

变质成矿作用

地质矿产部成都地质矿产研究所

一九八三年

目 录

变质成矿作用理论的发展·····	(1)
变质成矿论的现状和问题·····	(8)
现代变质成矿作用理论的基本原理·····	(17)
关于变质成矿作用问题·····	(31)
变质成矿作用的地质和物理化学条件·····	(37)
变质成矿作用的动力条件·····	(49)
论变质矿床的建造·····	(58)
地壳活动带发展过程中形成变质矿床的条件·····	(62)
变质作用在成矿作用中所起作用的实质与“变质矿床”的概念·····	(67)
形成超变质矿床的条件·····	(73)
变质热液成矿作用的地球化学问题和矿化与变质作用联系的形式·····	(85)
岩石结合水的性质及其在形成变质热液中的意义·····	(94)
远东地区前寒武纪变质成矿作用的主要成因观点·····	(101)
远成热液铅锌矿床和成矿元素的可能来源·····	(106)
与前寒武纪受变质铁矿的成岩阶段有关的成矿规律·····	(112)
葡萄牙中北部混染花岗岩类岩石及其黑云母的地球化学和岩石成因·····	(120)
岩浆岩含矿性的岩石学标志·····	(138)

变质成矿作用理论的发展

И.Н.别列夫采夫, Б.М.戈罗什尼科夫

全世界的地质实践表明,确定金属矿床成因类型的出发点应当是在历史上与矿床形成有关的主要造岩地质作用。

对地球和地壳所进行的研究,使我们越来越相信:最初形成地球的作用,并没有同时形成金属矿床。以后,在形成硅铝质的上部地壳时,才形成了许多岩石和各种金属矿床。

岩石分为三个最主要的成因类型:岩浆岩、沉积岩和变质岩。每一类岩石都是在一定的地质和热动力条件下形成的。由于岩浆作用的结果,形成了成分各不相同的岩石:酸性岩、基性岩、超基性岩和碱性岩。形成岩石的作用导致了金属矿床(正岩浆矿床、碳酸盐岩矿床、伟晶岩矿床、矽卡岩矿床和火成热液矿床)的形成。

沉积作用导致了大量不同类型沉积岩(石灰岩、页岩、砂岩、粘土质页岩)的形成;而层状的铁、锰、硫化物和其它很多矿床在成因上与沉积岩有关。

变质作用使沉积岩和火山沉积岩受到了深刻影响并导致了大量变质岩(片麻岩、结晶片岩、大理岩、石英岩)的形成,而在超变质作用条件下,则形成了各种成分的花岗岩类、伟晶岩和交代岩。在变质岩中有很多金属矿床,它们具有和这些岩石一样的地质和物理化学形成条件。

根据这些理由,在金属矿床的成因分类中,我们把变质矿床单独列为一类,与沉积矿床和岩浆矿床并列。这一切便是提出和深入研究变质成矿作用问题的一般理论根据。

近十五年来,乌克兰科学院矿物地球化学和物理学研究所(ИГФМ АН УССР)成矿规律室主要是研究变质成矿作用。最早阐明克里沃罗格矿区铁矿成因的著作是1955—1959发表的〔1、2〕。

1969年,在别尔迪扬斯克举行了第一次各部门间的联席会议,这次会议上,在地质科学中首次把具有重大实际意义的变质成矿作用问题作为金属矿床学中最重要理论问题之一提了出来〔10〕。变质矿床定义为:在热动力变质作用和超变质作用条件下,在受变质的岩石发生溶解、再结晶或选择性熔融的过程中,由于岩石中的金属发生迁移和富集而受到强烈改造或产生的矿石堆积体。从这一论点可以看出,变质矿床是在沉积岩和火山岩(在某些情况下,还有岩浆岩)发生变质作用和超变质作用时形成的。对溶液和金属成因的这种理解,重新解释了很多矿床的成因,早先用岩浆热液(或热液)成矿理论来解释这许多矿床的成因,认为溶液和金属是从正在结晶的岩浆源中分离出来的。

因此,第一次变质成矿作用问题会议提出了与区域热动力变质作用和超变质作用有关的矿床成因理论的主要原理。

第二次变质成矿作用问题会议，于1974年在德聂伯河共青城举行。会议指出了在变质成矿作用问题研究的发展方面和在各种变质矿床的研究中所取得的巨大成就[11]。报告列举了关于区域变质作用条件下成矿元素活动性的大量实验和分析资料，并且查明了，与低温相（绿片岩相）岩石相比，高级变质相（角闪岩相和麻粒岩相）岩石的金属含量是有规律降低的。会议还讨论了矿化的垂直范围、成矿沉积的构造条件、成矿作用的温度条件和其它方面的问题。

无论是第一次会议还是第二次会议，主要注意力都集中在从绿片岩相开始到麻粒岩相结束的区域热动力变质作用的进化变质阶段条件下的变质成矿作用。因此，1979年在基辅举行的第三次变质成矿作用问题联席会议，主要讨论了以下问题。

1、低温（前绿片岩相）变质作用条件下的成矿作用。报告分析了变质作用与低温成矿作用的热力学关系，并确定了在受到初期变质作用的岩石中，成矿沉积作用的构造、岩石、岩石化学和地球化学特征。会议还讨论了水、成矿沉积介质、有机质和其它对沉积物中的原有的金属堆积产生影响的因素的作用问题，金属的迁移及其以后的富集成矿问题。主要是以金、铁、多金属和铜矿床为例讨论了这些问题。总之，认为各种矿产的许多矿床都是在岩石受到低温变质作用（成岩作用—绿片岩相变质作用初期的亚相中）形成的。

2、超变质作用带和花岗岩化作用带的成矿作用。在这方面，会议的主要注意力集中在超变质的（交代的和再生的）似伟晶岩和与之有关的矿产上，以及超变质作用带和花岗岩化作用带的碱性交代作用和在这种作用中形成的稀有金属矿床上。

3、变质矿床的普查预测准则。主要注意了乌克兰地区和苏联其它地区的铁及其它矿种（尤其是金、稀有金属和云母伟晶岩）的变质矿床的普查预测[7、8]。

会议通过了决议，建议加强以下两个方面的工作：变质作用初期和低温变质作用条件下的变质成矿作用研究；区域热动力变质作用进化变质和退化变质阶段及花岗岩化的变质成矿作用研究。

