于从空中划分出来的热液蚀变岩石中是否存在金属矿体的问题该由地面检查来解决。

根据航空伽玛能谱资料，除了划分局部（1—2平方公里）的可能含矿的地段外，还可以圈出面积达几十到几百平方公里的有找矿远景的较大地区。这时，利用矿化的岩浆或岩性控制。在普查生于母岩中或其外接触带的矿床^[51]时，对与成矿作用有关的侵入体进行填图具有重要意义；在普查生于一定层位的沉积矿床（如，含铜页岩或磷块岩）时，划分并追索容矿层位也同样重要。对于上述两种情况，只有当控制矿产分布的岩石具有特定的

放射性地球化学性质时，才有可能这样作。

在某些地区已经查明^[64]（而在另外一些地区则是假定）金属矿床有规律地分布在热液蚀变岩石的区域场中，这些热液蚀变岩石的放射性地球化学场还没有加以研究，不过要是存在异常，这种场同样可以用作为面积性航空伽玛能谱测量间接显示矿化的标志。

研究大面积的航空伽玛能谱异常作为能够预测矿化和筛选航空伽玛能谱异常的间接标志的工作，刚开始，而用之于找矿实际工作则是将来的事情。利用航空伽玛能谱资料目前还不能发现和评价更大的远景面积——成矿区和成矿带。这一方面是由于对成矿作用过程中铀、钍、钾的区域性分布规律缺乏任何理论性概念，另一方面也是由于航空伽玛能谱资料较少，暂时还不能通过纯经验的方法来查明这些规律。

应当考虑到，铀（镭）、钍和钾在岩石中的浓度在风化特别是成壤作用中发生明显的变化。在表生作用带中，铀和它的衰变产物（镭、氡）最为活泼，而钍最不活泼。上覆松散沉积物的厚度和成分以及其它地质因素对确定基岩中放射性元素含量的影响，下面将详细加以讨论。在潮湿和干旱气候地带的航空物探和地面物探工作经验证明：伽玛能谱测量方法能够发现矿床所具有的放射性地球化学异常，只要原地松散沉积物的厚度不超过2—3米。苏联山区的大部分地区和哈萨克斯坦、外贝加尔与其它区域的平原的广大面积都符合这一条件。

I.2. 含矿建造的主要放射性地球化学特点

对东西伯利亚、远东、东北地区、中亚细亚、哈萨克斯坦、外高加索和其它地区数十个矿床上的伽玛能谱资料的研究，以及对一些文献资料的概括，使我们能够提出放射性元素在各种不同矿床上的某些总的分布规律（表 I. 1）。

某些金属矿床的局部航空伽玛能谱特征 (面积为零点几到几平方公里)

表 I.1

放射性元素含量的增值, %			围 岩	有 用 矿 产	含 矿 建 造	备 注
$U(Ra), 10^{-4}$	$Th, 10^{-4}$	K				
<6	>20	0—5	碱性、碱性-超碱性火成杂岩、碳酸盐岩、变质岩	Nb, 稀土、Be	碳酸盐岩、碱性交代岩	Th/U >5
>8	>20	0—5	同上	Ta, Nb	同 上	
4—10	0—4	0—1	花 岗 岩	Ta(Nb), Be, Sn, W, Mo	变质花岗岩、云英岩	Th和U极值重合、 $\Delta Th/\Delta U \leq 1$
0—2	>6	0	铝硅酸盐岩	Sn, W, Nb	云 英 岩	伴随变质花岗岩含矿建造的异常
2—6	0—4	2—5	花岗岩类、酸性喷发岩	Mo, Au, Pb, Zn	辉钼矿-铜云母、金-硫化物及硅酸盐岩中的多金属建造	K和U极值不重合 哈萨克斯坦(Хантөрәнтә)和佩尔茨纳格利内(Персонага-Пелнага)型 滨海和远东 K和U极值不重合
			中性和基性岩	Au, Cu—Mo	铜-钼、金-硫化物	
			变质岩和沉积岩	Au, Sn (Pb, Zn)	锡石-硫化物、金-硫化物、金-石英建造(?)	
0—1	4—10	2—4	沉积岩、酸性和中性喷发岩	Sn, (Cu, Pb, Zn)	锡石-硅酸盐岩、锡石-硫化物	
0—2	0	>2	中性和酸性喷发岩	Au, Ag	金-银-火山岩(低温热液)、多金属-火山岩(低温热液)	K和U极值不重合
0—4	>4	-2—0	沉 积 岩	Al, 稀土, Nb, Ta	铝土矿、红土、风化壳砂矿	Th/U >5
>4	0	-1—0	同 上	Cu, 磷酸盐原料	含铜页岩、磷块岩	U/Th >1

