用于空间天气预报的地基太阳观测 A.G. Tlatov[1]，A.A. Pevtsov[2]

[1]普尔科沃天文台基斯洛沃茨克山地天文台，基斯洛沃茨克，357700，俄罗斯 [2]美国国家太阳天文台，美国科罗拉多州博尔德，80303

本文探讨了如何建立太阳活动观测服务，以提供空间天气预报。目前最有前景的方案是建立地基观测网络。该网络应包括用于观测太阳大尺度磁场的太阳磁像仪，以及用于探测日冕物质抛射和太阳耀斑的巡天光学望远镜。磁像观测数据可用于评估重复性太阳风。持续运行的巡天望远镜能够探测喷发发生的时刻，并确定日冕物质抛射在初始加速阶段的参数。该网络服务还可补充射电和光学波段的其他类型观测。本文还探讨了观测设备的组成，以及预报方法和模型。

地面 观测 太阳 用于空间天气预报 A.G. 特拉托夫1，2 1A.A. 佩夫佐夫

俄罗斯科学院基斯洛沃茨克山地天文台 [2]美国国家太阳天文台，美国科罗拉多州博尔德，邮编80303

本文探讨了建立太阳活动观测服务、以支持空间天气预报的可能性。现阶段最有前景的方案是建立地面观测网络。该网络应包括用于观测太阳大尺度磁场的太阳磁像仪，以及用于探测日冕物质抛射和太阳耀斑的巡天光学望远镜。磁像仪观测数据可用于评估太阳风的重复性。连续运行的巡天望远镜能够探测爆发发生的时刻，并确定日冕物质抛射在初始加速阶段的参数。该网络服务还可补充其他无线电和光学波段的观测。本文探讨了用于支持预报的观测设备构成，以及相关方法和模型。

1. 引言

目前，太阳及日地关系研究中最迫切的课题之一，是研究和预报由太阳活动引发的空间天气（КП）。空间天气的各种表现可能影响地球大气层和太空中的许多技术系统。太阳耀斑可能产生强烈的X射线辐射，使用于无线电通信的高频无线电波衰减或中断。高能太阳粒子（高能质子）可能穿透卫星机载电子设备，导致航天器发生故障。地磁暴可能改变无线电导航系统（GLONASS、GPS、全球导航卫星系统）的信号，降低地理定位精度。地磁暴还会引发极光。

目前，太阳磁场及其所影响的日冕结构，以及与之相关的、波长范围从无线电波到X射线的电磁辐射观测，在当前预报和太阳效应预测中占据核心地位。空间天气预报最需要的信息包括：1）以耀斑、高速太阳风流和日冕物质抛射（KBM）为表现形式的太阳活动水平。这些现象是电网、管道、全球定位系统（GLONASS、GPS）及其他航天器运行受扰，以及航天器发射受影响的先兆；2）对极紫外（EUV）波段太阳辐射通量的评估。这些信息对于从数天到数年的时间尺度都很重要，可用于各种空间天气模型，应用范围从卫星阻力／轨道衰减到电离层特性；3）商业航空、载人航天（包括国际空间站）和卫星所在高度的宇宙射线通量。此外，太阳风暴期间，高能粒子还会阻断高纬度地区的无线电通信。

空间天气研究属于应用科学领域。理解和建模空间天气现象颇具挑战，因为其中涉及的物理机制多种多样且十分复杂，自然难以形成简单明确的对应关系。基础研究旨在理解具体自然现象发生和发展的原因，无论是引发射电暴的太阳耀斑、导致电离层电流系统增强的磁场变化，还是产生闪烁的电离层电急流；同时也旨在设计结构并提高技术系统的可靠性。

美国在空间天气研究领域处于领先地位。该国已建立一套完整的观测、分析和建模体系，能够提供实时预报并制定建议。美国负责发布空间天气预警的官方国家机构是空间天气预报中心（SWPC），该中心成立于2007年。SWPC全天候运行，全年无休。我国可借鉴其他国家积累的经验，结合现有的危险自然现象预警和预报系统、观测手段以及科研和信息中心，发展本国的空间天气预报体系。

“空间天气”一词通常用于描述 космической среды 的“影响”，而不是 космической среды 本身的物理学。目前，空间天气属于更为广泛的研究方向“日球物理学”，该领域正在蓬勃发展，并帮助人们理解了许多决定 космической среды 的太阳物理学和空间物理学现象。日球物理学通常分为以下三个与空间天气相关的子领域：太阳与日球层物理学，涵盖太阳和行星际空间；磁层物理学，描述靠近地球的行星际空间区域，在那里，物理过程仍受地球磁场控制；以及高层大气物理学，重点研究位于平流层高度以上的大气层，包括中间层、热层和外逸层，以及它们的电离部分——这些部分共同构成电离层。

本文仅讨论日球物理学领域，以及与太阳物理学直接相关、尤其是与太阳活动观测相关的空间天气方面。

2. 空间天气预报的构建原则 2.1. 空间天气的主要因素

目前，空间天气预报系统的主要组成部分是评估高速太阳风流，以及预报日冕物质抛射的地球效应。

太阳风（CB）以平均速度 ≈400 千米/秒不断从太阳日冕流出。太阳风是一种含有冻结磁场的等离子体，其流束充满行星际空间。在平静时期，当太阳上没有耀斑式扰动，也没有导致加速等离子体从日冕间歇性抛射到行星际空间的现象（这类现象称为日冕物质抛射，KBM）时，所谓的宁静背景太阳风会在行星际空间形成一种准稳态结构，该结构主要由两个因素决定：一是宁静日冕中流束初始流出速度随太阳坐标的分布，二是太阳自转。流束随后沿径向传播，形成了众所周知的太阳风结构，其磁场呈阿基米德螺旋形，螺旋的间距由当地的太阳风速度决定。即使在太阳活动平静时期，太阳风速度也可能达到 ~700 千米/秒或更高。如果太阳风流形成于日冕洞并朝地球方向传播，就会出现这种情况。这些来自磁力线呈开放构型区域的高速太阳风流，是影响空间天气的主要因素之一。评估这些流束并预报其未来数日的强度，是空间天气服务的工作内容。评估这些流束以及确定行星际等离子体的“背景”参数，也是模拟日冕物质抛射传播的起点。大尺度磁场构型的典型变化时间为数小时。因此，磁场观测每天应至少进行数次。

日冕物质抛射是导致强烈地磁扰动的主要因素之一。日冕物质抛射既会在太阳活动区内发生，例如太阳耀斑期间，也会在活动区外发生，例如宁静纤维的爆发。物质抛射过程持续时间从几十分钟到数小时不等。因此，要探测日冕物质抛射并确定其参数，需要进行连续全天候观测，观测间隔不超过 5–15 分钟。

ут.

空间天气服务应以对太阳活动的连续观测为基础，同时包括数据初步分析和活动指数生成的实时处理流程。

磁场和太阳活动观测数据作为边界条件，输入描述太阳风和日冕物质抛射（KBM）在行星际介质中传播的模型。与此同时，空间天气预报还可纳入太阳耀斑和日冕物质抛射地球效应的预报方法。

因此，在空间天气预报系统中，首要信息来源是太阳风重复流的信息以及日冕物质抛射数据。为获取这些过程的信息，需要使用各种观测手段。评估太阳风参数时会使用全日面磁像仪。要记录日冕物质抛射，则需要对太阳色球层或近日冕进行连续观测。

2.2。观测磁场并对重复流进行建模 流 太 B

太阳风是在太阳日冕磁场的作用下形成的。对太阳风形成最为重要的是太阳表面变化相对缓慢的大尺度磁场。目前，这类磁场是通过太阳光球磁场磁像仪对整个太阳圆面进行观测的。在国产仪器中，最适合观测大尺度磁场的是新一代СТОП（太阳快速预报望远镜）（Пещеров 等，2013）。该仪器是在对萨彦太阳天文台正在使用的旧款

СТОП进行深度改造的基础上 由太阳—地球物理研究所受俄罗斯水文气象和环境监测局委托，在“地球物理学”联邦专项计划框架内研制。此类望远镜共制造了三台， 分别安装在以下天文台：贝加尔 天文台（太阳—地球物理研究所，伊尔库茨克）、 乌苏里斯克天文台以及主天文台高山天文站（主天文台高山天文站）。 2014年 主天文台高山天文站观测场开始定期观测 使用 磁像仪 СТОП (Tlatov 等, 2015a)。这些观测至今仍在持续，从未间断。在乌苏里斯克和伊尔库茨克，未能实现磁像仪的定期监测观测。

太阳光球层磁场通常通过塞曼效应进行观测。电子磁矩与外部磁场之间的相互作用会使原子能级发生分裂。谱线分裂为两个分量，每个分量都具有各自的偏振状态。在沿观测者视线方向（LOS）存在磁场时，谱线会分裂为两个发生位移的分量 σ，它们具有圆偏振，以及一个未发生位移的分量π。波长位移Δλ 与磁场 Bl 成正比，Δλ~ Bl。这就是所谓的纵向塞曼效应。当磁场垂直于视线方向（Bt）时，发生位移的分量呈线偏振。这种现象称为横向塞曼效应。在实际应用中，偏振谱线轮廓通过斯托克斯参数（I、Q、U、V）进行描述。斯托克斯参数 I（λ）表示随波长变化的强度。参数 Q（λ）表示线偏振中垂直分量与水平分量之间的强度差。参数 U（λ）表示在线偏振角度为+45 和 - 45°时的强度差。参数 V（λ）表示右旋圆偏振与左旋圆偏振之间的强度差。线偏振信号（Q、U）通常比圆偏振（V）弱一个数量级。通常，Bt 分量的测量灵敏度极限约为 100 G，而 Bl 分量的仪器灵敏度为~1-10G。

要对日冕中的大尺度磁场进行建模，必须测量强度约为数个高斯的弱大尺度磁场，因此只有 Bl 分量的观测适用于此目的。图1展示了根据СТОП磁像仪和GONG观测网络的数据得到的太阳大尺度磁场分布。为便于比较弱磁场，给出了 $B^{0.5}$ 的数值。为消除年变化，对高纬度地区的 GONG 数据进行了外推。我们可以看到，两种观测数据总体吻合良好。同时，也能发现一些差异。例如，在2019—2020年活动低谷期间，赤道附近存在差异，这与 GONG 数据的零点偏移有关。即使是如此微小的差异，也可能对日冕磁场建模结果产生重大影响。需要指出的是，СТОП和GONG磁像仪采用了不同的设计。СТОП是基于光谱仪的磁像仪，而GONG是滤光片式磁像仪。

为了生成完整的磁场日面磁图，我们根据太阳圆面上观测平均误差最小的准则，为每个观测日选取最佳磁图。确定能够为所选日面磁图提供数据的观测日列表。随后，对日面磁图的每个经度以及观测日列表，计算权重函数 w=1/Δt2，其中 Δt 表示日面磁图上的经度与当前观测日中央子午线经度之差。与中央子午线相差超过 60 度的观测日不予考虑。所有能为从编号 l 到 m 的该经度提供数据的观测日 k 的权重函数之和应为 1：重建时考虑了太阳赤道倾角 b。根据视线方向的观测数据生成的日面磁图，在假设光球处磁场为径向磁场的前提下进行了去投影处理（Harvey and Worden, 1998;Wang and Sheeley, 1992）。