从举行第一次会议以来的十年中，由于获得了大量新的地质、理论和实验资料，证明变质作用和超变质作用对于各种矿床的形成有着巨大的作用，国内外地质工作者对变质成矿作用问题愈来愈感兴趣了。这个时期出版了一些阐明在变质作用和超变质作用条件下形成的矿床的成因问题的专著和发表了大量的论文[5—9]。拟定了变质矿床的成因分类，国内外地质工作者都对这个分类很感兴趣[4]。

此外，第三次联席会议还强调了前两次会议讨论过的问题的巨大理论和实际意义，并指出，在拟定出一整套特征，以便根据地球化学、岩石学、结构构造和其它因素，把某些矿床列入变质矿床方面，仍然研究得不够精细；对各种变质作用条件下的成矿作用物理—化学条件的理论根据问题注意得不够。变质成矿作用的模拟实验研究做得很少，必须进一步完善根据不同变质作用类型对变质矿床所作的成因分类。

在总结了对前寒武纪和下古生代杂岩中的变质矿床所进行的十年有计划的研究之后，可以说，变质成矿作用理论目前是建立在大量地质资料和实验研究的基础之上的[3、13、9、11]。

根据当代地质知识水平，显然可以认为，所有金属矿床，除少数（Cu—Ni、Ti、Fe、Cr、Pt—Os—I_s）外，其溶液和金属都不是来自地幔，而是来自地壳。它们是由于

在沉积作用和火山作用过程中金属的堆积和后来岩石受到变质改造的结果而形成的。形成超变质矿床时，除了岩石中的成矿物质和水溶液发生活化而外，很可能还有壳下来源的溶液和金属参与。因此，形成超变质矿床的含矿流体可能是多源的。根据矿物包裹体研究资料，成矿流体由水、二氧化碳和许多与金属组份一起形成络离子的物质组成。

变质作用被看作是地壳活动带的发育有关的内生作用。在地表风化作用带中，以及由于火山作用和壳下岩浆作用而产生的变化，都不在变质作用之列。变质作用中主要起作用的因素是温度、压力和化学性质活泼的溶液，这些溶液的成因可能是多种多样的。这些因素共同起作用，但在具体情况下，其中某一个因素的作用可能占主导地位。变质作用可以大面积发育，也可以局限于一地，并且在后一种情况下，在众多的因素中，只有某一个表现得最为明显。岩石变质的结果，形成各种金属矿床，这些矿床都归为变质矿床。

火山岩和沉积岩（在某些情况下还有岩浆岩）的变质作用和超变质作用使岩石中的金属元素发生迁移。同时，地质和实验资料证明，同类岩石中的金属含量随着变质作用的增强而有规律的降低。与这些作用同时出现的有变质岩的去碳酸盐化和脱水作用。这种普遍规律，由于某些金属在一定的温度、压力条件下，即在某些变质相的岩石中发生堆积而复杂化。超变质作用区的特征是造矿元素的迁移更利害，它们的富集条件也更为复杂。

成矿作用与原岩（它们本身含有某些矿物的显微金属相）变质改造的物理-化学条件有关。同时可以发生重结晶作用、集合重结晶作用、交代作用、不含矿组份的带出、开放孔穴中的结晶作用。超变质成矿作用中的主导作用是交代作用，其次是开放孔穴中的结晶作用。

根据原始金属来源、形成矿床的地质条件和成矿作用物理化学特点的分析，把变质矿床分为三个亚类：受变质矿床、变成矿床和超变质矿床。此外，根据热动力条件，把所有变质矿床分为三个变质相系列：低温系列、中温系列和高温系列〔4、6〕。同时，应当指出，变质矿床主要富集在低温系列的岩石中，即绿片岩相和少数绿帘石-角闪岩相岩石中。在初期变质（前绿片岩相）和绿片岩相低级阶段受到变质的岩石是许多金属（Zn、Pb、Mn、Cu、U 等等）矿床中含矿性最佳的岩石。

受变质矿床和变成矿床区别于其它内生矿床的特点有：1）矿石与围岩的矿物和化学成分一致；2）金属矿床主要分布在褶皱构造中，而矿床总是具有成层性；3）成矿作用与变质作用和超变质作用在时间上和空间上共存。超变质矿床和花岗岩化期后矿床的特点有：1）变质杂岩的区域性碱交代改造作用并形成花岗岩类系列的交代岩；2）出现深熔作用和再生作用及与其有关的流变花岗岩类的形成；3）在已固结的岩石中，沿深断裂带进一步发生碱交代作用，并在这些深断裂带中沉积出金属组份。

但是，如上所述，虽然已经取得了一些成绩，但变质成矿作用的很多问题迄今仍然研究得不够，也依然还有争论。

首先需要谈及某些概念。在地质文献中，仍然有“热液”矿床、“变质热液”矿床、“岩浆热液”矿床的术语。显然，“热液”这个术语本身并不具有成因意义，因为就其本质而论，它只反映了矿床复杂形成过程的一个方面。所有矿床，不管是深部的（内生的），或者是地表的（外生的），都是在热水溶液或冷水溶液的参与下形成的。但是，形成矿床所需要的不只是水溶液，而是一整套地质因素，其中主要的是有溶解在溶液中、并在一定

条件下以金属矿物富集体的形式从溶液中析出的金属存在。因此，矿床的成因决定于各种因素的总和：金属和溶液的来源、金属的搬运方式、最后还有金属富集沉淀的条件和方式。只有了解了所有因素的全部总和，才能得出关于矿床成因的概念。因此，“热液”矿床这个术语是个过时的术语，它没有反映出现代的地质知识水平，应当说它已经不适用了。根据分类原则，所有矿床只应当归为三类：火成矿床、变质矿床和外生矿床；在每一类当中，根据它们所固有的特征的总和，进一步划分出亚类、组、系列等。

