

СЛУЖБА ГЕОЭФФЕКТИВНОСТИ СОБЫТИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Сапралиев М.Е., Михалыев О.Н., Михалыев Б.Б.

Калмыцкий государственный университет, Элиста, Россия

SOLAR ACTIVE EVENT GEOEFFECTIVENESS SERVICE

Sapraliev M.E., Mikhalyaev O.N., Mikhalyaev B.B.

Kalmyk State University, Elista, Russia

This work attempts to develop an online service for specialists and amateurs interested in the problem of space weather forecasting. At the first stage, we consider one of the geoeffective factors - solar wind, for the calculation of which there are generally accepted models. The initial data are observations of the photospheric magnetic field, regularly carried out at the Kislovodsk astronomical station. The coronal field to the source surface is calculated in potential approximation using the PFSS procedure. The velocity field of the solar wind at the source surface is derived by WSA models. At the next stage, we plan to simulate the solar wind flow at a distance of up to 1 AU and evaluate its geoeffectiveness

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-261-264>

Введение

Перспективным направлением развития службы солнечной и космической погоды является создание различных онлайн-ресурсов, предназначенных для демонстрации активных солнечных явлений в режиме реального времени. Примером такого отечественного ресурса является интерактивная трехмерная синоптическая карта «Observe the Sun»¹ созданная на основе данных наблюдений Кисловодской горной астрономической станции Главной астрономической обсерватории (ГАС ГАО) РАН. На этой странице вы найдете, в частности, информацию о пятнах, флоккулах и протуберанцах. Применительно к проблеме прогноза космической погоды естественно создать аналогичную карту, содержащую информацию о геоэффективных явлениях. Это непростая задача, поскольку уверенное предсказание таких активных явлений, как вспышки и выбросы корональной массы, до сих пор остается трудноразрешимой проблемой. Однако некоторые результаты здесь возможны, например, предсказание высокоскоростных потоков плазмы. Существует разработанный метод расчета поля скоростей солнечного ветра Wang-Sheeley-Argе (WSA), основанный на построении коронального магнитного поля. Нами предпринята попытка построения интерактивной карты² наблюдений фотосферного магнитного поля по данным ГАС ГАО. Они позволяют систематически оценивать геоэффективность высокоскоростных потоков солнечной плазмы в рамках существующих моделей. ГАС ГАО проводит исследования по регистрации

¹ <https://observethesun.ru/>

² <https://sw.kalmsu.ru/Sun-Gazers/>

выбросов корональной массы с помощью патрульного солнечного телескопа (СТОП). Эти наблюдения служат основой для расширения возможностей интерактивной карты.

Магнитное поле

Основными исходными данными являются распределения радиальной компоненты магнитной индукции (B_r) на фотосфере Солнца, представленные в виде FITS-файлов. Эти магнитограммы мы получаем с сайта³ ГАС ГАО. Кроме того, на сервер загружаются магнитограммы с обсерваторий группы Global Oscillation Network Group (GONG). Пример изображений, полученных из этих FITS-файлов, показан на рис. 1 и 2.

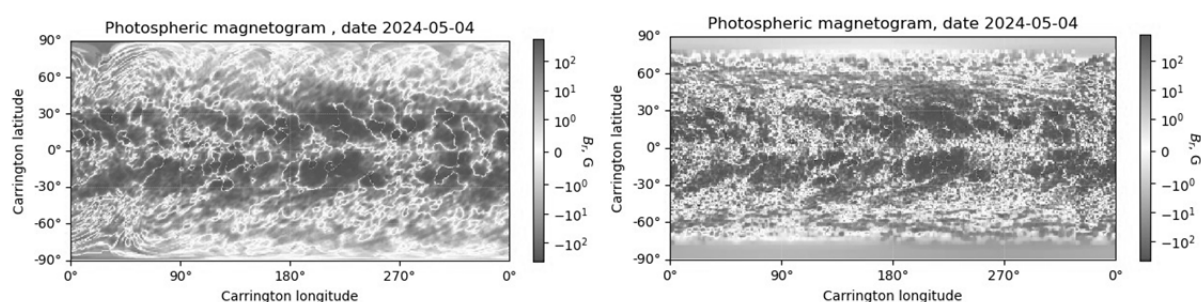


Рис. 1-2. Распределение B_r на фотосфере на 04.05.2024, СТОП (слева) и GONG (справа).