所有放射性元素——铀、钍和钾都是亲石元素，在岩浆分异过程中，它们的含量从基性岩向酸性岩和碱性岩剧增。因此，与基性和超基性岩有成因联系的火成金属矿床（Pt、Cr、Ti、V、Cu、Ni），其中铀、钍、钾含量低，变化不大，因为形成母岩的岩浆就是如此。

在碱性超基性杂岩中，放射性元素含量增高1—2倍，并且由于以钍的富集为主（ $\text{Th}/\text{U} = 7$ 或更高），这就决定了碱性超基性杂岩的钍专属性^[55、22]。岩浆作用的晚期为富含钾（达10%）的碱性岩。在与碱性超基性杂岩有关的碳酸岩体中赋存着稀有元素、主要是铌和稀土元素的巨型矿床。这些矿床上有强的伽玛异常以及铀（0.0n%）、钍（达0.n%）含量高，在岩石放射性研究的早期业已查明^[23、82]。

碳酸岩的稀有金属矿化属于两种含矿建造：铀钍钨矿-烧绿石建造和钨铁矿-氟碳铈矿建造^[20]。在铀钍钨矿-烧绿石矿床中，钍-铌（铀钍钨矿）和铌（烧绿石）矿层常常在空间上分开。在钍-铌矿层中富集有铀和钍，而在铌矿层中主要是钍。钍和铀含量之间有正相关关系，使我们有可能利用伽玛能谱测量方法圈定矿体并粗略地估计它们的成分。铌-稀土矿体（钨铁矿-氟碳铈矿建造）具有由钍引起的高放射性。稀有金属和放射性元素在碳酸岩周围的岩浆岩发生交代改造作用时部分地被淋滤出去，而部分成矿物质（其中包括钍和铀）被矿液从深部源带进来^[20]。

可以看出，第一期的碳酸岩（不含矿的）实际上按放射性元素的含量与围岩没有区别；在第二期形成稀有金属和铀-钍矿；在第三、四期成矿元素和放射性元素重新分布并都被带出，同时，钍比钍被带出得更快，从而 Th/U 比值剧增^[6、20]。

有色金属、稀有金属和贵金属的硅铝质矿床，按其形成条件，矿石物质成分及伴生放射性元素的组合，比镁铁质矿床更加多种多样。

当花岗岩类岩浆发生分异时，大多数造矿元素同铀、钍—

样，相对地聚集于岩浆活动最晚期的产物之中：在小岩体或结构复杂的大花岗岩体的补充侵入岩中〔21、68、73〕。

少量元素在母岩的岩浆期后高温热液蚀变过程中一起迁移，该过程导致赋存于侵入体内的大型稀有和有色金属矿床的形成。这些矿床属于两类含矿建造：云英岩建造和变质花岗岩（钠长岩）建造。