“层状”矿床和“远成热液”矿床这两个概念，不具有成因意义。第一个术语反映的是产于某些地层单位中的原始沉积岩、火山沉积岩或变质岩中的矿床的空间状态。第二个术语（“远成热液”矿床），虽然某些作者目前还使用，但作为其成因与深部岩浆源有关的矿床成因类型的定义，它已经完全失去了其特有的意义。大概这种情况不仅涉及上述术语，而且还涉及到其它很多在当代地质理论发展中已经失去其特有意义或有着不同解释的术语。因此，在进一步详细研究变质成矿作用问题时，涉及这些作用的术语必须具体化、必须确定各个概念的界线并从各种称呼中删除那些不必要的同义词。

直到今天，当深入研究变质成矿作用问题时，研究者的主要注意力仍然集中在前寒武纪的岩石组合上，也就是集中在发生在前寒武纪、并在这个时代的岩石中形成各种矿床的变质作用上。对显生代的岩石及其变质作用，还有它们的变质成矿作用都没有受到应有的注意。同时，在显生代岩石中已经发现了大量与岩石的低温热动力变质作用、断裂改造作用和退化变质现象有关的金属和非金属矿床。因此，今后的任务是，对所有各种变质矿床（无论是产在古地质和古地台上的，还是产在老地槽区和新地槽区内的），都进行研究。这种研究大概应当建立在相分析原理基础之上〔6、12〕。

得以形成矿床的变质作用分为两类：1）区域变质作用和与之有关的超变质作用、花岗岩化作用和退化变质作用；2）局部变质作用，高温、低压条件下的接触变质作用和 在高压、低温条件下、在近地表一带发生的动力变质作用都应当属于这一类。目前，还没有对岩石受到某种变质作用时所形成的变质矿床进行明确的详细分类。查明某些变质作用的确切界线和在这些界线内形成某些矿产的可能性，乃是今后的研究课题。

查明变质作用开始的下限是特别重要的。正如近年来许多研究者业已查明的，大量的各种金属矿产（Fe、Cu、Pb、Zn、Au、As 等）都是在100—400°C 和 100—200 大气压的条件下形成的，即是在沉积物成岩变化阶段开始，到绿片岩变质岩相的各低温亚相结束的温度、压力条件下形成的。在绿帘石-角闪岩相和角闪岩相条件下形成的金属矿床很少，在麻粒岩相条件下形成的金属矿床数量十分有限。上面所讲的主要是各种金属的变成矿床（原地的和异地的矿床）。对于受变质的非金属矿床（板岩、石英岩、高氧化铝片麻岩、大理岩等）来说，则正好相反，最有利的条件是高温变质相。这两种变质矿床今后可能都应当根据它们的物理-化学、岩性-组构及其它形成特点加以详细研究。

变质矿床的形成问题，与区域变质作用相和亚相的问题直接有关。特别有争论也没有得到彻底解决的问题是开始变质作用的共生组合和热动力的界限。因此，我们根据围岩的改造程度，将低温矿床的矿石分为成岩矿石、后成（катагенетический）矿石、变生矿石和变成矿石。也常常使用“后生”矿石（没有任何明确的热力学根据）这个术语。近年来，我们把从成岩作用阶段到绿片岩相各低温亚相中岩石的改造作用和矿石的形成，划入

“前绿片岩”相变质作用[11]，这完全是假定的，只应当把它看作是为了帮助了解低温变质成矿作用的条件而作的人为规定。因此，目前特别尖锐地摆着这样两个问题：根据有可能共存的平衡矿物相和亚稳定的矿物相，查明沉积岩和火山沉积岩变质改造的下限；以及查明在成岩作用和岩石在以后的变质改造中的成矿作用特点。对成岩作用和低温变质作用条件下各种因素对金属组份的再分配和富集所起的作用进行研究，我们便可以估计这些因素在形成金属矿床中的作用。

另一方面，形成金属矿床的温度、压力条件不一定与围岩发生变质作用的温度、压力条件一样。只有在经受变质作用之后全部岩石都变成了矿产（变成矿床——含铁石英岩、高氧化铝片麻岩、大理岩等）的情况下，形成矿产的温度、压力条件和围岩变质作用的温度、压力条件才会相同。金属组份在裂隙和岩穴中沉淀，形成矿石矿物，是在温度和压力降低的背景下发生的，是由于溶液被堵塞时，发生不可逆绝热膨胀的结果。因此，在低温成矿作用中（对于金属和某些非金属矿产来说），可以分为三个主要类型：1）成岩成矿作用（吸附作用、结壳、结核、晶洞）；2）变生成矿作用（集合重结晶作用）；3）脉状成矿作用（金属矿物在裂隙和孔穴中从溶液中结晶出来）。中、高温变质作用（区域变质作用、超变质作用、花岗岩化作用和退化变质作用）的主要成矿作用有：1）变质成矿作用（变生结晶作用和重结晶作用）；2）交代成矿作用（交代作用）；3）脉状成矿作用（金属和非金属矿物在裂隙和孔穴中的结晶作用）。

今后需要以地质观察、实验和数学模拟实验为基础，更加详细地研究各种成矿作用的相互关系，它们的物理-化学条件、金属组份在矿物重结晶时转入溶液的条件，水溶液在金属组份聚集和成矿沉积过程中的状态和迁移。

上面特别讲了低温的变质作用和成矿作用。正如近年来的研究已经查明的，很多金属矿床只形成在本身含有显微金属相即金属含量高于它们在地壳中的克拉克值的岩石中。还查明了，在任何地区的同类型岩石中，恰恰是富含有机质的岩石含金属组份较高。

由此可见，岩石中有机质（碳）的含量和其中的金属含量之间有直接关系。以后，这些金属在成岩作用和以后的变质作用环境中，容易转入溶液中，与溶液一起迁移并在合适的条件下形成矿体。这是由多种原因造成的。首先，有机物具有非常高的吸附能力；还原硫酸盐细菌的活动；各种碳氢化合物的形成；当变质作用的温度增高时，有机质在其多阶段的转变过程中，将聚集起来的金属带到溶液中的能力；孔隙液体在开放空间中的状态，等等。

无论是根据地质资料，还是根据实验研究，从沉积物—沉积岩—变质岩的演化方向来研究所有这些因素，都可以使我们对成岩成矿作用和变质成矿作用的许多至今还不清楚的问题作出解释。

