

[苏] M.A. 萨多夫斯基 主编

地震的电磁前兆

地震出版社

地震的电磁前兆

[苏] M.A.萨多夫斯基 主编

施良骐 郭才华 王光根 译

地震出版社

1986

内 容 提 要

本书首次系统地总结了苏联关于地震电磁前兆的野外观测结果，介绍了实验室样品变形与破坏时的机电转换过程，在分析观测资料、实验结果与孕震模式的基础上，建立了能够解释变形与电磁前兆现象关系的地震模式，还讨论了震前动物异常问题。

本书各部分的译者是：施良骐（前言、绪论、第二章）、郭才华（第一章、第五章与结论）、王光根（第三章、第四章）、刘毅、郭自强、周惠兰等参加了校对工作。

本书可供地震台站工作人员、地震分析预报人员、地球物理研究人员以及有关专业的师生参考。

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

М. А. Садовский

Издательство “Наука”, 1982 г.

地震的电磁前兆

〔苏〕М. А. 萨多夫斯基 主编

施良骐 郭才华 王光根 译

责任编辑 姚家榴

出 版

北京复兴路63号

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/32 3.75 印张 84 千字

1986年11月第一版 1986年11月第一次印刷

印数：0001—1,600

统一书号：13180·286 定价：0.90元

前 言

这本专著系统总结了在苏联境内进行临震电磁前兆观测获得的结果。苏联科学院施米特大地物理研究所和乌兹别克科学院地震研究所的研究人员为本书做出了贡献。

值得注意的有三种情况。

如果说日本和美国的研究人员也描述过地震前的光现象、大气电位和大地电场的扰动，那么只有在苏联才进行了地球和电离层电磁脉冲辐射扰动的观测。只是在最近，国外的研究人员才对电磁前兆给予了更大的注意。

我们第一次作了建立电磁性扰动模式的尝试。这一模式能够定性地解释这些效应出现的规模，它们之间以及它们与地震孕育条件之间的相互联系。这一模式的意义已超出了地震预报实践的范围。至今还局限在纯力学特性范畴的地球物理介质这一概念的含义变得更广了，并与固体物理的概念相一致了。

特别有意义的是地震孕育的新模式。这种模式的基础是：地质学对地壳的重要特性的研究，断裂力学的概念和固体力学的成就。

这一项有良好开端的研究工作还需要继续进行下去。目前得到的结果已可用来合理地计划野外实验和实验室的模拟工作。

毫无疑问，地球物理的综合研究工作将为岩石性质的研究，特别是为各种规模的破裂过程的研究，发展统一的物理概念，提供新的可能性。

文稿的编辑和出版的准备工作是由数学物理学博士 М.Б.戈赫贝格,数学物理学副博士 И.Л.古费尔德和 И.П.多勃罗沃利斯基完成的。

目 录

绪论	(М.Б. 戈赫贝格, И.Л. 古费尔德, И.П. 多勃罗沃利斯基)	(1)
第一章 野外观测		(15)
1. 电磁辐射 (ЭМИ) (К. Н. 阿卜杜拉别科夫, М.Б. 戈赫贝格, Г.А. 马夫利亚诺夫, Н.И. 米古诺夫, В.А. 莫尔古诺夫, М.А. 萨多夫斯基, Г.А. 索博列夫, В. И. 乌洛莫夫, А.А. 赫罗莫夫, С.С. 胡萨米季诺夫)		(15)
2. 大气电位的扰动 (АЭП) (М. Б. 戈赫贝格, И. Л. 古费尔德, И. П. 多勃罗沃利斯基)		(28)
3. 大地电磁场的变化 (ЭТП) (Г. А. 索博列夫, А. В. 波诺马廖夫)		(30)
4. 电离层效应 (С. С. 胡萨米季诺夫)		(33)
5. 地震的光效应 (В. И. 乌洛莫夫)		(37)
6. 地下物体带电 (В. И. 乌洛莫夫)		(37)
第二章 机电效应的实验研究		(40)
1. 破裂和摩擦过程中的生电现象、光现象和电磁辐射 (М.Б. 戈赫贝格, И.Л. 古费尔德, И.П. 多勃罗沃利斯基)		(40)
2. 准静态变形时离子键型物质的生电现象 (Г. А. 索博列夫, Г. И. 舍夫左夫)		(44)
3. 在应力场作用下电介质的极化 (Г. А. 索博列夫, Г. И. 舍夫左夫)		(46)
4. 动电现象 (М.Б. 戈赫贝格, И.Л. 古费尔德, И.П. 多勃罗沃利斯基)		(49)
第三章 地震电磁前兆源 (М.Б. 戈赫贝格, И.Л. 古费尔德, И.П. 多勃罗沃利斯基)		(50)