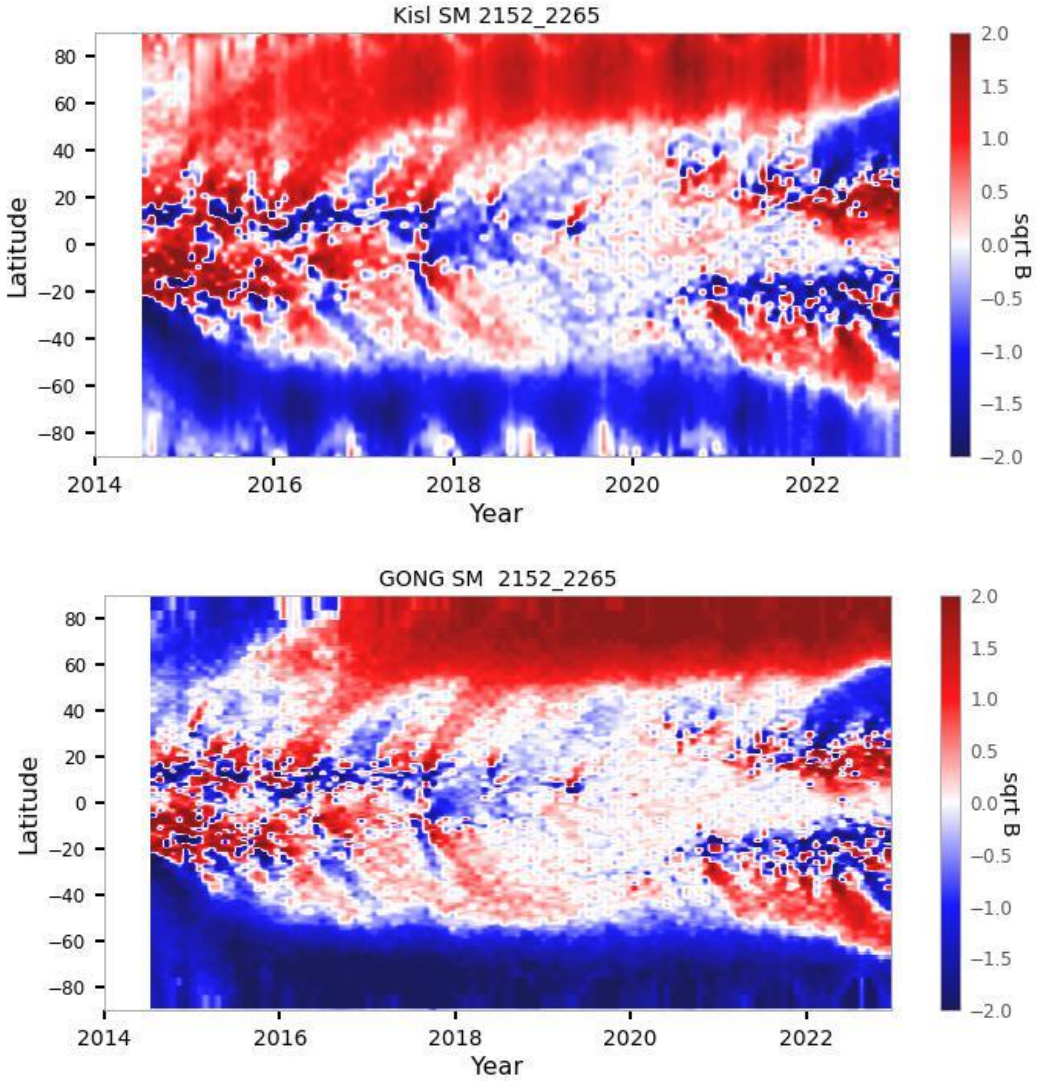


图 1. 太阳磁场分布的纬度—时间图。a) 根据基斯洛沃茨克СТОП磁像仪的观测数据；b) 根据GONG网络的观测数据。

源表面势磁场模型（PFSS）被广泛用于模拟日冕中的全球磁场。该模型将以日面磁图形式表示的光球磁场作为内边界 R=1 处的边界条件。模型假设，在距离太阳中心 2.5R 的假想源表面上，磁力线为径向（Schatten, Wilcox, and Ness, 1969）。

尽管太阳风加速机制尚未完全明了，但过去几十年来，日冕磁场几何形态与太阳风速度之间的相关性已得到证实。太阳风源自日冕中的开放磁场结构，并沿开放磁力管加速（Parker，1961）。其主要源区是被称为日冕洞（КД）的区域，其密度和温度低于背景日冕。日冕洞中的磁场以单极性为主。日冕洞的形状、大小和位置随太阳活动周期显著变化，太阳风的结构也相应发生变化。Wang and Sheeley（1990）利用磁场的日面图和 PFSS 模型，计算了磁通管膨胀因子（FTE）。他们发现，FTE 参数与在黄道面观测到的太阳风速度之间存在显著的负相关。磁场膨胀因子 fs

通过比较源表面每个点 P 处计算得到的强度 B^p(Rs) 与沿磁力线追踪至光球后对应的数值 B^p(Ro)，即可确定。数学表达式为:

$$f_s = (R_\Theta / R_S)^2 \left[B^P(R_\Theta) / B^P(R_s)\right], \quad (1)$$

其中，Br(Ro) 和 Br(Rs) 分别是同一条磁通管在太阳表面和源表面上的磁场强度。Arge and Pizzo (2000) 提出了一种用于建立 FTE 与太阳风速度之间联系的经验函数。该函数在约 3 年的时间段内，使模型与观测到的太阳风速度之间呈现出显著相关性（~0,4）。Arge et al. (2004) 后来修改了该经验函数，增加了一个额外参数（θb），用于描述光球上开放磁力线脚点与最近的日冕洞边界之间的最小角距离。来自大型极区日冕洞中心的磁通管具有较大的角度 θb，因此产生更高的速度。分析结果（Berezin, Tlatov, 2022）表明，参数 θb 的预测价值远高于膨胀因子 fs。

太阳风从太阳向地球轨道作运动学传播后，可以提前数天预报地球轨道处 IMF 的速度和极性（相对于太阳方向）。这一模型称为王-谢利-阿格模型（WSA），目前广泛用于空间天气预报。该模型的输入数据是基于磁图获得的太阳磁场日面图，用于提供随时间变化的背景太阳风等离子体和行星际磁场描述（图 2）。Arge et al. (2004) 提出的经验函数表示为:

$$V(f_s, \theta_b) = 265 + \frac{1.5}{(1+f_s)^p}\left\{a - be^{-(\theta_b/\theta_0)^q}\right\}^n \text{km s}^{-1}, \quad (2)$$

针对 СТОП 磁像仪的数据，对该关系进行了优化（Berezin, Tlatov, 2022）:

$$V(f_s, \theta_b) = 265 + \frac{3.4}{(1+f_s)^{0.03}}\left(3.14 - 2.97e^{-(\theta_b/2.5)^{0.47}}\right)^{6.5} \text{km s}^{-1} \quad (3)$$

太阳风的输出数据随后会传入耦合的磁流体动力学（MHD）模型，例如，ENLIL。或者传入其他 太阳风传播模型， 例如， 弹道模型。 该 模型根据源表面传播太阳风流，如ГАС所采用的方法（http://solarstation.ru/sun-service/forecast）。在此过程中，快速和慢速太阳风流可能相互作用。 图3展示了一个基于СТОП望远镜数据，对地球轨道处太阳风参数进行实时预报的示例。预报数据会在网站上实时更新(http://solarstation.ru/sun-service/forecast)。

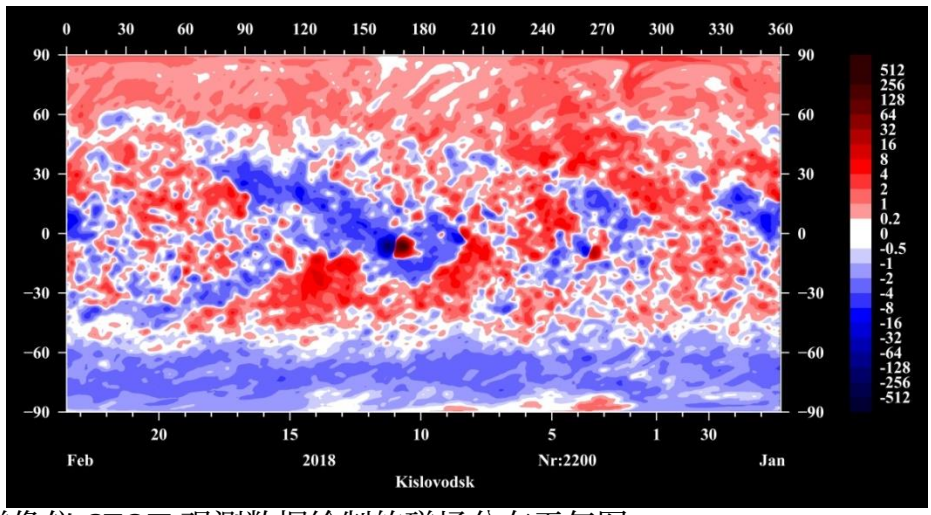


图 2。基于磁像仪 СТОП 观测数据绘制的磁场分布天气图。

根据СТОП、WSO、GONG、SDO/HMI磁力仪数据计算的太阳风速度模型，在某些时段与ACE卫星的测量数据相当吻合（图4）（Berezin、Tlatov，2021年）。模型与观测结果之间的差异可能与太阳风扰动以及磁场观测误差有关，尤其是在极区（Jian等，2011年）。在所考察的地面仪器中，WSO和СТОП在计算太阳风参数和日冕洞参数方面的精度最高。此外，在所考察的时段（2014—2019年），在模型参数相同的情况下，地面WSO和СТОП测量数据计算的平静太阳风速度平均而言优于卫星测量数据（SDO/HMI）。精度最低的数据来自GONG网络，其在2015年呈负相关；不过，通过适当的极区校正，结果可能会有所改善。

模型平静太阳风振幅的系统性偏差可能与 WSA 模型经验系数的时间变化有关，尤其是系数 q（公式 1）的变化。 выявление上述变化原因将有助于提高预报质量。