如果说到各种正、负变质岩，那么，在低温变质作用条件下，不同类型的岩石也具有不同成矿特征。一般说来，金、铜和许多稀有分散元素矿床与（原来富含有机质的）黑色板岩有关。铅锌矿床与碳酸盐岩石有关；金矿床与受退化变质（绿岩蚀变）的正变质岩有关；成分各不相同的矿石混在一起的矿床与砂岩有关，等等。另一方面，随着变质程度（从低温环境到麻粒岩相的温度、压力环境）的增高，金属矿床的数量逐渐减少，相反，非金属矿床的数量则逐渐增加。金属矿物之所以只能在一定的温度、压力条件下形成，之

所以只有某些金属矿物才是“贯穿全过程的”即可以在很宽的温度、压力范围内形成，原因就在这里。因此，为了查明变质矿床的形成规律，今后研究变质矿床，不仅应当了解变质作用的特点，而且应当考虑到岩石的原始成分和形成作为工业原料的金属和非金属矿物的物理-化学条件。

目前，在理论和实践方面极为重要的是关于在超变质作用和花岗岩化作用条件下形成矿床的问题。

目前对超变质作用的理解是，发生在地壳活动带发展过程中并导致各种花岗岩类、伟晶岩和交代岩形成的交代作用和岩浆作用的总和。所有这些作用常常都使有益组份富集起来具有工业价值。现在，有许多有色、黑色和稀有金属、陶瓷原料、云母和其它一些矿种的矿床都与超变质作用和花岗岩化作用的派生作用有关。但是，超变质作用带和花岗岩化作用带的产生、发展和形成问题，发生这些作用时溶液和金属的来源问题，金属搬运和沉淀的机理问题，所有这一切，都还有很多不清楚的地方，需要进一步作深入的研究。

如果说研究者们先前是从地槽发展理论的角度去研究超变质作用和花岗岩化作用的话，那么，现在却是试图从新全球构造的立场来研究这些作用了[9]。看来，这种研究方法对于解决许多矿床成因问题和深入研究超变质作用及花岗岩化作用条件下的成矿作用模式问题可能都是最有利的。

在深入研究区域热动力变质作用和超变质作用与花岗岩化作用条件下形成变质矿床的问题时，最为复杂的是溶液和金属的来源问题。在这方面，研究 Pb 、 C 、 H 、 O 、 S 和 Sr 的稳定同位素对研究者可能有很大帮助。

最后，应当指出，1979年苏联科学院举行成矿作用学术会议时，成立了变质成矿作用委员会。各学术机构中从事变质成矿作用问题研究的学者都参加了该委员会。为了研究各种类型的变质矿床，该委员会打算每年都在苏联各地区举行讨论会。1980年在库尔斯克磁力异常区各铁矿床和克里沃罗格铁矿区举行这种会议的第一次尝试表明，在学者和直接从事生产的地质工作者之间就矿床的地质特征、物质成分和成因方面的各种问题交换看法是非常有益的。毫无疑问，就此问题举行全苏各部门间的联席会议和委员会的讨论会，可以弄清变质成矿作用问题的许多方面，并制定出各种金属和非金属变质矿床最合理的找矿标志。

译自《Геологический журнал》，1981, том 41, № 6, стр. 1—9

参 考 文 献

1. Белевцев Я. Н. О метаморфическом рудообразовании. — В кн. : Тр. первого Всесоюз. петрограф. совещ. М., 1955, с. 439—441.
2. Белевцев Я. Н., Бура Г. Г., Дубинкина Р. П. и др. Генезис железных руд Криворожского бассейна Киев : Изд-во АН УРСР, 1959. 299 с.
3. Белевцев Я. Н. Метаморфическое рудообразование. М. : Недра, 1979. 274 с.
4. Белевцев Я. Н., Бурак В. А., Горошников Б. И., Домарев В. С. Генетическая классификация метаморфических месторождений. — Геология рудн. месторождений, 1976, № 2, с. 3—11.

5. Горошников Б. И. Проблема метаморфоического рудообразования: Третье Межведомственное совещание в Киеве. — Вестн. АН УССР, 1979, № 12, с. 87—88.
6. Горошников Б. И., Курило М. В. Парагенетические и термодинамические границы начального метаморфизма (дозеленосланцевая фация метаморфизма). — В кн.: Метаморфизм Украинского щита. Киев, 1978, с. 13—14.
7. Горошников Б. И., Тохтуев Г. В. Метаморфоическое рудообразование: Второе Межведомственное совещание в Комсомольске-на-Днепре. — Вестн. АН УССР, 1975, № 7, с. 97—99.
8. Жуков Ф. И. Стабильные изотопы как индикатор метаморфоических месторождений. — В кн.: Метаморфоическое рудообразование, низкотемпературных фаций и ультраметаморфизма. М., 1981, с. 19—31.
9. Кушев В. В., Руденко В. Е. Условия образования ультраметаморфоических месторождений. — В кн.: Метаморфоическое рудообразование. М., 1977, с. 48—64.
10. Метаморфоическое рудообразование. Киев: Наук. думка, 1972, Ч. 1. 331 с.
11. Метаморфоическое рудообразование: Тр. 2-го Межведомств. совещ. по продл. Метаморфоич. рудообразования. М.: Наука, 1977. 278 с.
12. Проблема метаморфоического рудообразования: Тез. докл. третьего Межведомств. рабоч. координац. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. 212 с.
13. Сапрыкин Е. П. Метаморфоическо-идротермальное рудообразование. М.: Наука, 1980. 171 с.