1. 地壳中机电转换体的组合——电磁扰动源·····	(51)
2. 电磁性扰动源模式的构造·····	(59)
第四章 具有地质结构的介质的固结与破坏过程·····	(72)
1. 关于地壳的性质及其运动(М.Б. 戈赫贝格, И.Л. 古费尔德, И. П. 多勃罗沃利斯基) ·····	(72)
2. 中亚的震源空间分布及其迁移特征(Н. В. 奇加列夫)···	(79)
3. 孕震期及其前兆(М.Б. 戈赫贝格, И.Л. 古费尔德, И.П. 多勃罗沃利斯基) ·····	(81)
第五章 震前动物反应(А.А.尼科诺夫, Е.А.法伊迪什)···	(86)
结论·····	(107)
参考文献 ·····	(109)

绪 论

顾名思义，地震是一种地震波引起的地面震动现象。对于这本专著所研究的对象——构造地震来说，波动源，即震源是在构造应力作用下地球内部所产生的破裂。地震这个术语经常被理解为下述所有现象的综合：震源的形成，它的扩展和地震本身。

地震学的一项最重要的成果是：它认为地震并不是一种突然的事件，而是经过或长或短时间的一个孕育过程，在孕震过程中表现出各种各样的物理现象。这就为地震前兆的发现提供了条件。目前，地震前兆的存在可以认为是确定无疑的了，（例如〔1〕）。对地震前兆意义的估计怎么也不会过分，它们对于了解地震的孕育和发展过程有很大的意义，并且为地震预报奠定了现实的基础。下面还要专门谈 这 些 问题。

地震是这样一种自然现象，我们不仅没有可能用实物试验来重现它，也不可能直接在地球内部按所要求的详尽程度来观测其孕育和发展的过程。正在迅速发展的震动透视法可能会带来某些希望，但这是将来的事。那么，我们关于地震的知识又是怎样来的呢？

首先，这种知识来自在地震孕育过程中和地震时，我们在地表以及在深处（矿井和钻孔中）所观测到的现象（孕震过程中观测到的现象为前兆）。这一类信息反映的是自然事件的资料，因此它对于所研究的事件来说是可信的。关于深部过程的很多概念是直接从前兆的分析得来的。

其次，是关于岩石和模拟材料变形和破坏的实验资料。在这些实验条件下，有可能对多种可能的地震孕育和发展过程中的个别因素进行物理模拟。对这种模拟结果的解释必须特别谨慎。不要忘记，物理模拟得到的只是反映实验者主观思想的模型的真实数据和实验模拟材料的具体信息。

第三是地球物理学和地质学关于地球内部的结构和组成，关于全球和区域性过程的资料，而地震只是这些过程的一个特例。

最后第四是物理学，尤其是力学的一般规律，因为地震的孕育和发展过程首先是力学过程。

对所有资料的综合分析将会导致地震模式的建立。我们所指的地震模式可以理解为对主破裂之前、之后和伴随其发生的过程的描述，这样，地震模式中还包括震源的形成和扩展。但是，通常震源的扩展在很大程度上是独立发生的。地震孕育模式中还包括临震前的过程。

到目前为止，已有很多不同的地震模式，而其数量由于新的模式的出现和老的模式的改进还在继续增长。这种自然的进程不仅反映了人们精益求精的意愿，而且还有其它原因。问题在于，现有的模式中还没有一个能够解释全部前兆现象。新的前兆现象的发现或者有了关于老的前兆现象的新的数据，都会导致对地震模式的修正。此外，区域性地质构造环境的差异必然会造成地震孕育过程一定的差别。我们有理由期待更细致和更精确的区域性模式的出现，尽管这些模式的作者常常对问题的这一方面还是不够重视的。