通常的看法是：侵入体内的生成物继承了母岩——花岗岩类的地球化学面貌，这是在该组矿床上到处见到钍钽富集的原因之一。

钠长岩矿床与正常花岗岩体和硷性花岗岩体有关，同时，矿石成分有规律性地变化。含有铌、锡、钨的钽和铍矿床生于正常的和弱硷性变质花岗岩中。硷性变质花岗岩控制着铌（含有钽）、锆和稀土矿化。在各种稀有元素分离的同时，钍和铀也发生分离。正常的和弱硷性变质花岗岩所特有的钨铁矿-铁钽矿和烧绿石-微晶矿化伴随有铀在矿石中的富集（达0.005—0.01%），并且铀和钽在岩体中的分布从总的轮廓上来看是重合的。大部分铀含在钽-铌酸盐类之中。在含矿带中岩体的钍含量仍属背景值或略高于背景值，但 $Th/U=1$ 。

含稀有金属的变质花岗岩通常伴随有一系列具有锡、钨和铍矿化作用的云英岩和石英-长石脉。这些岩脉有时就分布在岩体里，但通常赋存于外接触带。云英岩里富集着在改造过程中从岩体迁移出来的钍（根据初步资料达 $50 \times 10^{-4}\%$ ）；在云英岩体里 $Th/U=10$ 。矿田的带状分布导致形成两种互相有关系的放射性地球化学异常：铀异常（在含稀有金属的变质花岗岩中）和钍异常（在侵入体上方的含矿云英岩中）。

尽管在矿床生成过程中多次发生钾的重新分布，但它在交代岩中的总含量一般保持在花岗岩克拉克含量的水平上，或者略低于此水平〔2〕。

在含稀土-铌的硷性钠长岩中，钍含量显著升高（达0.0n—

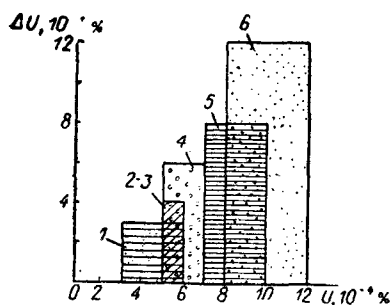


图 1.1 云英岩中铀含量的升高与铀在母岩—花岗岩中含量
的关系

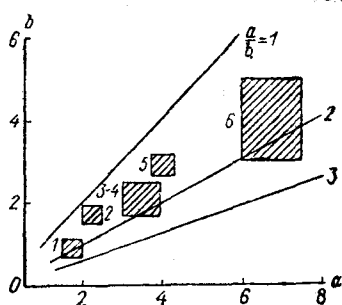


图 1.2 云英岩中Th/U比值
(b) 与母岩—花岗岩
中Th/U比值 (a)
的关系

云英岩矿床：1—恰安 达 利 (Чаа нталское, 丘 科 特 卡)；2—宗-翁 杜 尔 (Зун-Ундур), 巴 伦-翁 杜 尔 (Ба-рун-Ундур, 外 贝 加 尔)；3—东 科 翁 拉 德 (Восточный Коунрад), 北 科 翁 拉 德 (Северный Коунрад)、钨 山 (Вольфрамовые Сопки, 哈 萨 克 斯 坦)；4—帕 尔 季 赞 (Партизанское, 滨 海 区)；5—外 贝 加 尔 的 一 个 矿 床；6—哈 萨 克 斯 坦 的 × 矿 床

云英岩矿床：1—宗-翁杜尔, 巴伦-翁杜尔 (外贝加尔)；2—恰帕耶夫 (Чапаевское, 滨海区)；3—东科翁拉德, 北科翁拉德, 钨山 (哈萨克斯坦)；4—外贝加尔的一个矿床；5—恰安达利 (丘科特卡)；6—哈萨克斯坦的×矿床

0.1%)，铀含量升高的幅度较小 (0.00n%)，结果 $Th/U = 4$ — 6 或更高些。在矿体中见有钍石、铀钍矿和方钍石，有时有沥青铀矿^[7]。在富的稀有金属矿中钍的含量最高。在矿田中钾含量的减少与钠长石化的强度成比例。

根据不多的资料判断，变质花岗岩中的铍矿床按其放射性地球化学参数与钽矿床相似，而碱性钠长岩中的铍矿床与铌—稀土矿床相似。铀在含铍变质花岗岩中的存在形式不明，而在与碱性