变质成矿论的现状和问题

Я. Н. 别列夫采夫

在地质科学中相当有根据地划分出三种主要成因类型的岩石：岩浆岩，沉积岩和变质岩。这三种成因类型的岩石都是在一定的地质条件和热动力条件下生成的。但是，只有岩浆型和沉积型矿床。由热流和溶液流引起的沉积岩、火山岩或岩浆岩的变质改造导致生成新的矿物共生组合。这些新的矿物共生组合是确定岩石变质作用程度的基础。变质作用也能引起造岩元素和造矿元素的广泛迁移，在许多情况下导致生成常常具有工业价值的矿体。因此，由变质作用生成的矿床应该与岩浆型矿床和沉积型矿床一样，单独列为一种类型的矿床——变质成因型矿床。

战后年代里，在地盾区和地台区的变质岩石中发现了许多矿床，采矿工业对这些矿床进行了开采。这就引起了地质界广大人员对于研究变质成矿论的重视。

长期以来，曾将大理岩、瓦板岩、石墨及其它一些非金属矿产列为变质成因矿床。

只是在*K. И. 鲍格丹诺维奇*、*B. A. 奥勃鲁契夫*、*H. И. 斯维塔利斯基*、*П. М. 卡尼鲍洛茨基*的个别见解中才认为变质作用在成矿作用中有很大意义。

从五十年代起，开始把变质成矿作用看作是变质岩地区各种矿床生成过程中的最重要的作用之一。在*A. H. 查瓦里茨基*、*Я. Н. 别列夫采夫*、*B. C. 多马列夫*、*H. Г. 苏多维科夫*的著作中讨论了变质成矿作用的最主要的问题：变质作用中金属元素的迁移、矿质的搬运和沉淀及其它一些问题。六十年代，出现了许多援引一些能揭示变质成矿作用的地质资料和物理化学资料的著作。

乌克兰科学院矿物地球化学和物理化学研究所成矿规律室研究世界上各个地盾结晶岩石中许多铁、多金属、铜、放射性金属及稀有金属矿床的生成条件已有二十多年的历史。与乌克兰的学者们一起在后贝加尔、阿尔丹、阿尔泰、西伯利亚、远东、哈萨克斯坦、库尔斯克磁力异常区、波罗的地盾及苏联其它一些地区也进行了这样的工作。

从1969年在别尔迪扬斯克市召开了第一届部门间变质成矿作用会议起已过去10年了。在这10年中，苏联国内外的地质人员对变质成矿问题的兴趣日益增长。这是因为获得了大量地质资料和实验资料，证明变质作用和超变质作用在各种矿床的生成过程中起很大作用。

全面研究金属含量较低、但矿石数量很大的矿床对了解变质成矿作用起了很大作用。大部分变质成因的铁、金、铀及其它矿床，正是这一点很突出。

近几年来，出版了关于变质成矿作用的长篇专著以及大量探讨与变质成矿作用有关的矿床（前寒武纪铀矿床、科拉半岛铜-镍矿床、乌克兰、库尔斯克磁力异常区及其它许多地区的前寒武纪铁矿床、哈萨克斯坦、澳大利亚、大卡拉套及鲁德内阿尔泰多金属矿床、印度铜矿床及其它许多矿床）的论文。

在1970年于东京、1978年于美国召开的国际矿床成因讨论会上，在1972年于加拿大、1976年于澳大利亚召开的第24届和第25届国际地质大会上都探讨了变质成因矿床问题。B. И. 斯米尔诺夫院士在关于地质科学现状及发展任务的总结性论文中指出，变质作用在热液矿床及含矿伟晶岩的生成中起很大作用。1978年美国发表了变质矿床的分类。

在两届部门间变质成矿作用会议（1969年和1974年）上确定了变质成矿论的基本原理。

因此，目前特别重视研究和完善对确定矿床在古地质和地台范围内的分布规律有重大意义的变质成矿论。

现代变质成矿论的基本原理如下。

1. 波及地球上所有前寒武纪大陆整个硅铝层的火山岩和沉积岩的变质作用和超变质作用引起了非常广泛的、任何其它地质作用都无法与之比拟的成矿元素在岩石中的迁移。随着变质作用的加深，金属从绿片岩相，通过绿帘石-角闪岩相、角闪岩相，直到麻粒岩相岩石中带出。发生这种作用的同时，变质岩产生了脱水作用。超变质作用区内成矿元素的迁移更为强烈。

2. 金属借助原生岩石脱水作用产生的含矿流体发生分离和迁移。根据矿物包裹体研究资料，成矿流体是由水、二氧化碳、卤素以及组成络合离子的许多物质和金属元素构成的。正如地球化学资料 and 同位素资料所表明的那样，流体的水源是不同的。变质水与地壳岩石有直接关系。

3. 业已确定四种类型变质成矿作用：（1）原生岩石发生再结晶作用；（2）无矿组份从岩石中带出；（3）金属矿物交代岩石无矿部分；（4）含矿物质充填岩洞（裂隙和孔隙）。

4. 生成受变质矿床和变质矿床的造矿物质的来源基本上是受到变质作用的沉积岩和火山岩。对超变质矿床而言，除了岩石中的矿质以外，可能还有来自壳下的原生矿质参与。

5. 受变质矿床和变质矿床是在符合围岩变质作用热动力条件的压力和温度下形成的。

6. 属于变质成因矿床的有：变质作用过程中发生强烈变化并具有决定矿石工艺性质的岩石中的原生金属聚集体或者由在变质作用和超变质作用的各个阶段上产生的正在受到变质的岩石中的原生分散金属富集起来的金属富集体。

变质成因矿床有三个亚类：在富含矿质的原生岩石再结晶时生成的受变质矿床；因分散的金属组份的活动和富集生成的变质矿床；在后花岗岩化作用的影响下生成的超变质矿床（退化变质矿床）。

7. 变质成因矿床与其它内生矿床不同的特点是：（1）受变质矿床和变成矿床的矿石和围岩的矿物成分和化学成分相似；（2）矿床主要分布在褶皱构造之中；（3）成矿作用在空间上和时间上与不同的变质相和超变质相有联系。

8. 制定了变质成因矿床的分类。分类的基础是根据热动力条件在垂直方向上划分出三个变质相岩系：低温、中温和高温变质相岩系，而在水平方向上划分出三个亚类：受变质矿床、变成矿床和超变质矿床。

9. 地盾上的变质成因矿床主要分布在绿片岩相岩石中, 其次分布在角闪岩相的岩石中。这些变质相的岩石形成了从元古代地槽发育起来的构造岩相带。超变质矿床的特点是构造板块的连结带受强烈挤压, 是交代变质的, 并形成了含矿的原生活化带。

