

УДК 523.98

Солнечный магнитограф для прогнозирования космической погоды

А.Г. Тлатов^{1,2}, И.А. Березин^{1,2}, А.Д. Шрамко^{1,2}, Д.В. Дормидонтов¹

¹ Горная астрономическая станция ГАО РАН, ул. Гагарина, 100, Кисловодск, 357700, Россия
tlatov@mail.ru

² КалмГУ, ул. Пушкина, 11, Элиста, 358000, Россия

Поступила в редакцию 14 октября 2023 г.

Аннотация. Прогнозирование космической погоды (КП) является необходимым элементом системы обеспечения технологической безопасности для наземных и космических объектов. Наиболее перспективным на данном этапе является создание наземной наблюдательной сети. В составе такой сети должны быть солнечные магнитографы, обеспечивающие наблюдение крупномасштабных магнитных полей Солнца. Данные магнитографических наблюдений позволяют получить оценку параметров рекуррентных потоков солнечного ветра (СВ). В работе представлен проект солнечного магнитографа для обеспечения прогнозирования КП.

Ключевые слова: Солнце, наблюдения Солнца, магнитное поле, солнечные телескопы

1 Введение

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач в исследовании Солнца и солнечно-земных связей является изучение и прогноз космической погоды (КП), состояние которой определяется солнечной активностью. Различные проявления космической погоды могут влиять на многие технологические системы на Земле, в воздушном пространстве и космосе. Солнечные вспышки могут производить мощное рентгеновское излучение, которое возмущает ионосферу. Высокоэнергичные солнечные частицы (энергетические протоны) могут проникать в бортовую электронику спутников и приводить к сбоям космических аппаратов. Геомагнитные бури могут изменять сигнал радионавигационных систем (ГЛОНАСС, GPS, GNSS), понижая точность геопозиционирования. Геомагнитные бури также вызывают полярное сияние.

Стратегическим видом наблюдений, занимающим центральное место в составлении оперативных прогнозов КП и прогнозировании солнечных эффектов, являются наблюдения солнечных магнитных полей. На основе этих данных происходит моделирование структуры короны, которая зависит от этих полей, и связанного с ними электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн от радиодиапазона до рентгеновских лучей. В США основным источником данных магнитных полей для прогнозирования КП является наблюдательная сеть Global Oscillations Network Group (GONG). Сеть GONG состоит из шести идентичных наблюдательных станций, распределенных по всему земному шару. Эти станции обеспечивают почти непрерывные наблюдения Солнца, включая магнитограммы видимого диска Солнца и изображения хромосферы в линии $H\alpha$ во время прохождения Солнца над каждой станцией. Таким образом, глобальное распределение обсерваторий GONG обеспечивает практически непрерывный 24-часовой обзор состояния магнитного поля полного диска Солнца с характерным временем измерений 60 секунд. За 18 лет наблюдений сеть GONG, состоящая из шести наблюдательных пунктов, достигает временного покрытия среднего рабочего цикла в 88.3%, при этом медианное значение составляет 92.0%.

Тем не менее для прогнозирования невзрывных явлений необязательно проводить наблюдения так часто. Корональные дыры вблизи центрального меридиана могут создавать высокоскоростные потоки и области сжатия солнечного ветра (СВ), которые регулярно модулируют геомагнитную активность. Характерное время жизни источников возмущений составляет ~ 27 дней или один оборот

Солнца. В отличие от вспышек и корональных выбросов (КВМ), вызванных быстро развивающимися активными областями, рекуррентные потоки связаны с относительно устойчивыми корональными структурами, время жизни которых может составлять несколько месяцев. Это позволяет использовать солнечные наблюдения далеко к востоку от центрального меридиана для прогнозирования солнечного ветра на орбите Земли дни или недели спустя. Поэтому для прогнозирования рекуррентных потоков СВ достаточно получать несколько магнитограмм в течение суток. Этого можно достичь путем установки трех наблюдательных станций, разнесенных по долготе на территории страны.