Общепринятым методом моделирования магнитных полей в солнечной и звездной атмосферах является модель потенциальной поверхности источника поля (PFSS) [1, 6]. Уравнения PFSS предполагают, что в интересующей нас области существует нулевой электрический ток, что приводит к уравнениям:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{B} = 0. \quad (1)$$

Система уравнений (1) решается в сферической оболочке между поверхностью звезды и настраиваемым внешним радиусом, называемым «поверхностью источника». Граничные условия B_r задаются пользователем на внутренней границе и накладываются чисто радиальные условия поля на поверхности источника, что имитирует эффект убегающего звездного ветра. Pfsspy⁴ – это хорошо документированная библиотека с проверенной функциональностью для выполнения экстраполяции PFSS. Мы вычисляем модель PFSS и получаем поверхностный слой источника. Пример полученного изображения показан на рис. 3 и 4.

В работе [7] был введен параметр f_s , характеризующий расходимость силовых линий. При расчете этого параметра используются магнитные поля на поверхности источника B_s и на фотосферной поверхности B_r . В работе [3] был получен коэффициент корреляции 0.39 между скоростью вет-

³ <https://solarstation.ru>

⁴ <https://github.com/dstansby/pfsspy/tree/main>

ра и параметром расходимости f_s . Эти расчеты легли в основу широко используемого и цитируемого метода WSA [3, 2].

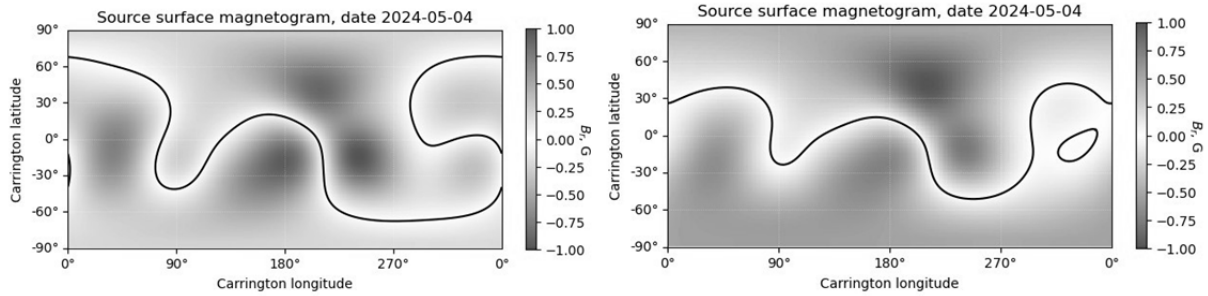


Рис. 3-4. Распределение B_r на поверхности источника на 04.05.2024, СТОП (слева) и GONG (справа).

В статье [4] использовалась следующая модель скорости:

$$V_{SW}(t) = (393.2 \pm 7.6) + (192.9 \pm 40.0)W_S + (3.94 \pm 0.35)|B_S| - (0.019 \pm 0.004)|B_P|, \quad (2)$$

$$W_S = 6.25(B_S/B_P)^2. \quad (3)$$

Используя эту модель, мы получаем изображения распределения скорости солнечного ветра на поверхности источника. Пример построенного изображения 5 и рис. 6.