与岩石区域变质作用有成因关系的受变质矿床及变成矿床研究得最好, 超变质作用引起的成矿作用研究得较差, 火山沉积岩低温(前绿片岩)变质或外力变质作用条件下的成矿作用研究得极少。

下面介绍一下在第三届部门间变质成矿作用会议上讨论过的一些问题: (1) $P-T$ 条件相当于葡萄石-绿纤石相或外力变质作用的前绿片岩相变质条件下的成矿作用; (2) 超变质作用引起的成矿作用及其与深成热液成矿作用的关系; (3) 变质作用的进化和退化阶段在成矿中的作用。

沉积岩和火山-沉积岩前绿片岩相变质条件下的成矿作用

前绿片岩相条件下沉积岩和火山岩的变质作用是在温度为50到300~350°C, 压力不超过3~5千巴的条件下, 在具有化学活性的溶液的影响下发生的。这些岩石的变化极大, 对生成矿产来说也非常重要。主要变化如下: (1) 在富含火山玻璃碎屑的火山碎屑岩中新生成了沸石、蒙脱石、石英、绿泥石、绿帘石, 并且斜长石的钠长石化作用发育也很广泛。岩石的这些变化是在压力为2~3千巴的条件下在7~10公里深处发生的。温度可能不超过200~300°C; (2) 在石英-高岭石岩、粘土、石英-长石砂岩及其它一些沉积岩中新生成了地开石、石英、钠长石、水云母、绿泥石和绿帘石, 并且浊沸石、绿纤石、葡萄石、斜黝帘石的镶嵌交代结构发育也很广泛; (3) 在煤层(例如, 顿巴斯煤层)中, 煤由褐煤变成无烟煤, 周围的石英粘土岩和碳酸盐类岩石也产生了相应的变化。这些围岩变成了片岩、石英砂岩和结晶石灰岩; 按照现代概念, 无烟煤是在温度为180~250°C的条件下生成的。

这些岩石中没有平衡的矿物共生组合, 最终产物不仅在很大程度上决定于原岩的成分, 而且在很大程度上决定于原岩的状态, 交代过程起主导作用, 因此不能把这些岩石列入埃斯科拉所说的区域变质作用的低温相。根据这一点许多研究者都不把葡萄石-绿纤石相或沸石相列入区域变质相。

目前, 上述从沉积物成岩作用阶段到其变质作用之间的沉积岩的次生变化均属于外力变质作用。深部外力变质作用是指在深部因素影响下岩石中的矿物发生了次生变化和形成了新矿物。通常划分出区域外力变质相, 这种相乃是矿物成分相近的岩石组合。这一岩石组合的特点是岩石在一定的外力变质作用发展阶段上产生的和经常存在的新生成的结构-矿物标志结合在一起。这些岩相也不符合埃斯科拉所说的变质相, 而与相当于一定岩石族的区域外力变质作用阶段相符。

划分出了下列两个区域外力变质作用相(阶段): (1) 初始外力变质作用, (2) 深部外力变质作用。随后是变生作用。这种变生作用根据一些资料相当于绿片岩相的最低温亚相, 而根据另外一些资料则是从外力变质作用向变质作用的过渡。

不同的外力变质相的生成因素是: (1) 岩石倾伏深度或 $P-T$ 条件; (2) 原始矿物

成分；(3)决定交代变质的溶液的化学活性。

在受到外力变质作用的沉积岩和火山岩中广泛地分布有在温度 $100\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的条件下在热液影响下生成的矿床。虽然在内生矿床的许多分类中把这类矿床列入热液(岩浆)低温产物,但是这类矿床与岩浆源没有任何关系。这些矿床在苏联国内外文献中叫作远成热液矿床,即远离其源地或者确切地说远离岩浆源的矿床。

属于远成热液矿床的有美国(密西西比河谷和密苏里河谷)、波兰(上西里西亚)、加拿大、澳大利亚、非洲、苏联(哈萨克斯坦和吉尔吉斯)碳酸盐类岩石中的许多层状和交错铅锌矿床;科罗拉多州高原砂岩中的铀矿床;东德(曼斯菲尔德)、波兰和其它许多地区页岩中的铜铅锌矿床;乌克兰(尼基托夫卡)、中亚(海达尔坎)、阿尔泰及其它地区的粗粒碎屑岩中的辉锑矿矿床和辰砂矿床;哈萨克斯坦(杰兹卡兹甘)、南非、顿巴斯许多地区的砂岩(含铜砂岩)中的斑铜矿-黄铜矿矿床等以及其它金属矿床。在这些矿床中富集了储量很大的铜、铅、锌、汞、锑和其它金属。其中包括金属含量和储量特大的矿床(曼斯菲尔德等)。

远成热液矿床广泛分布于所有大陆上,业已开采和研究了好几十年,但是需要进行详细研究并重新进行成因评价。

B. N. 斯米尔诺夫、Г. Ф. 帕尔克、B. П. 费多尔丘克、A. C. 茹可娃、E. E. 扎哈罗夫、B. M. 波波夫、B. C. 多马列夫、M. M. 康斯坦丁诺夫及其他许多学者多年来一直在研究远成热液矿床。

美国学者们认为,远成热液矿床是热液生成的。这些热液从岩浆源起迁移了很长的距离,在运移过程中失掉了储存的热量和化学活性。这些矿床的矿物成分很简单,没有非常明显的近矿蚀变,是层状和脉状矿体。

B. П. 斯米尔诺夫指出,远成热液矿床产于没有火成岩活动的沉积建造的岩石中,对大多数远成热液矿床来说,矿体的形状是层状的,常常占有稳定的层位,矿体是多层的,矿床的分布面积很广,有时达数十公里。就生成时间而言,远成热液矿床属于向地台体制过渡的地槽的最终发展阶段。

B. П. 费多尔丘克认为,远成热液汞矿床是在温度为 $50\sim 250^{\circ}\text{C}$,压力达数千个大气压下生成的,而在构造形态方面可划分出:(1)有矿脉和脉状矿体的矿床以及有产于碳酸盐类岩石、陆源岩石、喷发岩和变质岩中陡倾斜破碎带中的交错矿体的矿床,其中金属矿物不仅充填岩洞,而且也呈交代产物发育;(2)成层的整合矿床——层状矿床。