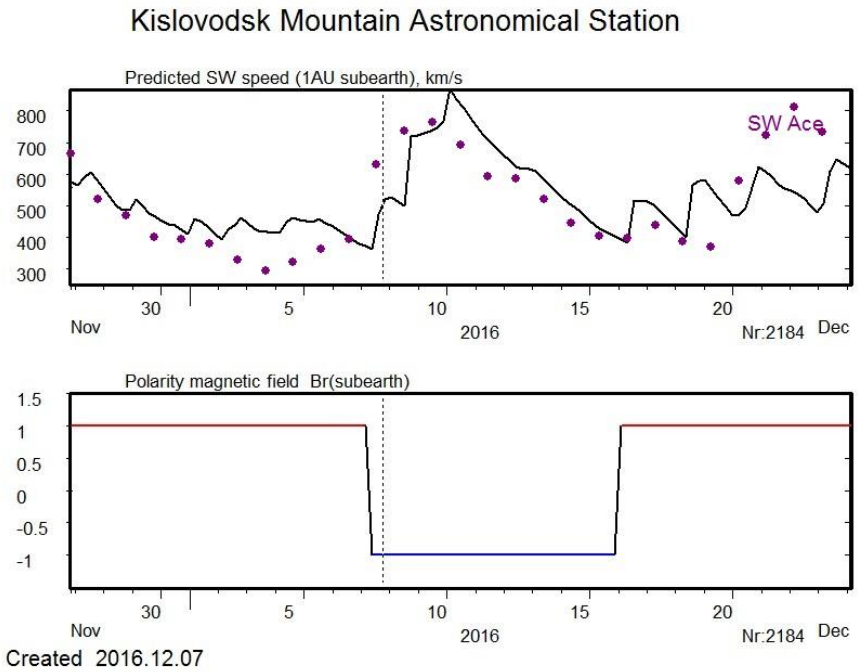


图 3。2016年12月7日基于 ГАС 完成的太阳风速度和极性实时预报示例，以及与 ACE 天文台观测数据的比较。虚线标示预报日期。

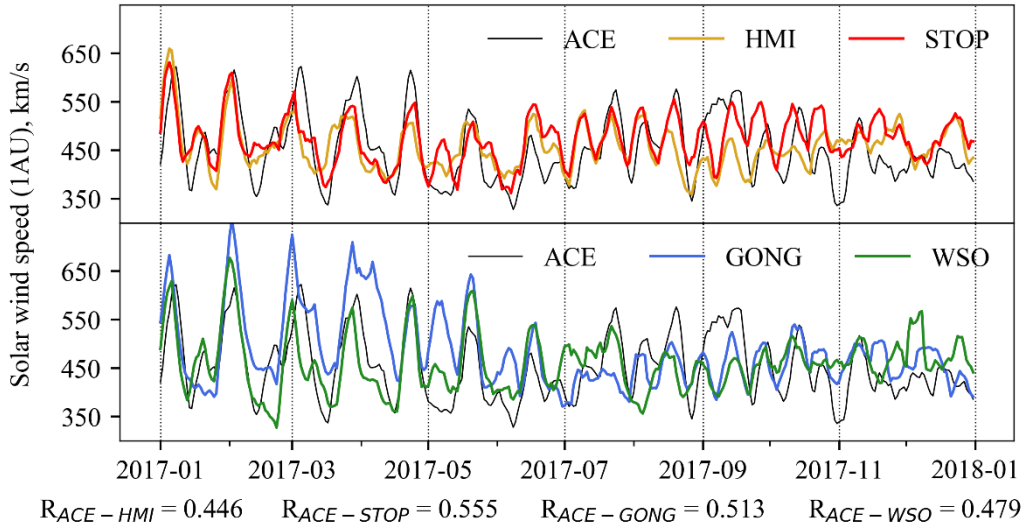


图 4. 2017年太阳风速度的卫星测量值（ACE）及基于不同磁力仪数据的模型计算结果（Berezin、Tlatov，2021年）。

因此，在我国，利用现有观测手段，空间天气预报的这一组成部分已得到原则性解决，但仍需进一步完善。

2.3. 日冕物质抛射的探测、参数确定及到达预报

日冕物质抛射是导致强烈地磁暴的主要因素。日冕物质抛射是从太阳日冕中喷发出的、大规模的磁化等离子体。在地球上，日冕物质抛射是造成强烈地磁扰动和空间天气的主要因素；空间天气会影响地球空间环境，并扰乱航天器所提供的关键服务，

以及电力系统和飞机的运行（Cannon et al., 2013; Hapgood, 2011）。日冕物质抛射在太阳风中传播。了解日冕物质抛射在太阳风中的传播过程，并能够评估其预计抵达地球的时间，是空间天气预报中心面临的关键研究问题和任务。尽管近来取得了进展，但由于日球层观测稀少，且日冕物质抛射结构仍存在未解问题，其在太阳风和日球层中的演化至今仍未得到充分研究（Luhmann et al., 2020）。

要成功预报空间天气，必须定期观测日冕物质抛射。在美国，NOAA/SWPC过去和现在都利用空间日冕仪开展此类观测。其中应用最广泛的仪器之一，是NASA/SOHO任务搭载的宽视场白光光谱日冕仪（LASCO）（Brueckner et al., 1995）。2007年以前，只有在太阳附近（通常在30个太阳半径以内）才能定期观测到日冕物质抛射。自2007年STEREO任务发射以来（Kaiser et al., 2008），人们得以利用Sun-Earth-Connection-Heliospheric-Investigation仪器套件中的白光日冕仪和日球层成像仪（HI），观测日冕物质抛射从太阳日冕穿过内日球层传播至近地轨道的过程（Howard et al., 2008）。

我国不存在空间太阳观测站，显然，建设此类观测站需要很长时间。因此，观测 和探测日冕物质抛射是必须在最短时间内掌握的关键技术。为此，可以使用地基光学望远镜（ Tlatov et al. 2017）和无线电望远镜(Grechnev et. al. 2006)，它们能够记录整个太阳圆面上的过程并以连续模式运行。在本文中，我们将讨论光学望远镜的运行经验。 日冕物质抛射的观测、探测及参数确定可以通过地基巡天望远镜进行。此类望远镜 能够提供 连续的 观测 ，以大约一分钟的周期观测整个太阳圆面上的色球谱线H-α和Ca II K谱线。此类望远镜的原型由主天文台高山天文站建造。自动化望远镜太阳光谱日像仪-SPOT（太阳巡天光学望远镜）在Ca II K谱线上工作，自2012年起安装在主天文台高山天文站并开展定期观测。 (Tlatov et al., 2015b)。2015年，建成了一台自动巡天太阳光谱日像仪，在H-α谱线开展连续观测 （图5）。目前， ГАС已积累了使用太阳光谱日像仪进行长期观测的经验。

在 ГАС 建造的巡天望远镜采用了不同的结构。Ca II K线巡天望远镜采用单体结构。望远镜轴指向天球极轴，观测期间，整台望远镜（包括光谱仪）都会旋转。光谱仪狭缝扫描由磁性移动元件完成。Hα线望远镜采用标准太阳光谱日像仪结构。由耶恩施式恒光镜跟踪太阳。该恒光镜的主镜和转向镜安装在同一移动柱上。这种结构可支持长时间观测，期间两面镜子不会互相遮挡。两面镜子的转速约相差两倍。随后，光束被送入望远镜。望远镜采用折射式结构，物镜直径为10厘米，焦距为150厘米。为沿狭缝扫描太阳，采用配备两面平面镜的移动平台，该平台可沿两个方向移动，用于焦点调节和扫描。为观测太阳Hα线而设计的新型功能元件采用了多项独创的设计方案，并于2013年4月10日获实用新型专利第126854号（图2.5）。

太阳圆面的扫描时间为 50 至 120 秒，具体取决于曝光时间以及将太阳定位到光电导引器所需的时间。太阳穿过光谱狭缝时采集的帧数为 ~2000。

使用位数为 14 bit 的 Prosilica GT 3300 CCD矩阵记录光谱。光谱分辨率为 ≈ 40000，线色散为 ≈ 0.16 Å / 像素，光谱采样间隔为 ≈ 0.03 Å / 像素。每天最多可观测完整太阳圆面 450 次，相当于连续观测 6.5-8 小时。

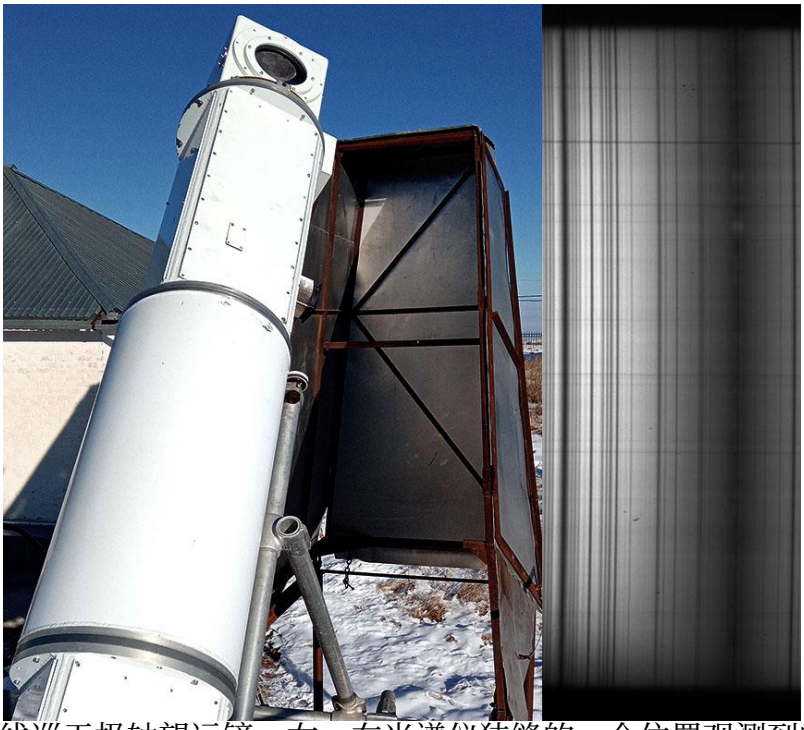


图 5. 左：Ca II K线巡天极轴望远镜；右：在光谱仪狭缝的一个位置观测到的光谱示例。

巡天望远镜观测得到的结果，是一系列太阳光通过光谱仪狭缝时采集的光谱帧。图 6 展示了太阳 Hα线附近的光谱帧示例。Hα线在此处呈现为暗区。光谱的宽度、位置和强度会随着太阳上不同天体而变化。光谱上还可见延伸至连续谱中的暗区，通常是太阳黑子。帧的水平 x 和垂直 y 尺寸为 2000x70 像素。可以看到帧中的谱线存在弯曲。这是因为在高阶光谱工作时，来自狭缝的光束以一定角度射向主平面，从而导致谱线弯曲。谱线的弯曲可通过弯曲入口狭缝（例如 VSM/SOLIS）进行补偿；不过，本例采用了直光谱仪狭缝，并在之后进行曲率数字校正，这是一种更简单、更经济的方案。

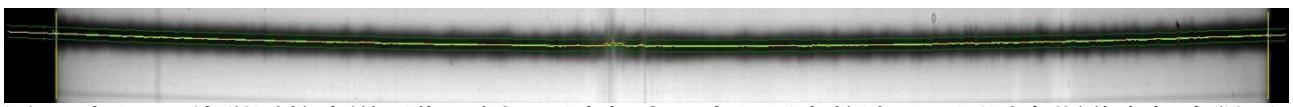


图 6. 太阳Hα线附近的光谱图像示例。图中标出了太阳圆盘的边界、通过高斯分布拟合得到的中心点（绿色点），以及通过二阶多项式拟合高斯中心位置的曲线（红线）。

以巡天望远镜的 Hα 线观测数据为例，介绍光谱数据处理的主要步骤。处理观测数据时，第一步是

确定谱线弯曲。为此，在每个光谱帧中，根据强度梯度确定太阳边界，然后在帧的每一列中，初步将强度最低的点确定为谱线中心。将得到的谱线中心用二次多项式拟合，随后相对于拟合曲线选取固定宽度的 H-α 谱线轮廓。第二步是通过高斯函数拟合谱线轮廓，确定所有选取轮廓的参数（宽度、振幅、中心位置）。最后，将谱线中心位置用二次多项式拟合，并据此计算多普勒位移。