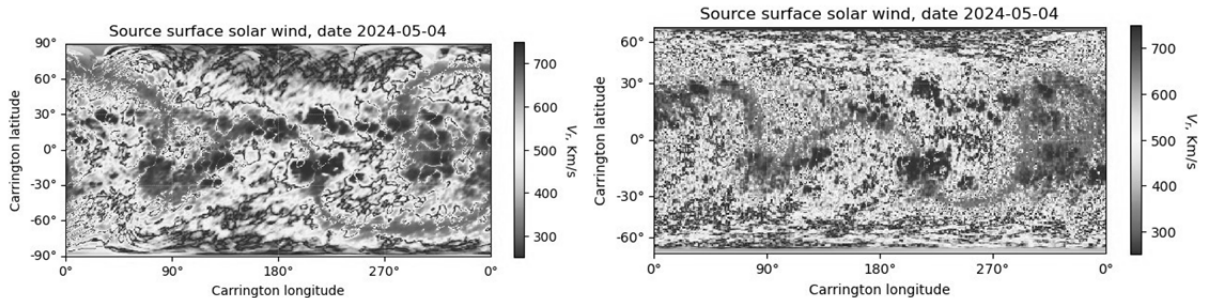


Рис. 5-6. Распределение V_r на поверхности источника на 04.05.2024, СТОП (слева) и GONG (справа).

Интерактивная трехмерная карта

На лабораторном сайте реализована трехмерная модель коронального магнитного поля. С помощью модуля pfsspy строятся линии магнитного поля. Сиды для трассировки линий формируются с достаточно малым шагом. На концах открытых магнитных линий, лежащих на фотосфере, мы формируем набор точек. Это множество с помощью алгоритма Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN⁵) разбивается на отдельные кластеры, которые соответствуют корональным дырам. Мы находим такие параметры корональных дыр, как площадь, магнитный по-

⁵ <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.DBSCAN.html>

ток, среднее значение и максимальную магнитную индукцию. Кроме того, из множества точек кластера выбирается медиана для определения центра корональной дыры. Ее координата вместе с датой образует уникальный идентификатор – Solar Object Locator (SOL). Рисунок, демонстрирующий полученную корональную дыру, приведен на рис. 7. Аналогичную визуализацию можно увидеть в статье [5]. Интерактивность модели заключается в возможности изменять угол обзора путем перетаскивания зажатой мышью, размер изображения – прокруткой колеса мыши. Сверху реализован календарь, в котором можно выбрать нужную дату. Кнопка «скрыть детали» убирает легенду для коронального отверстия, оставляя только уникальный идентификатор.

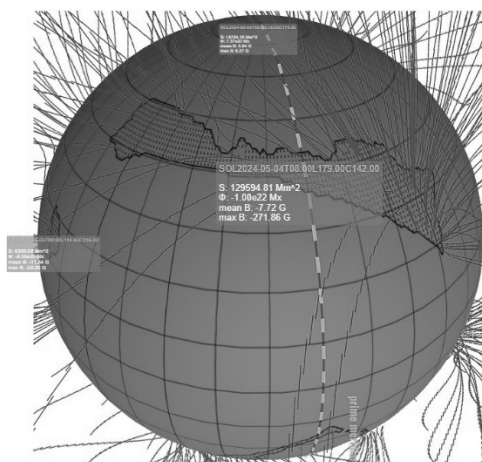


Рис. 7. Изображение корональной дыры с сайта SunGazers на 04.05.2024.

Исследование выполнено по госзаданию Минобрнауки РФ (№ 075-03-2024-113).

Литература

1. Altschuler M.D., Newkirk G. // Sol. Phys. 1969. V. 9(1). pp.131–149.
2. Arge C.N., Luhmann J.G., Odstrcil D., et al. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2004. V. 66. pp. 1295–1309.
3. Arge, C.N., and Pizzo, V.J. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. pp. 10465–10479
4. Belov A.V., Obridko V.N., Shelting B.D. // Geomagn. Aeron. 2006. V. 46(4). P. 456
5. Berezin I., Tlatov A. // Universe. 2022. V. 8(12). a. 646.
6. Mackay D.H., and Yeates A.R. // Sol. Phys. 1999. V. 9. pp. 1–50.
7. Wang Y.M., Sheeley N.R., Jr. // ApJ. 1990. V. 355. pp. 726-732.