下面我们对一些地震模式作一简要的论述，这里不打算面面俱到。在资料的选择过程中，我们将选取那些已经被较广大的研究人员所接受的，而且在某种程度上可以解释电磁

前兆表现的那些模式。

1. B.И.乌洛莫夫模式^[2] (1967年)

震源是一种由弹性应力积累达到极限引起的剪切破裂。

震源区岩石体积的变形分为四个阶段：

第一阶段：长期的、缓慢增长的弹塑性变形，伴随有大体积的压密过程（孔隙和微裂缝的闭合，较软夹杂物的变形）。

第二阶段：相对来说快速的弹性变形，同样伴随有岩体的体积减少和个别矿物晶格的破坏。

第三阶段：塑性变形，实际上并不伴随有岩石体积的缩小。这一阶段在巨大的各向压缩条件下，以岩体剧烈的剪切移动——地震而告终。

第四阶段：由于岩体的移动而产生弹性应力的松弛。这一过程伴随有震源上部区域内一系列弹塑性断裂破坏（重复的震动），并以震源区弹性应力的大量卸除而告终。在震源不深的情况下，在震中区地表产生缓慢的变形。此时，岩体体积的变化（增大）并不是单调地进行的，而是带有周期性重复震动的特点。这一阶段的持续时间与第三阶段相近^[2]。

2. Ю.В.里兹尼琴科地震状态的能量模式(1968年)^[3]

在此模式中，并不论述个别震源的孕育过程，而只研究在地壳中很大范围内，长时期起主导作用的过程，即构成地震状态所有过程的总和。这样提出了一种理论的地震状态连续性模式。在这个模式中起主要作用的是：积累在介质中的弹性势能和由能量准则所确定的随时间变化的岩石强度这两个量的相互作用。在数学上可以用其与空间和时间有关的各自的密度来描述。

维持地震状态所需势能的积累要靠地幔来补充，作为一

级近似，这种能量流被认为是与时间无关的。能量准则所确定的岩石强度是与岩石的物理状态有关的，因此它在时间和空间上会有很大的变化。在小的构造应力条件下，存在着使强度增加的因素，这是由使岩石物质固结的那些过程所造成的。“这里可能包括：熔融物质侵入到裂缝中并固化的过程，使破碎的岩石粘结和岩脉物质充填入裂缝的气成和热液过程，总而言之，是那些使所有被地震和断裂所破坏的岩体逐渐重新变成整体的、多种形式的物理和化学过程。”

与强度减小有关的因素有：宏观裂纹或局部高塑性区的形成、生长和汇合，其中还包括固态岩体连续性的缺陷。这些缺陷以震动的形式表现出来，产生构成地震背景的小震，但还不会直接导致大量介质的雪崩式、灾难性的和彻底的破坏——大地震。〔3〕

大地震发生在逐渐增长的势能密度达到极限允许值的地区。在所讨论的这个模式中，这一极限值的大小取决于势能密度的分布和由能量准则确定的介质强度。

3. 雪崩式不稳定裂缝形成模式^[4-6] (JIHT) (1971年)

这一模式的基本思想是在1971年在基希涅夫地震状态讨论会上由B.И.米亚奇金、Б.В.科斯特洛夫、Г.А.索博列夫、О.Г.沙明娜共同提供的报告中发表的。

震源（剪切破裂）是通过震源区大量剪切裂缝的发展和相互作用而孕育起来的。

第一阶段——均匀的破裂。在构造剪切应力的作用下，已有裂缝的数量和大小在缓慢地增长，并形成新的裂缝。裂缝分布相隔甚远，而且相互的影响很弱。在统计特性为均一的介质中，在均匀加载的情况下，裂缝形成的统计特性也是均一的。这相当于实验室实验中所发现的临界破坏阶段之前

的情况。

第二阶段——裂缝的雪崩式相互作用。向这个阶段的过渡是“在全部或大部分体积中，达到了某种临界的平均破裂密度时发生的。由于裂缝相互作用的结果，地震孕育的雪崩式阶段来到了，这是与材料破坏的超临界雪崩阶段相类似的”^[5, 0.54]，应力场变得极不均匀，更加剧了裂缝的相互作用，并使其中一些相对于应力场来说取向有利的裂缝延长。

第三阶段——不稳定阶段。“如果说这一过程导致了地震，那它必须是不稳定的。这意味着，变形的继续增加会导致应力下降。由于介质性质的不均一性，不稳定变形聚集在一条狭带上，并形成一些相对来说较大的裂缝。此时由于在大部分体积中宏观平均应力普遍下降，裂缝停止发展，而且局部地愈合了……。以裂缝集聚和增加为特征的不稳定变形的狭长区域就是未来地表断层的所在。这种断层地震是通过岩桥（Перемычки）开裂而形成的”^[5, 0.55]。