通过处理光谱帧，可获得多种图像，包括谱线中心图像、太阳圆面和色球层上每一点的视向速度及谱线宽度分布（图7）。明亮区域（图7左上面板）对应于与活动区12680（东侧太阳边缘附近）、活动区12678和12677（中央子午线以西）以及活动区12679、12674、12673（西侧太阳边缘附近）相关的色球絮状体。暗区（赤道以南）对应于暗条，这一点与GONG网络的Hα谱线图像（图6右下面板）一致。在谱线宽度分布图中，絮状体也表现为Hα谱线轮廓相对较宽的区域（图7左下面板）。这是由于这些区域的温度较高。在絮状体的外缘，光谱轮廓较窄，对应于较低的温度。

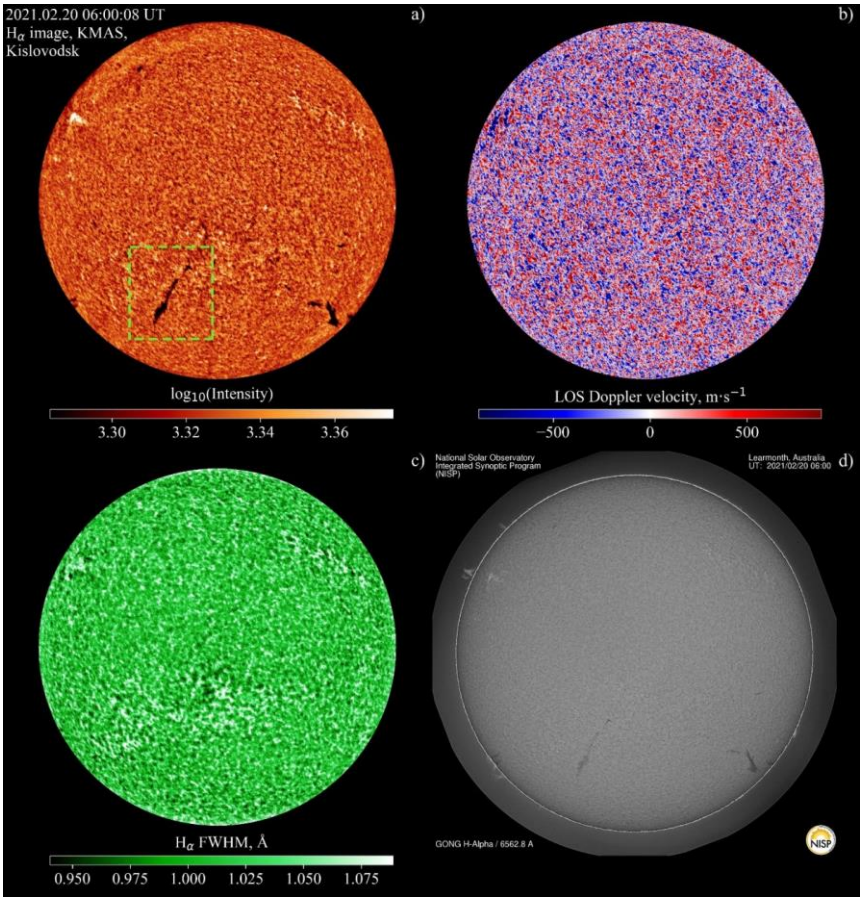


图 7. 根据2021年2月20日06:00协调世界时的观测数据重建的H-α谱线中心强度图（左上）、多普勒速度图（右上）和Hα线宽图（左下）示例。多普勒速度图中的绿色轮廓标出了亮元的边界。右下图为全球振荡网络组（GONG）在06:00协调世界时拍摄的H-α谱线图像。（Berezin等，2023）。

采用能够记录完整谱线轮廓的太阳光谱日像仪方案作为此类望远镜的设计，可显著提高所记录喷发事件的对比度。图8展示了2014年10月2日一次喷发事件期间太阳在Ca II K谱线核部的图像，同时还展示了谱线右翼与左翼的强度差。在该图中，可以看到太阳圆面东北部有两个暗色的爆发喷流，其演化过程得以追踪约40分钟。需要指出的是，通过扣除谱线两翼的强度获得的喷发事件对比度，明显高于通过EUV暗化方法扣除不同时刻图像所获得的对比度。巡天望远镜还能够记录太阳边缘处的喷发事件，并追踪其发展至约1.3—1.4Ro的高度。

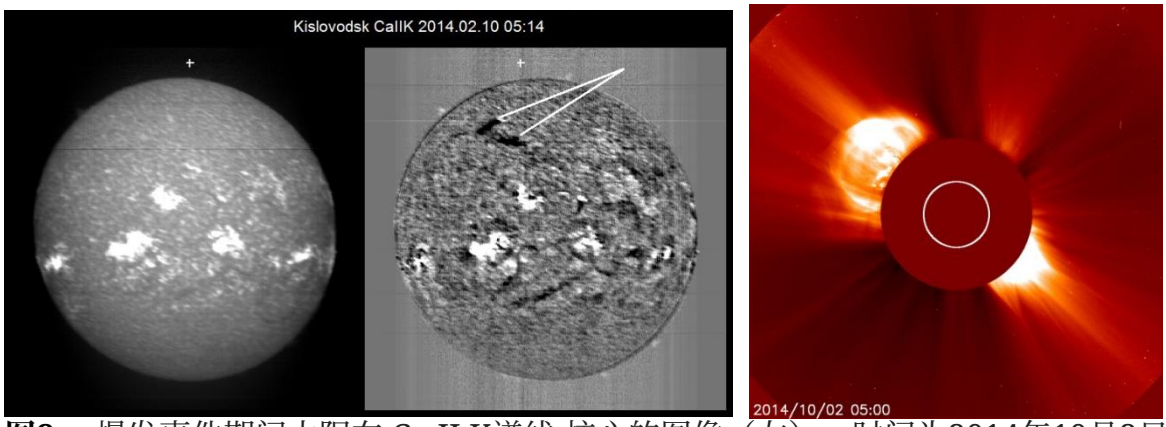


图8。爆发事件期间太阳在 Ca II K谱线 核心的图像（左），时间为2014年10月2日。同时给出了谱线右翼与左翼的强度差（中）。箭头指示出两个爆发喷流。（右）根据 LASO的数据展示日冕物质抛射的发展过程。

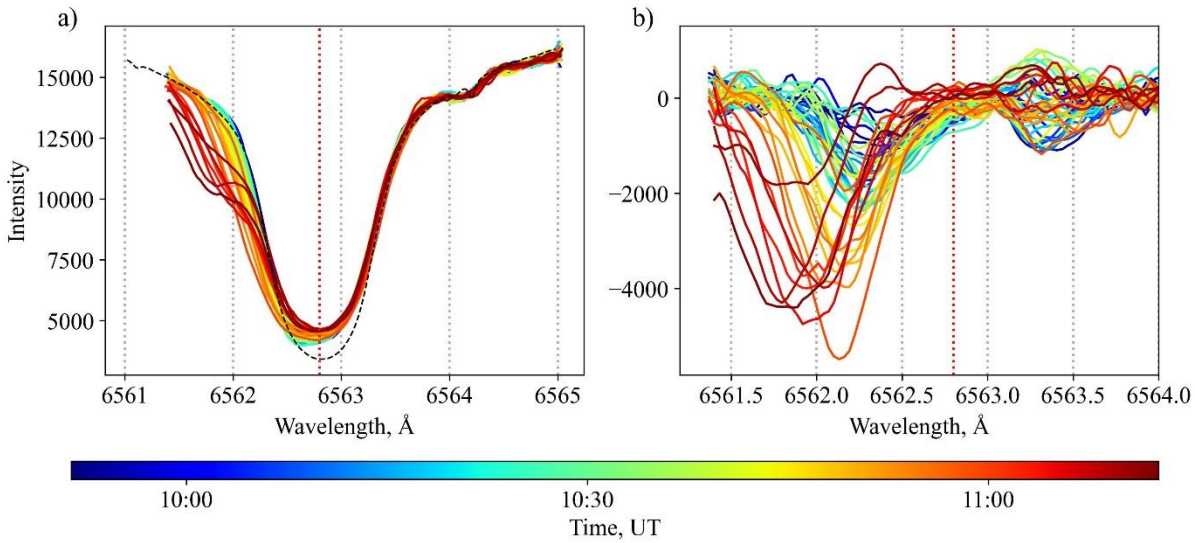


图 9。2021年2月20日爆发过程中，暗条中心点处 H_α 光谱轮廓的演化。面板（a）显示观测到的光谱轮廓，面板（b）显示观测轮廓与宁静色球光谱轮廓之差（Berezin等，2023）。

我们以2021年2月20日的事件为例，考察如何利用ГАС巡天光谱日冕仪记录Hα 谱线中的暗条喷发过程（图7）。2月20日的观测序列于

当天的日冕物质抛射发生前数小时开始。图9a展示了喷发末期暗条中心点观测到的光谱轮廓演化。我们看到Hα蓝翼中的扰动增强，这与暗条中的快速上升流有关。减去宁静色球的典型光谱轮廓后，可以看到多普勒蓝移不断增大，达到1 A，对应速度为 ~46 千米/秒。根据HEK数据库，紫外线（SDO/AIA304）观测显示，喷发始于9:30协调世界时。对所有与暗条相关点的速度进行分析后发现，喷发开始前，平均速度会缓慢上升至数千米/秒（图10d）。随后加速度增大，末期平均速度达到~45 千米/秒。观测过程中，暗条逐渐从Hα 线的核心处消失（图10a），并在蓝移图像中显现得更加明显（图10b）。缓慢上升阶段的速度分布近似对称，上升运动占主导，但也能观测到下降流（图10c，09:10协调世界时、09:40协调世界时）。随后，速度分布变得更加不对称，相对缓慢的流动中速度变化占主导，速度可达~25 千米/秒（图10c，10:10协调世界时）。