Таким образом, для прогнозирования КП необходимы регулярные наблюдения магнитного поля на всем диске Солнца. В настоящее время только две страны, США и Россия, обладают магнитографами, позволяющими проводить такие измерения. Регулярные наблюдения крупномасштабных магнитных полей на Кисловодской Горной астрономической станции проводятся с 2014 г. на телескопе-магнитографе СТОП (Пещеров и др., 2013; Tlatov et al., 2016), разработанном в ИСЗФ СО РАН по заказу Росгидромета в рамках ФЦП “Геофизика” на основе глубокой модернизации работающего в Саянской солнечной обсерватории прежнего варианта СТОП.

Результаты наблюдений магнитографа используются для прогнозирования параметров СВ (Tlatov, Berezin, 2023). По ряду параметров моделирование по данным СТОП дает лучшие совпадения прогноза скорости СВ с наблюдениями, по сравнению с магнитографами GONG и SDO/HMI (Berezin, Tlatov, 2020). Телескоп имеет пространственное разрешение 33×6 угловых секунд и чувствительность ~ 0.3 Гс, что достаточно для успешного прогнозирования параметров КП. В то же время ресурс телескопа ограничен. Прилагаются значительные усилия для продолжения непрерывных наблюдений. В настоящее время требуется модернизация телескопа СТОП и создание нового магнитографа.

2 Проект нового магнитографа полного диска Солнца

На основе опыта эксплуатации магнитографа СТОП мы предлагаем проект нового магнитографа. Условное название нового телескопа – Солнечный магнитограф прогнозирования космической погоды (СолМагПро). Несмотря на наилучшие в своем классе параметры, магнитограф СТОП обладает рядом недостатков. К ним можно отнести недостаточное пространственное разрешение, существенные артефакты в регистрируемом спектре, длительное время сканирования и др. В телескопе используется основной объектив небольшой апертуры 5 см и фокусом 0.5 м. Как следствие, количество шагов по щели спектрографа при сканировании полного диска Солнца ограничено (~ 60). Время восстановления магнитного поля по данным одного скана солнечного диска составляет ~ 20 минут. Эти параметры ограничивают использование телескопа, например, при анализе активных областей и прогнозировании солнечных вспышек.

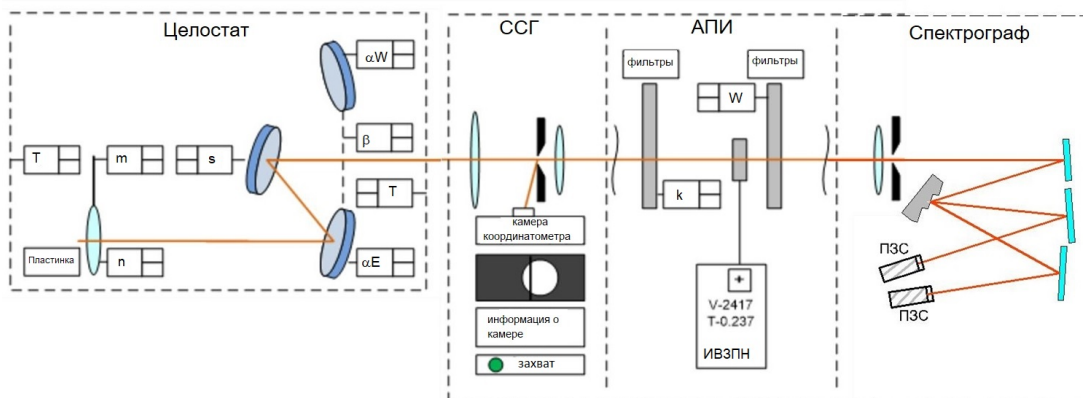


Рис. 1. Схема солнечного магнитографа СолМагПро

В новом магнитографе мы планируем увеличить пространственное разрешение до 2–3 угловых секунд, при сохранении чувствительности ~ 0.1 Гс. Структура и состав телескопа выбраны исходя

из назначения, природы измеряемых сигналов, физических свойств крупномасштабного магнитного поля (КМП), поля лучевых скоростей, рационального времени наблюдений, обеспечения современного уровня автоматизации измерений. В основе измерений – теоретические модели образования линий поглощения в атмосфере Солнца и физические эффекты Зеемана и Доплера, а также следующие способы измерений: фотоэлектрический, дифференциальный, поляризационный, в видимом диапазоне длин волн.