根据A. C. 茹可娃的资料,远成热液矿床(“密西西比型”)的特点是分布面积很广(包括一定的地层或层位),与火成岩在空间上不相邻近,近矿蚀变表现得微弱或者完全不存在,矿物成分简单——闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白云石、方解石,胶状构造发育广泛,稀有元素和分散元素的数量很大,生成于强烈褶皱构造区,有成矿前的构造破坏发育。

C. И. 图尔钦科援引了含硫化物的凝灰沉积超基性岩的低温(350°C 以下)变质的资料。这种超基性岩发生低温变质时生成了先是相当于葡萄石-绿帘石相的矿物组合,后是相当于绿片岩相的矿物组合。科拉半岛贝辰加地区的硫化物铜-镍矿体的生成与这些变质相有关。

远成热液矿床在许多情况下兼有后生热液产物和沉积产物的标志，因此其成因是成矿理论中急需讨论的问题。

目前，对远成热液矿床成因的看法很不一致。

1. 岩浆-热液成因

这类矿床与埋藏在深部的火成岩岩体有关。许多人从以下几个方面来论证这个结论：（1）在某些矿床内除层状矿体外还有交错矿体；（2）围岩发生了某些蚀变（硅化作用、绢云母化作用和高岭石化作用）；（3）不同矿物共生组合矿石的生成有时具有阶段性；（4）矿物生成的温度较高，根据流体包裹体的均一化温度数据，为50到100~200°C。

2. 沉积共生成因

矿床是沉积共生成因的证据是，分布面积通常很广，产于一定的地层之中，矿体是层状的，附近没有火成岩，矿化不受构造控制。

3. 沉积变质成因

矿床是沉积变质成因的证据是，矿质是原生沉积层状同生聚集的，矿质在成岩作用、外力变质作用和变质作用时发生移动。

4. 在具有化学活性深部循环地下水的作用下生成的后生矿床

我们研究了顿巴斯纳戈尔山脊的多金属矿床、中喀尔巴阡山脉、哈萨克斯坦、高加索及其它地区的某些矿床以及受到外力变质作用的克里米亚道利达组的岩石、巴拉克拉瓦矿床的石灰岩、顿巴斯煤系的砂岩、粉砂岩和泥岩。所有这些岩石均属沉积岩，但是这些岩石在深部受外力变质条件下发生了很大的变化。证明这点的是很大一部分岩石基质产生了结晶作用，岩石被在岩石基质中通常占优势的石英、方解石或其它一些矿物组成的细脉切穿。

岩石和细脉的结晶温度是利用岩石基质矿物和细脉中的矿物流体包裹体均一化法确定的（见表1）。

表内数据及其它地区的类似材料证明温度很高，影响了岩石原始矿物成分发生变化、细脉的生成及金属矿物在岩石的交错岩洞和顺层岩洞中的聚集。

乌克兰科学院成矿规律室的实验工作确定，在温度为100°和300°C，压力分别为100和300巴的条件下，金属和非金属元素从顿巴斯、喀尔巴阡山脉和哈萨克斯坦的砂岩、粉砂岩和泥岩中被大量带出（见表2）。

在酸性介质中，当温度为100°C、压力为100巴时，沉积（后生）岩石中成矿元素初始含量的31~35%，变质岩石中成矿元素初始含量的10.9~22%转入溶液之中。当温度为300°C、压力为300巴时，7~10%以上的成矿元素从这些岩石中带出（见图）。

在岩石受到外力变质时成矿元素在岩石中发生移动，其证据是在巴拉克拉瓦石灰岩中方解石细脉的两侧生成的退色带内，锰、铅的数量有所增加，而其它一些元素的数量有所减少。

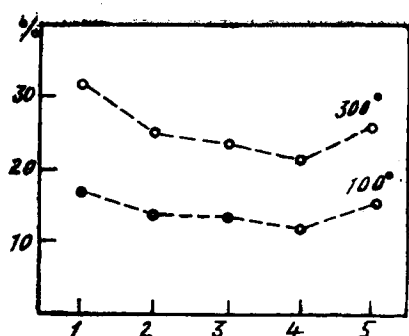
可以看出，在外力变质作用中沉积岩的变化是很大的，与此同时成矿元素发生移动。这就能使金属富集形成矿床。许多远成热液矿床的生成可能与沉积岩和火山岩的外力变质作用（前绿片岩的）有成因关系。沉积岩和火山岩中成矿元素的原始（沉积生成的）背景含量偏高。这些成矿元素在岩石受到外力变质时产生的热液影响下开始活动。证明这一点的

表 1 岩石和细脉的结晶温度

岩 石	均 一 化 温 度 (°C)	
	岩 石 基 质 矿 物 的	细 脉 矿 物 的
1	2	3
道利达组有机粘土石灰岩, 夹方解石细脉	100	方解石, 140~220
道利达组泥质石灰岩与石英长石砂岩的互层, 夹方解石细脉	未能测量	方解石, 160~230
巴拉克拉瓦露天采矿场(克里米亚)的大理岩化石灰岩	岩石基质中方解石 120~140	方解石, 210
巴拉克拉瓦区(克里米亚)钻孔中的有机粘土石灰岩	未退色的岩石基质; 方解石, 80~200	方解石, 110~190
	沿细脉壁带岩石的退色地段, 达300	方解石, 240~300
喀尔巴阡山脉耶尔沙夫矿床(捷克斯洛伐克)的菱镁矿	菱镁矿, 210~250	—
纳戈尔山脊的粉砂岩和泥岩	—	脉石英, 100~350
同 上	—	脉闪锌矿, 140~240
顿巴斯无烟煤、半无烟煤及其围岩	170~240	石英, 150~350
顿巴斯长焰煤及其围岩	70~90	石英, 150~350
尼基托夫卡矿床的辰砂及其它金属矿物	110~140	石英, 150~350

表 2

实验的 $P-T$ 条件	石英云母岩	石英绿泥石 微 页 岩	石英斜长石 白 云 母 岩	碳酸盐石英 绿泥石页岩	黑 云 母 岩 片 麻 岩
	1	2	3	4	5
$T = 300^{\circ}\text{C}$ $P = 300\text{巴}$	31.9	24.9	23.7	21.3	25.5
$T = 100^{\circ}\text{C}$ $P = 100\text{巴}$	16.7	13.8	13.2	11.9	15.5