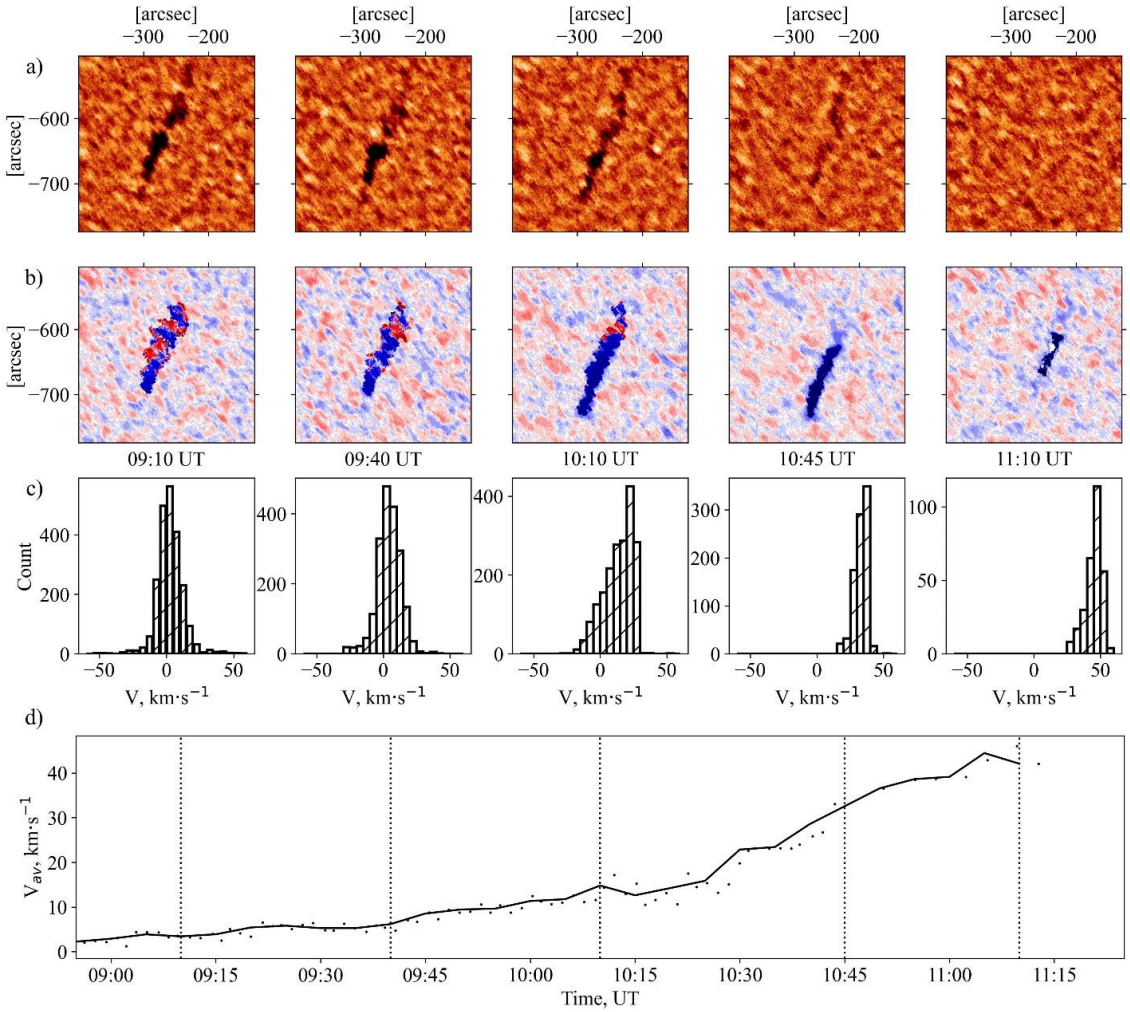


图 10. 2021年2月20日暗条爆发过程的观测。面板(a)：不同时刻Hα 线芯处的图像。面板(b)：暗条中的视线速度(V)和宁静色球层中的视线速度；蓝色和红色分别对应蓝移和红移。面板(c)给出了暗条中速度V的分布直方图；速度的负值和正值分别对应下行流和上行流。面板(d)：沿暗条平均的视线速度Vav（Berezin等，2023）。

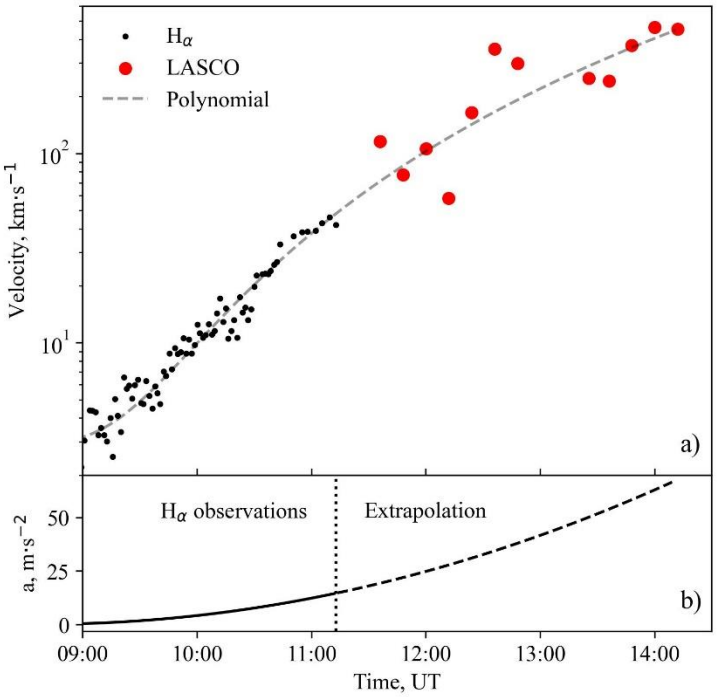


图11. 爆发纤维沿视线方向（LOS）上升运动的平均速度；与2021年2月20日由 LASCO 日冕仪观测到的日冕物质抛射速度进行比较（a）。根据日冕物质抛射初始阶段 H_α 线观测结果估算日冕物质抛射的加速度 a（b）。（Berezin等，2023）。

在爆发的最后阶段，我们只能观测到上升流，其速度分布在相对较窄的范围内（图10c，协调世界时10:45、11:10）。

协调世界时约11:30，SOHO/LASCO日冕仪记录到了日冕物质抛射。我们将对爆发纤维平均初始速度的估算与日冕仪观测结果进行了比较（图11a）。图11a还展示了由 H_α观测得到的速度的三阶多项式拟合。可以清楚地看到，较晚的日冕仪观测结果与这条拟合曲线吻合良好。这使我们得以得出结论：利用太阳光谱日像仪对 H_α 线进行巡天观测，可以估算日冕物质抛射的初始加速度。在观测爆发初期的过程中，日冕物质抛射的加速度增至 ~13 米/秒^2，；进一步外推表明，加速度会增至超过60米/秒^2，，这与日冕仪观测结果相符（图11b）。

暗条的平均速度遵循接近指数规律的变化，尽管我们采用多项式对速度进行近似。对速度的进一步外推总体上与LASCO日冕仪的观测结果一致（图10a）。

日冕物质抛射观测网络的一项重要参数是能否进行连续观测。地基 GONG 网络由 6 个按经度分布的观测点组成，配备 Hα线望远镜，拍摄间隔为 1 分钟，可覆盖每天至少 90% 的时间[Jain et al., 2021]。这与位于地球静止轨道上的 SDO 空间平台相当。我们可以预期，由 6 至 8 台巡天望远镜组成的网络能够提供足够的覆盖范围，以记录大多数日冕物质抛射。因此，我们可以得出结论：利用 H_α 和 Ca II K谱线进行太阳光谱日像仪巡天观测，可用于探测爆发和日冕物质抛射，并估算其初始速度，或许还可估算日冕物质抛射质量。

3. 更新后的太阳服务观测网络结构。
太阳服务国家观测网络可基于地基望远镜建立，用于对太阳活动进行连续的综合观测。为了使空间天气预报服务成功运行，还需要开发基于所获数据分析和预报空间天气（空间天气）状态的方法。该网络可提供以下类型的预报：

-预报太阳风背景参数，预报时段最长为7天，距离太阳最远达1.3天文单位；

-提前2—3天探测并预报日冕物质抛射（日冕物质抛射）到达地球前的地球效应；

-记录太阳耀斑发生的位置、时间和强度；评估高能粒子流。

-评估太阳耀斑期间及平静时段的紫外线辐射水平；

-预报概率 率和相 对振幅 уды 太阳 耀斑的 小时到 2天；
-长期预报 时期 阶段 в высоко和低活动期；
- 太阳爆发和日冕物质抛射预报，提前量可达 10 小时。

地面观测网应当提供：
a) 每日至少一次观测太阳大尺度磁场，以确定太阳风参数以及行星际磁场（ММП）的大尺度扰动。

b) 使用光学太阳光谱仪和（可能还包括）CPPT射电日像仪，记录喷发过程和日冕物质抛射运动初期的情况。

c) 对色球层进行巡测——观测耀斑、暗条，并评估紫外线通量和硬辐射通量。连续观测24小时，观测间隔不超过1至2分钟。
d) 在若干固定波长下，对光学和厘米波段的太阳（及近日冕）进行成像测绘，同时测量亮度和偏振特征、谱线分裂及位移，最终获取有关运动结构、磁场的信息，并评估硬紫外辐射通量。
e) 连续监测射电暴并确定其频谱类型。太阳活动观测服务可由多个组成部分和观测站点构成：

1. 地面观测网可由三个沿经度分布的主要观测站点组成，分别位于乌苏里斯克、伊尔库茨克和基斯洛沃茨克。这些观测站点应配备СТОП磁像仪。

2. 由光学巡天望远镜组成的观测网络，可在Hα和Ca II K谱线中进行观测。这些望远镜用于探测日冕物质抛射，并测定其在初始加速阶段的速度。此外，相关数据还用于记录太阳耀斑并估算紫外线辐射通量。这类自动望远镜可部署在乌苏里斯克、伊尔库茨克、基斯洛沃茨克和克里米亚天体物理天文台。也可考虑在其他观测站点（包括西半球的观测站点）安装自动巡天望远镜。

3.用于连续记录和预报太阳耀斑的10.7厘米和5厘米波长射电望远镜，可自动进行观测。乌苏里斯克、伊尔库茨克、基斯洛沃茨克和克里米亚天体物理天文台均已建有此类望远镜。适宜在西半球的观测点安装射电望远镜。
4.萨彦太阳射电日像仪（CCPT）用于记录喷发事件和太阳耀斑。目前，CCPT仍处于建设阶段，其在空间天气预报方面的效能尚未得到证实。

5. СОЛСИТ磁场全矢量观测望远镜（伊尔库茨克）。该望远镜将用于开展太阳耀斑预报和评估方面的研究

日冕物质抛射中的Bz分量。目前，СОЛСИТ仍处于建设阶段，其用于空间天气预报的有效性尚未得到证实。

5. 俄罗斯境内的辅助观测站点，数量不超过5个，配备Hα线和Ca II K谱线自动太阳光学巡测望远镜。

6. “经典”太阳业务服务的望远镜：光球望远镜（乌苏里斯克、基斯洛沃茨克、克里米亚天体物理天文台）；Hα线滤光望远镜（伊尔库茨克、基斯洛沃茨克、克里米亚天体物理天文台）；采用磁力测量法测量太阳黑子的磁场（克里米亚天体物理天文台）。在5303和6374 Å谱线中观测太阳日冕（基斯洛沃茨克）。用于预报太阳耀斑的RATAN-600射电望远镜。这些望远镜及观测类型旨在延续太阳活动长期序列、绘制太阳活动图、预报极端事件并评估总体状态。

4. 空间天气预报模型与预报中心。

太阳业务服务的观测网络应当成为综合地球物理监测系统（СМГФО）的一部分。为了获取信息，需要组织观测，覆盖极其广泛的电磁辐射和粒子辐射谱——从伽马射线和X射线到无线电波，从太阳宇宙射线（СКЛ）的核成分和电子成分到来自银河系源的高能粒子。显然，有些观测只能借助航天器（КА）完成：这就是СМГФО观测网络的空间段。空间段应当确保直接获取那些会被大气吸收、无法到达地面的太阳辐射类型的信息。