СолМагПро состоит из телескопа горизонтального типа – рефрактора, оснащенного оптически совмещенным с ним высокодисперсионным спектрографом с отражательной дифракционной решеткой. Телескоп выполнен как стоксметр, который позволяет регистрировать распределение параметров Стокса в выбранных спектральных линиях. Блок-схема телескопа СолМагПро показана на рис. 1. Питание телескопа солнечным светом осуществляется с помощью целостатной установки. Зеркала целостата оснащены приводами, обеспечивающими построение (совместно с объективом телескопа) неподвижного и невращающегося изображения Солнца на входном окне регистратора с заданными гелиографическими координатами в инструментальной системе отсчета координат. Объектив строит изображение Солнца в плоскости входной щели спектрографа.

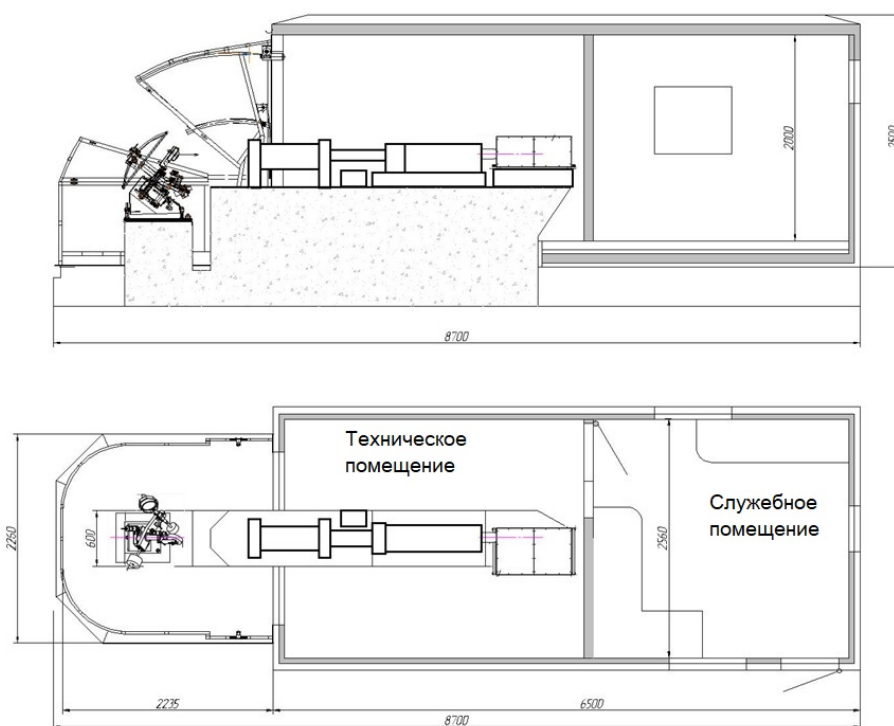


Рис. 2. Габаритная схема телескопа

За щелью, между двумя перестраивающими объективами, установлены элементы электрооптического анализатора (ЭА) и отсекающие поляризационные фильтры. Расходящиеся за щелью пучки света преобразуются в параллельные для обеспечения нормальной работы ЭА. Свет, отраженный от зеркальных щеточек щели спектрографа под углом $\sim 15^\circ$ к оптической оси, используется для построения изображения Солнца на ПЗС-матрице координатомера. Для обеспечения поляризационных измерений инструмент оснащен различной поляризационной техникой и перестраивающей оптикой. Электрооптический анализатор является анализатором круговой поляризации (V-параметр Стокса), который позволяет поочередно гасить разные компоненты поляризованного по кругу света и состоит из электрооптического кристалла (ЭК) и расположенной за ним призмы Глана (ПГ). Управление кристаллом осуществляется высоковольтным знакопеременным источником питания (U). С помощью механического модулятора, установленного перед зеркалами целостата, знак V-параметра

Стокса поочередно меняется на противоположный. При этом инструментальные искажения остаются неизменными, обеспечивая возможность учета инструментальных ошибок измерений.

Все оптико-механические узлы телескопов, требующие перемещения во время наблюдений, калибровки или тонкой юстировки, снабжены электромеханическими приводами на базе шаговых двигателей с согласованными редукторами. Телескоп смонтирован на едином фундаменте (~ 4.5 м длиной) и снабжен павильоном с ветрозащитным куполом (рис. 2). Павильон разделен на две части: отапливаемую (операторскую) и неотапливаемую (телескоп).