在不同的 $P-T$ 条件下成矿元素从低级变质相岩石中的总平均带出量（占岩石中初始含量的百分数）

说明见表2

事实如下：（1）许多矿床都产在一定层位的一定类型的成矿元素含量偏高的岩石中；（2）围岩中许多元素（氧、硫、铅、碳）的同位素比值与矿体中的同位素比值非常接近，它们的化学成分和所生成的矿物共生组合也相似。

超变质作用引起的成矿作用及其 与深成热液成矿作用的关系

超变质作用是在地槽区褶皱构造生成的最终阶段发生的，超变质作用波及的地壳面积有限，表现得也不均匀（呈带状）。超变质作用是在区域变质作用的角闪岩相和麻粒岩相岩石中因大量热能和流体进入而形成高地温异常的地方发生的。它是在开放系统条件下，当物质被变质流体带入和带出时完成的。

在前寒武纪杂岩中常见变质岩与花岗岩类岩石紧密地结合在一起，二者互层，形成混合岩。变质岩沿走向和倾斜逐渐为花岗岩类岩石代替。在前寒武纪地层中，片麻混合岩杂岩发育很广，被看成是在变质岩中生成酸性岩浆区的实例。

目前，地质资料和实验资料证明许多情况下花岗片麻岩杂岩在生成时没有经过熔化阶段。这时变质岩因原生物质的再结晶作用 and 高温钾钠交代作用受到了超变质作用，变成了花岗岩类岩石。在变质岩中出现花岗岩类岩石在所有情况下都是超变质作用发育的标志。

因此，超变质作用乃是变质岩（原始沉积岩和火山岩）经过再熔化、再结晶、岩浆改造和交代改造的复杂过程。

超变质作用在世界各个地盾上的表现程度是不同的。超变质作用在太古代和早元古代岩石中发育最广，在晚元古代岩石中发育较差。

在超变质作用波及的地区内产生了残余溶液，这种溶液的基础是在岩石再结晶和再熔化时发生了变化的变质流体。这种溶液中富集了未进入超变质作用时生成的岩石的矿物晶格中的金属元素和非金属元素。在有利的情况下，特别是在在受到超变质作用的岩石富含金属组份时，残余溶液可能起成矿溶液的作用。

超变质矿床是在岩石发生变质再结晶时以及在渗透性岩层狭窄带内的花岗岩化后溶液的影响下形成的。超变质矿床是含矿的花岗岩类岩石、似结晶岩、各种不同的退化变质岩（钠长岩、滑石菱镁片岩、黄铁细晶岩等）。这些岩石常常构成具有退化变质阶段特有

的矿物共生组合构造交代带。

含有铁、镁、钙、钠、钾、稀有金属和有色金属的花岗岩化后的流体和溶液沿破碎带上升到有层理的变质岩区，沿途能够富集新的元素。

在绝大多数情况下能够与岩浆期后（深成热液）矿床区分开的超变质矿床的特点如下：

1. 矿体的分布通常受到延伸很长的褶皱裂隙构造的控制。这种构造往往沿着较窄的揉皱带——糜棱岩、碎裂岩或变质糜棱岩发育。在变质岩和超变质岩中，这些含矿带在许多情况下延伸数十甚至数百公里。而在个别情况下延伸数千公里。含矿带作为交代产物叠加在变质岩和超变质岩之上。

2. 交代岩的前缘通常很广，这就使得围岩起了根本的变化，而矿体在其中所占有的位置却比较小。

3. 这种类型的矿床主要分布在花岗岩化区附近的变质岩中。同时该区的侵入体的时代比变质作用和成矿作用的时代为晚。

上述区分超变质矿床与岩浆期后（深成热液）矿床的准则并非在任何情况下都是十分固定的。不是在所有情况下都能根据这些准则确定矿床的成因类型，特别是当矿床分布在变质岩中和在热液（热水溶液）的作用下生成时尤其如此。矿床可能与超变质作用或岩浆期后作用有成因关系，根据形成条件来看都属于热液矿床，但是根据分布规律来看彼此又有所不同。

如果考虑到绝大部分花岗岩是在地壳岩石超变质作用过程中生成的上述观点，那么当然可以认为，在岩石花岗岩化时酸性岩浆在一定的构造条件下能够沿薄弱带移动，因而生成深成酸性岩浆源。岩浆在这些岩浆源中结晶致使生成深成热液金属矿床。

因此，可以把位于地盾变质岩中的深成热液矿床看作是超变质成矿作用的一种局部情况。

研究变质成矿作用的一个很大的缺陷是对各种最贵重的大量的金属矿床与之有成因关系的伟晶岩重视不够。在前寒武纪，伟晶岩是在岩石的超变质作用和高级变质相过程中生成的。这种超变质作用能使变质岩发生再结晶作用，生成石英-斜长石和石英-微斜长石成分的似细晶岩花岗岩类岩石（或者普通的似伟晶岩），也能使花岗岩类岩石的矿物在气成热液影响下发生再结晶和交代作用，形成几个世代的石英、电气石、云母，以及钠长石、磷灰石和许多金属矿物。常常生成文象结构、石英核、粒晶和伟晶矿物集合体。伟晶岩在片麻岩（黑云母片麻岩和闪片麻岩）中呈厚度不大的延伸很长的夹层逐层产出的许多实例、伟晶岩参与褶皱拗折以及与围岩的成分相似都是伟晶岩是变质成因的证明。

学者们和地质学家们必须注意研究作为许多稀有金属和其它金属矿床和非金属矿床的潜在载体的前寒武纪含矿伟晶岩的形成条件。

变质作用的进化阶段和退化阶段在成矿中的作用

许多人认为，在动热变质作用的进化阶段不能产生成矿作用，因为这是岩石再结晶条件和造岩组份、造矿组份被带出占优势的等化学作用阶段。

不能同意这种观点。对受到区域性变质作用的大区、岩系、岩组或地质体来说无疑是