太阳活动监测子系统的地面综合系统，在对灵敏度、空间（角）分辨率和光谱（频率）分辨率提出较高要求时，最适合用于光学和无线电波段观测。太阳活动监测设备应能够按照既定模式获取观测数据，用于评估和预报太阳活动的地球效应后果。其中包括太阳大气不同层次——光球、色球层、日冕，以及作为太阳日冕直接延伸部分的太阳风中的过程信息。基于国家观测设备的空间天气预报参数系统示意图见图12。



图12. 基于地面观测的空间天气预报方案。

要预报空间天气参数，需要建立数据收集中心，开展观测数据分析，进行建模，并向用户和相关组织提供预报结果。空间天气建模中心负责协调先进模型的研发工作，包括：日冕物质抛射在日球层中的传播模型；基于简化或全规模磁流体动力学模型计算太阳风参数和太阳事件地球效应的模型；确定高速太阳风重复流参数的模型；以及根据实时观测数据和其他日球物理和地球物理数据，确定太阳耀斑和日冕物质抛射发生概率的模型等。

第一阶段需要建立磁像仪和巡天望远镜观测数据的分析模型，包括：

1）根据磁力仪的观测数据获取磁场信息。基于光谱偏振测量方法确定磁场强度的方法。磁场同步图编制程序，以及太阳极区磁场强度的校正方法。

2）在势场与非势场近似下重建日冕磁场的模型。

3）利用 WSA 或类似模型评估太阳附近的太阳风速度。
4）太阳风在日球层中的传播模型。
5) 喷发过程和日冕物质抛射的探测模型，以及日冕物质抛射在初始传播阶段的参数确定。

6) 日冕物质抛射在日球层中的传播模型。
7) 评估日冕物质抛射和高速太阳风流到达地球附近时地球效应的模型。

Заме这些模型和方法1—6在不同程度上已在 ГАС ГА 上实现。 O.
数据收集与预报中心应以连续模式运行。太阳风重复流的模拟应根据从磁力仪获取新数据的情况进行，即每天数次。有关日冕物质抛射的记录数据及其在远离太阳初始阶段的特征确定结果，应在获得观测数据后立即录入模型。

5. 项目实施阶段.
为实施该项目，有必要制定一项可分阶段执行的行动计划。第一阶段为期2年，可包括：1. 建立太阳磁场观测网。为此，需要完成乌苏里斯克和伊尔库茨克的STOV磁像仪投入运行。2. 在乌苏里斯克、伊尔库茨克和克里米亚制造并安装自动巡天望远镜-太阳光谱仪。对基斯洛沃茨克的巡天望远镜进行现代化改造。3. 在乌苏里斯克、伊尔库茨克、克里米亚天体物理天文台和基斯洛沃茨克制造并安装厘米波段自动射电望远镜。4. 调试观测网络之间的协同运行。制定空间天气参数的预报方法和模型。第二阶段为期3年，可包括：1. 在俄罗斯境内的辅助观测点制造并安装巡天光学望远镜。2. 为西半球的一处观测点配备巡天光学望远镜和射电望远镜

6. 美国空间天气预报地面观测网。 6.1. 现有和规划中的观测网络.

日面巡天观测可通过标准化望远镜网络进行，这些望远镜的经度位置使其能够实现连续（24小时）观测，占空比达到全天。当前有多个太阳观测网络在运行。太阳光学观测网（SOON）由三个站点组成，分别位于美国（新墨西哥州阿拉莫戈多附近的霍洛曼空军基地）、澳大利亚（西澳大利亚利尔蒙斯的澳大利亚皇家空军基地）和意大利的圣维托-德伊诺尔曼尼空军基地。常规观测包括识别太阳活动区、测量其面积，以及在Hα 谱线中成像。SOON站点的太阳活动区测量历史数据集可在美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心（NCEI）获取，网址为 https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solardataservices.html；Hα 观测数据可通过以下网址访问：https://www.soonar.org。太阳射电通量监测使用太阳射电望远镜网（RSTN）完成，该网络有四台仪器，分别位于美国（马萨诸塞州萨加莫尔山和夏威夷帕莱胡阿）、西澳大利亚（利尔蒙斯）和意大利（圣维托）。有关RSTN的更多信息，包括射频覆盖范围，请参见 https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-1-second/documentation/rstn-seon-usaf_ktegnell_31mar16.pdf。SOON和RSTN设施共同组成太阳电光学网（SEON） [Fitts与Loftin1993]。

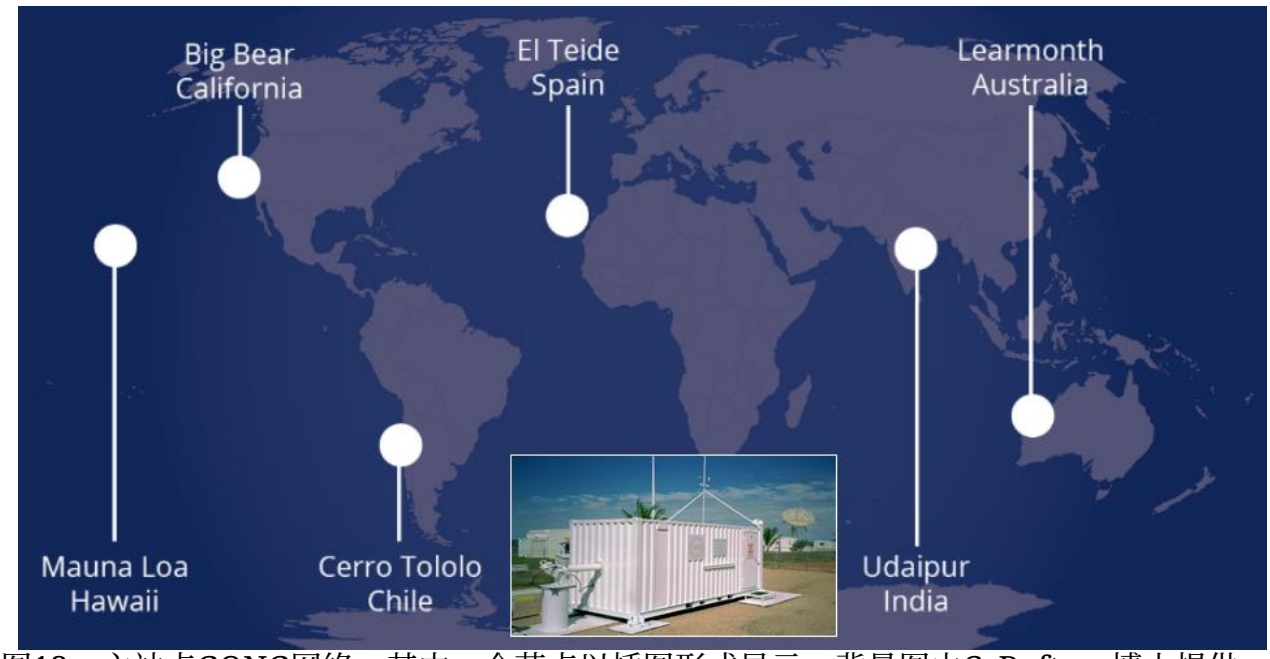


图13。六站点GONG网络，其中一个节点以插图形式显示。背景图由C. Raftery博士提供。

全球振荡网络组（GONG，图13）是一个六站点网络，仪器分别设在美国（加利福尼亚州的大熊太阳天文台和夏威夷的莫纳罗亚天文台）、西澳大利亚（利尔蒙斯）、印度（乌代布尔太阳天文台）、西班牙（加那利群岛的泰德天文台）和智利（托洛洛山美洲际天文台）。每个GONG站点均以标准集装箱为基础建造，所有仪器都安装在GONG机箱内的光学平台上。外部光线输入装置由两面平面镜组成，可沿仰角和交叉仰角轴跟踪太阳，并将光线水平送入集装箱。光线输入装置的光学系统由滤光窗密封，有效孔径为2.8~厘米。GONG观测用于采用日震学方法研究太阳内部、太阳光球层磁场的演化以及太阳爆发事件。此外，GONG磁图和Hα图像也用于业务空间天气预报，服务机构包括美国国家海洋和大气管理局空间天气预报中心（SWPC）、美国空军557th 气象联队、英国气象局，以及由日本国立信息通信技术研究所（NICT）运营的日本空间天气中心。图14展示了GONG观测实例及其在SWPC业务空间天气预报中的应用。多普勒速度和纵向磁图是在Ni I 676.8 nm谱线中以60秒的观测节奏获取的。此外，每隔60秒便在Hα的线心处获取太阳色球全日面图像。相邻站点的观测时间相差20秒，因此，网络获取Hα 图像的观测节奏为20秒。每个节点在日出后不久自动开机，找到并锁定太阳圆面，进行一整天的观测，并在日落时关机。每个节点都配备气象站和太阳辐照度监测仪；必要时，在当地支持人员协助下，这些设备会用于决策树，以决定每日观测的开始和结束时间。每个站点都配备GPS设备，可提供高精度时间，这对于解读日震网络观测至关重要。GONG网络由美国国家太阳天文台综合太阳观测计划（NISP）运营。根据18年的观测数据，六站点GONG网络的平均占空比达到88.3%，中位数为92.0%。此外，数据表明占空比没有长期变化，这意味着GONG网络各站点的气候似乎没有显著变化（Jain等，2021）。有关GONG的更多信息，请参见[Pevtsov，2016；Hill2018]。

全球高分辨率 H-alpha 网络（Steinegger 等，2000）是由不同天文台运行的 Hα 仪器组成的临时网络。望远镜的参数可能各不相同（例如，

孔径、滤光带通、观测节奏、数据处理等），并进行独立观测。处理后的图像会发送到一个共用数据库。

多个网络正处于不同的发展阶段，包括太阳活动监测网络（Erdelyi.etal2022）、连续Hα成像网络 [Ueno.etal2010], 太阳物理研究综合网络组 [Gosain.etal2018], 以及下一代GONG（ngGONG）。SamNet 是一个由配备磁光滤光器（MOF）的小口径望远镜组成的全球网络。SamNet 的重点是根据纵向磁场光球磁图所推导的参数进行耀斑预测。CHAIN 专注于太阳色球 Hα 全日面观测，重点关注太阳爆发事件（耀斑、爆发暗条和与耀斑相关的莫尔顿波）。作为网络建设的一部分，耀斑监测望远镜（FMT）自 1992 年起在日本飞驒天文台运行，并于 2010 年迁至秘鲁伊卡大学。FMT 是一组安装在同一望远镜架台上的相同折射望远镜，组成一套``“阵列”。每台望远镜的有效孔径为 64 毫米。观测节奏为 30 秒，使用调谐至红连续谱、Hα 线心 656.3 纳米和 Hα 线翼（±0.08 纳米）的法布里-珀罗标准具。2017 年，第二台 FMT 仪器安装于沙特阿拉伯的沙特国王大学。