Основными отличиями нового магнитографа СолМагПро от магнитографа СТОП являются измененная схема спектрографа, увеличенная апертура и фокусное расстояние основного объектива. Увеличение пространственного разрешения приведет к существенному увеличению объема получаемой информации, более чем на порядок по сравнению с магнитографом СТОП. Стандартная процедура восстановления магнитных полей на телескопе СТОП длится около 20 минут. При увеличении объема получаемых данных время обработки стандартной процедурой становится неприемлемо долгим. Для решения этой проблемы мы планируем использовать разработанные нами быстрые алгоритмы обработки спектров магниточувствительных спектральных линий (Tlatov, Berezin, 2023). Чтобы существенно ускорить процедуру обработки, можно применить быстрые приближенные методы Guo (2011) и FAS (Al-Nahhal et al., 2019), которые позволяют аппроксимировать данные функцией Гаусса всего за одну итерацию. Использование аппроксимаций заметно снижает уровень шума и позволяет определять в измеренных спектрах положение центра магниточувствительной линии как центр аппроксимирующей гауссианы. Восстановление интенсивности происходит при измерении напрямую расстояния между центрами гауссиан левой и правой круговой поляризации. Определив эти расстояния, мы можем восстанавливать карты продольной компоненты крупномасштабного фотосферного магнитного поля.

3 Выводы

Для прогнозирования КП необходимы систематические наблюдения магнитных полей полного диска Солнца с высокой чувствительностью. В настоящее время в нашей стране существует только один магнитограф, проводящий регулярные наблюдения. Магнитограф СТОП установлен на Кисловодской Горной астрономической станции ГАО РАН. На основе опыта эксплуатации телескопа СТОП в данной работе предложен проект нового магнитографа, предназначенного для прогнозирования КП. Его важной особенностью является наличие полуволновой фазовой пластинки, установленной перед целостатной установкой и предназначенной для устранения эффекта инструментальной поляризации. Измерения проводятся в двух режимах без пластинки и с введенной пластинкой. Это позволяет вычислить и исключить инструментальную поляризацию и добиться высокой точности измерений (~ 0.1 Гаусс), что необходимо при наблюдении слабых крупномасштабных полей.

Для измерения магнитных полей по данным спектральных наблюдений предлагается использовать новые методы восстановления полного профиля спектральных линий. Такие методы позволяют снизить инструментальные шумы и существенно сократить время обработки.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ № 075-03-2023-121/3.

Литература

- Пещеров В.С., Григорьев В.М., Свидский П.М. и др., 2013. *Автометрия*. Т. 49. № 6. С. 62. [Peshcherov V.S., Grigor'ev V.M., Svidskii P.M., et al., 2013. *Avtometriya*, vol. 49, no. 6, pp. 62–69. (In Russ.)]
- Al-Nahhal I., Dobre O.A., Basar E., Moloney C., Ikki S., 2019. *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, no. 6, pp. 157–163.
- Berezin I.A., Tlatov A.G., 2020. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 60, no. 7, pp. 872–875.
- Guo H., 2011. *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 134–137.
- Tlatov A.G., Pashchenko M.P., Ponyavin D.I., et al., 2016. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 56, no. 8, pp. 1095–1103.
- Tlatov A.G., Berezin I.A., 2023. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 63, no. 8, pp. 70–74.

Solar magnetograph for space weather forecasting

A.G. Tlatov^{1,2}, I.A. Berezin^{1,2}, A.D. Shramko^{1,2}, D.V. Dormidontov¹

¹ Mountain Astronomical Station, Central Astronomical Observatory RAS, ul. Gagarina 100, Kislovodsk 357700, Russia

tlatov@mail.ru

² Kalmyk State University, ul. Pushkina 11, Elista 358000, Russia

Abstract. Space weather (SW) forecasting is a necessary element of the technological safety system for ground and space objects. The most promising at this stage is the creation of a ground-based observation network. Such a network should include solar magnetographs that provide observation of large-scale magnetic fields of the Sun. The data of magnetographic observations allow us to estimate parameters of recurrent solar wind flows. The paper presents a project of a solar magnetograph to ensure SW forecasting.

Key words: Sun, magnetic field, solar telescope