关于时间的长短，文献[6]指出，对于灾难性地震第一阶段延续几百到几千年，而后两个阶段大约总共也只有几十年。

4. B. 斯图尔特^[7]（1974年）提出了与雪崩式不稳定裂缝形成模式类似的模式。主要的区别在于，地震前形变集中在与断层相重合的窄带上。断层周围破碎的岩石的特性在宏观上与具有下降的应力-应变曲线的材料一样。

5. 扩容-扩散模式（ДД）^[8-10]是1972年在美国提出来的。

在此模式中，裂缝的形成也具有决定性的意义，但与雪崩式不稳定裂缝形成模式不同，这里有张性裂缝产生，而且重要的是震源区岩石中有水存在。

第一阶段——弹性阶段。在此阶段中弹性应力增长，特别重要的是主应力的差值在增长。介质的物理状态在此阶段实际上不变。

第二阶段——扩容阶段。当主应力的差值足够大时，就有张性裂缝形成，因此岩石体积总的来说增加了——扩容。周围介质中的水进入到已形成的孔隙之中，岩石本身排水，孔隙压力下降，岩石强度提高。

第三阶段——扩散阶段。由于岩石本身排水，使得水在地震孕育区内扩散，孔隙压力增高，岩石强度降低，这一过程以主破裂形成告终。

一些作者（例如[8]）指出，扩容区可能远大于震源，而地震孕育时间的长短在很大程度上是由扩散时间决定的。

6. B.布莱迪(B. Brady, 1974年)^[11-13]在实验室条件下分析石灰岩标本的变形和破坏过程时，提出了地震孕育的四阶段模式。

I——扩容阶段。震源区全部岩体中形成大量裂缝。

II——包体阶段。裂缝在某些局部区域发展特别剧烈，这些区域即有效弹性模量减弱的区域，可以看作为软包体（据估算，弹性模量减少到三分之一）。

III——裂缝闭合阶段。包体的存在使应力重新分配，结果使取向有利的裂缝增加了，而其余则闭合了。

IV——增长阶段。由于应力的持续增长，裂缝重新张开，并在相互作用的情况下剧烈地增长，直到某些裂缝达到临界长度为止。

7. И. П. 多勃罗沃利斯基^[14]（1980年）的不均一体（包体）综合模式。

上述模式虽然对主要细节的论述各不相同，但多少还有某些共同的特点，因为它们所描述的是同一事物。忽略有不同理解的细节（这对于建立“工程”计算方案是有益的），同时又用一种易于细节化的形式，对地震孕育过程作更一般的描述，这样一种企图就会导致不均一体综合模式的建立。它的出发点和思路如下：

前兆是地震发生之前某些物理参数或物理场的异常表现。这些物理场的扰动，在时间和空间上局限于未来震源附近。物理场局部扰动这一事实证明，在介质初始状态的背景上形成了物理力学性质的某种不均一体（包裹体）。根据这个观点，地震孕育的过程就是不均一体的形成、发展和崩溃过程。这一过程有三个阶段：

I ——不均一体的发展阶段。不均一体在某一时刻形成，此后其几何形状和物理性质发生缓慢的变化。确切地说，起决定作用的性质在增长，弹性势能在积累。它在周围介质中引起各种物理场和物理力学性质的扰动。扰动随着距离的增加而减弱，其涉及的体积要比不均一体本身大得多，而在地面上它们被作为前兆记录下来。这一阶段的持续时间，可以比用经验确定的前兆显现时间长几倍^[15,16]。在此阶段前兆是属于长期性的，并且仅仅证明不均一体在形成。

II ——不均一体的崩溃阶段。在上一阶段的末期，不均一体达到了临界的不稳定状态并开始崩溃，此时势能减小，介质恢复到接近起始的状态（第一阶段之前的状态）。地震发生的时刻把这一阶段分成两个阶段：前震阶段和余震阶段。前震阶段的特点是势能最大限度的积累，此时发生的地震是非常剧烈的，而前兆应属于短期性的，它们是已经开始

了的破坏过程的结果。前震阶段的持续时间可短至第一阶段的几十分之一。在主破裂后的余震阶段中，强度正在减弱的，不均一体的破裂还在继续着。

Ⅱ——平静阶段。这是处于背景状态的阶段，在此阶段内构造过程的进行在地震方面的表现是平静的。这里并不排除在某些条件下，余震阶段会立即转变为新的地震的孕育，这样第三阶段也就不存在了。