再加上位于日本飞驒天文台的太阳磁活动研究望远镜（SMART），这三台仪器构成了目前的CHAIN观测网。计划在阿尔及利亚安装第三台FMT仪器。

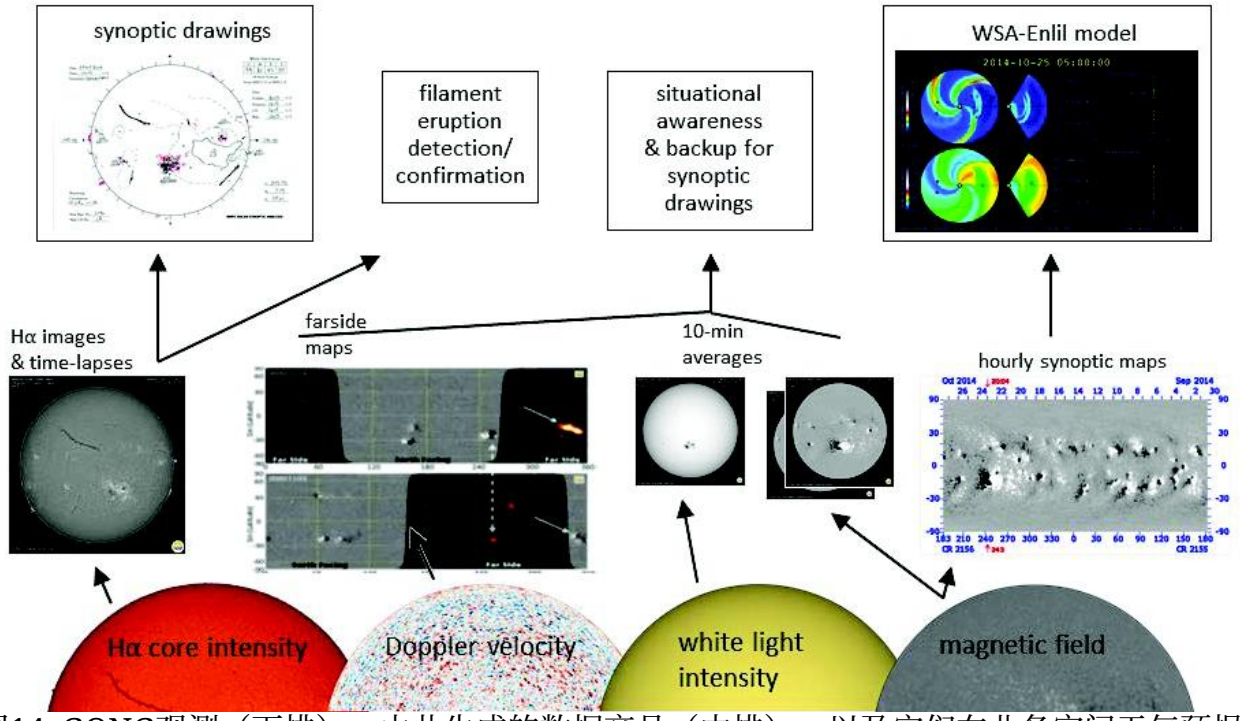


图14. GONG观测（下排）、由此生成的数据产品（中排），以及它们在业务空间天气预报和建模中的应用（上排）示例。GONG进行全日面观测，但此处仅展示了全日面图像的一半。图片由A. Marble博士提供

本节汇总的地基网络并不全面。例如，其中未包括伯明翰太阳振荡网络 [Hale.et al. 2016], 及其未来发展 [Hale.et al. 2020]。国际太阳射电频谱仪网络的名称为低频低成本光谱与运输式天文观测复合仪器 [Benzet al. 2009]。关于专用于空间天气的射电波段设施的近期综述，请参阅 [Carley et al. 2020]。目前运行的所有太阳综合观测设施的地理位置可见 https://goo.gl/LRVhVk。

6.2. 下一代 GONG

6.2.1. 建立下一代 GONG 网络的必要性

GONG日渐老化，已运行26+ 年。GONG翻新将延长其使用寿命5至7年，包括更换相机、改进偏振调制器、数据中心升级、更换工作站、观测站冷却系统升级等。新的科学研究与模型需求：光球层和色球层的矢量磁场；用于日震学的多普勒速度（更高分辨率、多高度）；日冕偏振测量；太阳作为恒星观测+太阳盘面分辨光谱（相同谱线）；全日面观测（高占空比）及长时间观测（1至2个完整磁活动周期）。

7. 讨论。

本文提出了在我国组织空间天气预报工作的一套方案及一系列保障措施。在现阶段，以按经度分布的观测点网络为基础开展地基观测，可以发挥主要作用。需要开展两种主要类型的观测：大尺度磁场观测，以及日冕物质抛射和太阳耀斑的记录。

大尺度磁场磁像仪已在乌苏里斯克、伊尔库茨克和基斯洛沃茨克建成并投入使用。日冕物质抛射可通过巡天光谱日像仪进行记录。这类望远镜的原型已在基斯洛沃茨克的主天文台高山天文站建成并投入运行。

需要指出的是，所提出的空间天气预报服务所需的观测数据构成，接近美国SWPC/NOAA 采用的方案以及美国计划开展的观测项目类型。主要区别在于日冕物质抛射的探测方法：SWPC 使用轨道日冕仪，而我们的方案采用地基光谱日像仪。

除这些观测类型外，还可以 并且应当开展其他类型的观测。首先，这些观测类型将延续太阳业务服务的“经典”序列，包括 光球观测以及太阳黑子特征（太阳黑子指数和面积）的统计、太阳日冕观测、太阳黑子磁场观测，以及太阳暗条、日珥和 Ca II K谱线谱斑特征序列的延续。这些光学观测类型应当标准化，这对于长期保存并稳定太阳活动长期序列十分重要。在苏联太阳业务服务时期，各天文台的数据相互补充，并出版了统一的《太阳数据》公报。在当前条件下，可以建立一个通用的互联网网站。基于 ГАС 每日观测数据构建的此类网站原型已建成（https://observethesun.com/）。网站数据还应补充其他太阳天文台的观测数据处理结果。

有几种前景广阔的观测方式，可以显著拓展并改进用于空间天气预报的太阳活动预报。这些方式包括：具有高空间分辨率的 СОЛСИТ/ИСЗФ 全矢量磁场磁像仪望远镜、СРТ/ИСЗФ射电日像仪以及 РАТАН-600/САО。借助这些观测方式，将能够开展观测并预报太阳耀斑。一种重要的观测方式是利用小型射电望远镜在厘米波段进行观测。射电望远镜网络即使在天气条件恶劣时，也能记录太阳耀斑。

若建立用于空间天气预报的观测网络，将积累大量数据并提供给研究人员进行分析。目前，ГАС 已积累的数据量已超过 400 TB。由于该网络将持续运行，因此能够跟踪并分析大多数快速演变的高能事件，例如物质喷发

、耀斑前现象，研究活动区的发展及其他过程。此外，巡天观测还可用于分析局部全球振荡，从而开展天体物理学基础问题的研究。目前，以 1–2 分钟为典型采集时间，对整个太阳圆面的速度场进行观测，仍属独特。由此，新的观测网络所获取的观测数据可大幅扩充全球太阳活动观测数据资源。

新的观测类型需要开发新的软件，用于数据处理、实时建模和预报，并建立互联网资源，以展示太阳活动和空间天气数据。这将促进我国太阳物理学和天体物理学的整体发展。

文献

Pesherov V.S., Grigor'ev V.M., Svidskiy P.M., Bevzov A.N. 等，《新一代太阳快速预报望远镜》。2013年，《自动测量学》，第49卷，第6期，第62-69页。

Tlatov A. G., Pashchenko M. P., Ponyavin D. I., Svidskii P. M., Peshcherov V. S. 和 Demidov M. L. 基于STOP磁像仪观测的太阳风参数预报，Ge&Ae，2016年，第56卷，第8期。10.1134/S0016793216080223

Arge C.N., Luhmann J.G., Odstrˇcil D., Schrijver C.J., Li Y. 1997年5月12日日冕物质抛射期间太阳风的流结构和日冕源。《大气、太阳与地球物理学杂志》第66卷，第15–16期，第1295–1309页，2004年。DOI：10.1016/j.jastp.2004.03.018

Berezin, I. A.；Tlatov, A. G. 光球磁场地面与卫星观测的比较分析：作为日冕洞和太阳风参数模拟的附录。《地磁学与航空学》第60卷，第872–875页，2020年，10.1134/S0016793220070051

Berezin, I. A.；Tlatov, A. G.；Skorbezh, N. N. 太阳宁静区与活动区色球谱线轮廓的恢复。《地磁学与航空学》第61卷，第7期，第1075–1082页，2021年，10.1134/S0016793221070033

Berezin, Ivan；Tlatov, Andrey，《日冕场几何与太阳风速度》，Universe，第 8 卷，第 12 期，第 646 页，2022 年，10.3390/universe8120646

Berezin, I. A.；Tlatov, A. G.；Pevtsov A.A.，《Hα 多普勒速度中的太阳暗条爆发》，已投稿至《天体物理学杂志》。2023 年。

Tlatov, A.G.；多尔米东托夫, D.V.；基尔皮切夫, R.V.；帕先科, M.P.；什拉姆科, A.D.；佩谢罗夫, V.S.；格里戈里耶夫, V.M.；杰米多夫, M.L.；斯维茨基, P.M. 根据基斯洛沃茨克天文台望远镜磁像仪的观测，研究全球磁场极性反转期间大尺度太阳磁场的若干特征。《地磁学与航空学》2015a，55 卷，969–975 页，doi:10.1134/S0016793215070257。

Tlatov, A. G., 多尔米东托夫, D. V., 基尔皮切夫, R. V., 帕先科, M. P., Shramko, A. D. 根据基斯洛沃茨克山地站巡天望远镜在 Ca II K线线心及翼部的观测，研究太阳上的同步事件和快速事件。2015b，Ge&Ae，V.55，961。doi: 10.1134/S0016793215070257

Tlatov, A. G.; Berezin, I. A.; Strelkov, M. A. 基于地基巡天观测数据模拟日冕物质抛射传播。《地磁学与航空学》，第59卷，第7期，第843–845页，2020年，10.1134/S0016793219070247

Tlatov, A. G.；Illarionov, E. A.；Berezin, I. A.；什拉姆科, A. D. 利用机器学习模型，根据地基综合观测预测太阳耀斑和X射线辐射背景通量。《宇宙研究》，第58卷，第444–449页，2020年，10.1134/S0010952520060106

Tlatov, 安德烈 G.; Berezin, 伊万：径向膨胀太阳风中的内日冕磁场建模，《物理学》，第 5 卷，第 161–167 页，2023，10.3390/physics5010012

Harvey, J.; Worden, J. 综合图的新类型与用途。《综合太阳物理学》——第 18 届 NSO/Sacramento Peak 夏季研讨会，1997 年 9 月 8—12 日于 Sunspot；新墨西哥州举行。ASP 会议系列；第 140 卷；1998；编者：K. S. Balasubramaniam、Jack Harvey 和 D. Rabin，第 155 页，1998。

Wang, Y. -M.; Sheeley, N. R., Jr. 关于太阳日冕的势场模型。《天体物理学杂志》，第 392 卷，第 310 页，1992，doi: 10.1086/171430

Schatten, Kenneth H.; Wilcox, John M.; Ness, Norman F. 行星际和日冕磁场模型。《太阳物理学》，第6卷，第3期，第442–455页，1969年，doi: 10.1007/BF00146478

Parker, E. N. 大型太阳耀斑后日冕的突然膨胀及其伴随的磁场和宇宙射线效应。《天体物理学杂志》，第133卷，第1014页，1961年，doi: 10.1086/147105

Arge, C. N.; Pizzo, V. J. 利用近实时太阳磁场更新改进太阳风状况预测。《地球物理研究杂志》，第105卷，第A5期，第10465–10480页，2000年，10.1029/1999JA000262

Jian L.K, Russell C.T, Luhmann J.G. (2011年) 将第23/24太阳活动周极小期与1天文单位处的历史太阳风记录进行比较。《太阳物理学》> 第274卷(1–2)，第321–344页。https://doi.org/10.1007/s11207-011- 9737-2

Luhmann JG, Gopalswamy N, Jian LK, Lugaz N（2020年）《内日球层中的行星际日冕物质抛射演化》。《太阳物理学》，第295卷第4期，第61页。https://doi.org/10.1007/s11207-020-01624-0

Cannon, P., Angling, M., Barclay, L., Curry, C., Dyer, C., Edwards, R., Greene, G., Hapgood, M. A., Jackson, D., Horne, R., Mitchell, C., Owen, J., Richards, A., Rogers, C., Ryden, K., Saunders, S., Sweeting, M., Tanner, R., Thomson, A. W. P., & Underwood, C.（2013年）。《极端空间天气：对工程系统和基础设施的影响》：英国皇家工程院。Hapgood, M. A.（2011年）。《探索对极端空间天气风险的科学认识》。《空间研究进展》，47(12)，2059–2072。https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.02.007
Brueckner, G. E., Howard, R. A., Koomen, M. J., Korendyke, C. M., Michels, D. J., Moses, J. D., Socker, D. G., Dere, K. P., Lamy, P. L., Llebaria, A., Bout, M. V., Schwenn, R., Simnett, G. M., Bedford, D. K., & Eyles, C. J.（1995年）。《大视场光谱日冕仪（LASCO）》。《太阳物理学》，第162卷第1–2期，第357–402页。https://doi.org/10.1007/BF00733434

Kaiser, M. L., Kucera, T. A., Davila, J. M., St. Cyr, O. C., Guhathakurta, M., & Christian, E.(2008年). STEREO任务：简介。《空间科学评论》，第136卷（1–4期），第5–16页。https://doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0

Grechnev, Victor V.；Uralov, Arkadiy M. 按 ORCID 搜索；Zandanov, Vasily G.；Baranov, Nikolai Y.；Shibasaki, Kiyoto 使用两台射电日像仪观测日珥爆发，SSRT,

和 NoRH，《日本天文学会刊物》，第58卷，第1期，第69-84页，2006年，10.1093/pasj/58.1.69

Jain, K.，Tripathy, S. C.，Hill, F. Pevtsov, A. A.《地面连续太阳观测——基于GONG观测评估占空比》。太平洋天文学会刊物，第133卷，第1028期，文章编号105001，共16页，2021年，10.1088/1538-3873/ac24d5。

Benz.et al2009，Benz，A. O.，Monstein，C.，Meyer，H.，Manoharan，P. K.，Ramesh，R.，Altyntsev，A. Lara，A.，Paez，J.，Cho，K. -S.《全球太阳射电频谱仪网络：e-CALLISTO》，《地球、月球与行星》，2009年，第104卷，第1–4期，第277–285页，doi：10.1007/s11038-008-9267-6,

Carley, E.P., Baldovin, C., Benthem, P., Bisi, M.M., Fallows, R.A., Gallagher, P.T., Olberg, M., Rothkaehl, H., Vermeulen, R., Vilmer, N., Barnes, D.：2020年，《空间天气科学与业务中使用的射电天文台和仪器设备》。《空间天气与空间气候》，第10卷，7。doi：10.1051/swsc/2020007。

Erd elyi, R., Kors os, M.B., Huang, ., Yang, Y., Pizzey, D., Wrathmall, S.A., Hughes, I.G., Dyer, M.J., Dhillon, V.S., Belucz, B., Braj˘sa, R., Chatterjee, P., Cheng, ., Deng, Y., Dom nguez, S.V., Joya, R., G om ory, P., Gyenge, N.G., Hanslmeier, A., Kucera, A., Kuridze, D., Li, ., Liu, ., u, L., Mathioudakis, M., Matthews, S., McAteer, J.R.T., Pevtsov, A.A., P otzi, W., Romano, P., Shen, J., Temesv ary, J., Tlatov, A.G., Triana, C., Utz, D., Veronig, A.M., Wang, Y., Yan, Y., Zaqarashvili, T., Zuccarello, F：2022年，《太阳活动监测网络——SAMNet》。《空间天气与空间气候》，第12卷，2。doi：10.1051/swsc/2021025

Fitts, S.D., Loftin, H.E.：1993年，《太阳能光电网络（SEON）升级/替换计划》。第一阶段：鉴定运行测试与评估计划，测试报告，空军运行测试与评估中心，斯科特空军基地，伊利诺伊州。第1分遣队。

Gosain, S., Roth, M., Hill, F., Pevtsov, A., Martinez Pillet, V., Thompson, M.J.：2018年，下一代太阳同步观测网络的设计：太阳物理研究综合网络组（SPRING）。载于：Evans, C.J., Simard, L., Takami, H.（编）：第七届地基与机载天文仪器会议，国际光学工程学会（SPIE）会议系列，第10702卷，107024H。doi：10.1117/12.2306555。

Hale, S.J., Howe, R., Chaplin, W.J., Davies, G.R., Elsworth, Y.P.：2016年，伯明翰太阳振荡网络（BiSON）的性能。《太阳物理学》第291卷，第1期。doi：10.1007/s11207-015- 0810-0。

Hale, S.J., Chaplin, W.J., Davies, G.R., Elsworth, Y.P.：2020年，自动化伯明翰太阳振荡网络（BiSON）的下一代升级观测平台。载于：《国际光学工程学会》（SPIE）会议系列，《国际光学工程学会》（SPIE）会议系列，第11452卷，1145222。doi：10.1117/12.2561282。

Hill, F.：2018年，全球振荡网络组设施——空间天气领域研究成果业务化的一个实例。《空间天气》，第16卷，1488。doi：10.1029/2018SW002001。

Jain, K., Tripathy, S.C., Hill, F., Pevtsov, A.A.：2021年，地面连续太阳观测——基于GONG观测评估占空比。《太平洋天文学会刊》133，105001。doi：10.1088/1538-3873/ac24d5。

Pevtsov ，A.A.：2016年，《地面太阳同步观测的必要性》。载于：Do ro-

tovic, I., Fischer, C.E., Temmer, M.（编）：《科英布拉太阳物理学会议：空间仪器时代的地基太阳观测》，太平洋天文学会会议系列，第504卷，第71页。

Steinegger, M., Denker, C., Goode, P.R., Marquette, W.H., Varsik, J., Wang, H., Otruba, W., Freislich, H., Hanslmeier, A., Luo, G., Chen, D., Zhang, Q.: 2000，《全球新型高分辨率Hα 网络：首次观测与首次结果》。载于：Wilson, A.（编）《太阳活动周期与地球气候》，《太阳与空间天气》，欧空局特别出版物，第463卷，第617页。

Ueno, S., Shibata, K., Ichimoto, K., Kitai, R., Nagata, S., Kimura, G., Nakatani, Y.: 2010，连续Hα成像网络项目（CHAIN）：利用地基太阳望远镜开展空间天气研究。《非洲天空》，第14卷，第17页。

附录。1

观测站点的位置、设备配置以及观测计划见表1。

表 1. “太阳业务服务”可能的观测站点，注明其状态（主要站点和其他站点）、经度、所需望远镜清单及其他观测设备清单*

编号/类型 名称/经度		太阳业务服务配备情况/当前观测	现有望远镜
1 主站	乌苏里 天体物理 远东分院观测站 俄罗斯科学院（L =132^{o}）	1）磁像仪（旧式） 2）自动巡天望远镜 3）自动射电望远镜 观测： 太阳黑子 1954-2020年 RT-2射电望远镜 1990年-0.6.2022 太阳黑子的磁场 1966年-1989 自2022年7月起的观测 нет. .	大日冕（БСВТ） 水平的 太阳望远镜 RT-2射电望远镜 RT-8射电望远镜 色球— 光球望远镜
2 主要观测站，伊尔库茨克，太阳—地球物理研究所，	（利斯特维扬卡，L=104.8^{o}）	1）磁像仪（旧） 2）自动巡天望远镜 3) 自动射电望远镜 Ca II K谱线观测。 2006年，2009—2021年 1997年、1999年—磁图 2013 CPPT射电观测截至目前 время.	БСВТ Hα 滤光望远镜 KCaII滤光望远镜 СОЛСИТ矢量磁场 地平式太阳望远镜 СТОП-1 大型日冕仪 射电望远镜（CCPT）
3 台主望远镜，基斯洛沃茨克，ГАС	(L=42.3^{o})	1) 磁像仪（已废弃） 2) 自动巡天望远镜（已废弃） 3) 自动射电望远镜 所有类型的观测	1 太阳照相仪 2.日冕仪。 3. “Opton”电话：α 4.塔式光谱日像仪K钙II 5.全盘望远镜(СПОТ)K钙II。

		持续至当前 时间。	7.射电望远镜，4.9 和 2.9 厘米。 8.磁力仪 9.大型日冕宽视场望远镜 10.全盘望远镜 Hα。
4	克里米亚天体物理天 文台 (L=34^{o})	1) 自动巡天望远镜 2) 自动射电望远镜 谱线观测 氦10830 1999年至今 太阳黑子的磁场 1957年至今 н.в. 日冕仪-1（КГ-1） Hα 1999—2018年 日冕仪-2（КГ-2）	БСТ-1；磁场光谱仪。 БСТ-2；10830；磁场 пят。 КГ-1望远镜 Hα БСВТ 10.7厘米射电望远镜
5	ИЗМИРАН (L=37.3^{o})		1.辐射计，频率为 (169、204和3000 MHz) 2. 光谱仪（25-270 MHz)。
5	科罗夫天文台的 乌拉尔联邦大学科乌罗夫天文台 (L=59.5^{o})	1) 自动巡天望远镜 2) 自动射电望远镜	太阳望远镜 АЦУ-5
6	埃利斯塔 卡尔梅克国立大学 (L=44.2^{o})	1）自动巡天望远镜（过时用语）	自动巡天望远镜
7	加里宁格勒, ИЗМИРАН (L=20.4^{o})	1) 自动射电望远镜	
8	古巴，哈瓦那 (L=-82.5^{o})	1) 自动巡天望远镜 2) 自动射电望远镜	RT-3天线 RT-2；规划中
9	特内里费岛，莫斯科国立大学天文台 (L=-16.3^{o})	1) 自动光电望远镜 2) 自动射电望远镜	具有前景的

*准确观测点的数量及其位置可能会有所变化 .