8. И.П.多勃罗沃利斯基固结的包裹体模式^[4] (МКВ) (1979年)。

这个模式是1979年在加尔姆举行的苏联科学院大地物理研究所综合地震考察队的一次纪念会上首次提出的。这是在不均一体为固结的包裹体情况下，不均一体普遍模式的一个具体变种。这里固结过程被认为是一种与裂缝形成相反的过程。在这个过程中，缺陷愈合，介质连续性恢复，使刚度增加。在此模式中并无有关破坏阶段的详细说明，但主要的是描述了大地构造环境和初始介质的状况。

地壳中有大量断裂和其它不同级别的破坏，形成块状的构造，而地壳的各个部分则处于不停的相对运动之中。重要的是，地震的孕育对远离震中区的这种运动并不起扰动作用。

第一阶段。有时在某一地方，例如由于块体边缘的不平整性，相对移动停止了，这一地方的介质固结了起来。这种对移动的限制给附近体积中缺陷的愈合创造了有利条件，而固结区，即固结了的包裹体在增长着。刚性的（固结了的）包裹体在与介质的相互作用中形成一个体系，在这个体系中发生着复杂的应力重新分布和势能积累的过程。

第二阶段。在包裹体内外日益增长的应力使包裹体的增

长停止下来并开始破碎，这是通过微裂缝大量形成、塑性变形、前震、主破裂和余震来实现的。不均一体的崩溃，在前震阶段只能通过固结了的岩石日益加剧破坏的过程来实现，那么在这种情况下，有可能出现以弛豫时间短为特征的电磁现象。

包裹体的大小可根据下述情况确定。既然作为能量上最有意义的事件——主破裂，把整个不均一体都粉碎了，那么包裹体应与震源的大小相近^[17]。

9. 里德弹性回跳理论^[17] (1910年)

我们深信，如果不提及里德的著作，任何对地震孕育模式的评述都不能认为是完全的。甚至事过七十年，里德的概念仍未失去它的意义，而且还是非常现代化的。正因为如此，所列举的关于地震孕育模式的论述违反了时间的顺序，把对里德著作的分析放在最后。在B.B.科斯特罗夫^[16]的书中广泛引用了这一著作。

当然，里德的观点，其中包括关于固体强度等概念，反映了那个时代科学的状况。即使如此，我们也不能不感到惊奇，里德对构造地震孕育过程描述的主要方面是如此精确和明确。实际上在他的著作中肯定了：地壳在不断运动，而且地震的孕育是在这种运动受到某种阻碍时开始的，否则就难以解释在不断运动的背景上初始变形增长所具有的渐进性和局部性。阻碍是带有局部性的，而阻碍引起的变形扰动随着距离的增加减少得较快。最后，在某一时刻阻碍物受到破坏，产生地震波源——震源。

在继续对里德的著作进行逻辑分析的时候，要注意到，从肯定初始变形增长的缓慢性 and 局部性出发，可以得出存在有形变前兆，至少是长期前兆的结论。同样变形也可能伴随

有其他物理现象，这些现象已不仅是反映力学性质的现象，而是其他前兆产生的条件。

我们认为，回顾性地分析里德过去的工作是很有意义和大有益处的。

上面列举的模式可以分为两类：一般的和特殊的。

里德、Ю.В.里兹尼琴科和И.П.多勃罗沃利斯基的一般模式，试图描述构造地震固有的特征，如果这里指的不是所有构造地震，那至少是其中最重要的类型——强构造地震。这些模式还可以更详细一些，并派生出新的很不相等的各种具体的模式。

从这三种模式的分析中已经可以揭示出对地震过程认识发展的基本趋势。在里德的著作中提出了两个主要方面：由于地壳不断相对移动而引起弹性势能的积累和表现不甚明显的孕震区域的局限性。对初始介质的描述是相当概括的。Ю.В.里兹尼琴科在他的地震状态模式中，对介质的描述是较详细的。地震的孕育包括在岩石交替地强化(固结)和弱化(破坏)的总过程之中。介质的强度和势能在空间和时间上的分布是复杂的，并决定了未来震源体的大小。在И.П.多勃罗沃利斯基的模式中没有对初始介质进行描述，但对由于前震、主破裂和余震而发生、发展和破坏的不均一体进行了研究。这个模式对孕震区和介质之间相互作用的描述比较具体，并且指出它与前兆显现区域震源特性有较紧密的联系。不均一体的特性是与介质的初始性质和大地构造环境相关的。

其余都属于特殊的模式，我们使用这种简短的术语阐述各种模式只是想指出它们的特点。这些特殊模式的产生和发展，在不小的程度上是由断裂力学，包括裂缝力学的产生和发展引起的。过多分析不同知识领域相互作用的益处未必是