Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 74–76.

УДК 523.985-125
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-74

О ВЛИЯНИИ ПОЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ИСТОЧНИКА НА ТОЧНОСТЬ ПРОГНОЗА СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

М.Л. Демидов[1], П.Н. Киричков[1]

[1]Институт солнечно земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
kpn@iszf.irk.ru, demid@iszf.irk.ru

IMPACT OF SOURCE SURFACE LOCATION ON SOLAR WIND SPEED PREDICTION ACCURACY

M.L. Demidov[1], P.N. Kirichkov[1]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Исследуется влияние граничных условий модели потенциального поля (potential field source surface, PFSS) на точность прогноза скорости солнечного ветра. Проведены расчеты скорости солнечного ветра с использованием эмпирической модели Wang-Sheeley-Arge (WSA) на основе магнитных наблюдений Global Oscillations Network Group (GONG) для 2290 кэррингтоновского оборота. Экстраполяция скорости ветра до точки Лагранжа L1 выполнена с помощью модели Helospheric Upwind eXtrapolation (HUX). Была изучена чувствительность результатов моделирования к выбору радиуса поверхности источника в модели PFSS. Проведено сравнение результатов прогноза с данными космического аппарата Advance Composition Explorer (ACE).

Ключевые слова: Космическая погода, солнечный ветер, солнечная активность.

Abstract. This paper examines the influence of boundary conditions of the potential field source surface (PFSS) model on the accuracy of solar wind velocity forecasts. Solar wind velocity calculations were performed using the empirical Wang-Sheeley-Arge (WSA) model based on magnetic observations from the Global Oscillations Network Group (GONG) for Carrington rotation 2290. Wind velocity was extrapolated to the L1 Lagrange point by using the Helospheric Upwind eXtrapolation (HUX) model. The sensitivity of modeling results to the choice of the source surface radius in the PFSS model was studied. The forecast results were compared with data from the Advance Composition Explorer (ACE) spacecraft.

Keywords: space weather, solar wind, solar activity.

ВВЕДЕНИЕ

Точность предсказания параметров солнечного ветра является одним из ключевых факторов успешного прогнозирования космической погоды. Эмпирическая модель Wang-Sheeley-Arge (WSA) [Arge et al., 2003], показывающая связь между скоростью солнечного ветра, топологией крупномасштабных корональных магнитных полей и расположением корональных дыр, широко применяется службами оперативного прогнозирования, например Space Weather Prediction Center (SWPC) [https://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlilsolar-wind-prediction].

Однако существуют факторы, оказывающие влияние на точность прогнозирования, такие как качество исходных данных (в данном случае подразумевается использование синоптических карт магнитного поля фотосферы) [Demidov et al., 2022; Majumdar et al., 2025], граничные условия модели PFSS [Schatten, 1971; Nikolic, 2017], необходимой для расчета коронального поля, а также различия в модельных подходах к экстраполяции скорости солнечного ветра в гелиосфере [Riley, 2011].

Ключевым граничным условием PFSS является радиус поверхности источника R_{ss} — сферическая поверхность, по достижении которой магнитное поле полагается радиальным. Радиус поверхности является настраиваемым параметром, оптимальным значением считается $R_{ss} = 2.5R_{\odot}$ — в этом случае наблюдается наилучшее совпадение результатов моделирования структуры магнитного поля с данными корональных наблюдений [Altschuler, 1969].

Целью данной работы является количественная оценка чувствительности прогноза скорости солнечного ветра к выбору радиуса поверхности источника в модели потенциального поля PFSS путем проведения расчетов с использованием модельного комплекса PFSS-WSA-HUX и последующего сравнения с данными измерений аппарата ACE за период высокой солнечной активности 2024 года.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Расчет выполнялся в три последовательных этапа.

1. Построение коронального магнитного поля с использованием модели PFSS с различными граничными условиями, расчеты проведены для пяти значений R_{ss} = $1.5R_{\odot}$; $1.7R_{\odot}$; $2.5R_{\odot}$; $2.7R_{\odot}$; $3.0R_{\odot}$.

2. Расчет скорости солнечного ветра по модели WSA, выраженной в виде $v_{wsa}(f,d) = 285 + \frac{(685-285)}{(1+f_p)^{2/9}} * \left(1 - 0.8e^{\left(\left(\frac{-d}{\omega}\right)^3\right)}\right)^3$, где f_p — фактор расширения магнитных трубок, d показывает угловое расстояние между основанием магнитной силовой трубки до границы корональной дыры в угловой мере.

3. Экстраполирование полученных значений скорости солнечного ветра на гелиосферу с помощью модели HUX.

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Используются данные наблюдений обсерватории GONG, полученные для 2290 кэррингтоновского оборота (16 октября – 13 ноября 2024 г.) в условиях высокой солнечной активности. Значения магнитного поля

измеряются в гауссах и задаются функцией координат (θ, φ), где θ∈[0, π] и φ∈[0, 2π] — широта и долгота соответственно, размеры координатной сетки составляют 180×360 пкс. На рис. 1 показана синоптическая карта в масштабах слабых магнитных полей (±15 Гс) и структуры корональных дыр, полученные для двух значений R_{ss}, при этом видно, что увеличение последнего приводит к сглаживанию мелкомасштабной структуры открытого магнитного поля и смещению границ корональных дыр.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Точность прогноза оценивалась по коэффициенту корреляции Пирсона *r* и среднеквадратической ошибке *RMSE*. Как следует из рис. 2, модель HUX демонстрирует визуальное согласие с данными ACE в диапазоне долгот 200°–250°. Статистический анализ (см. таблицу) показывает, что все рассмотренные конфигурации модели обеспечивают высокое качество прогноза; оптимальные значения метрик достигаются при $R_{ss} = 2.5R_{\odot}$: $r = 0.73$; $RMSE = 59.04$ км/с.

Точность модельных прогнозов скорости солнечного ветра для 2290 оборота Кэррингтона в величинах коэффициента корреляции и среднеквадратической ошибки.

R_{ss}	*r*	*RMSE*, км/с
1.5	0.57	100.48
1.7	0.59	98.30
2.5	0.73	59.04
2.7	0.70	62.32
3.0	0.60	71.43

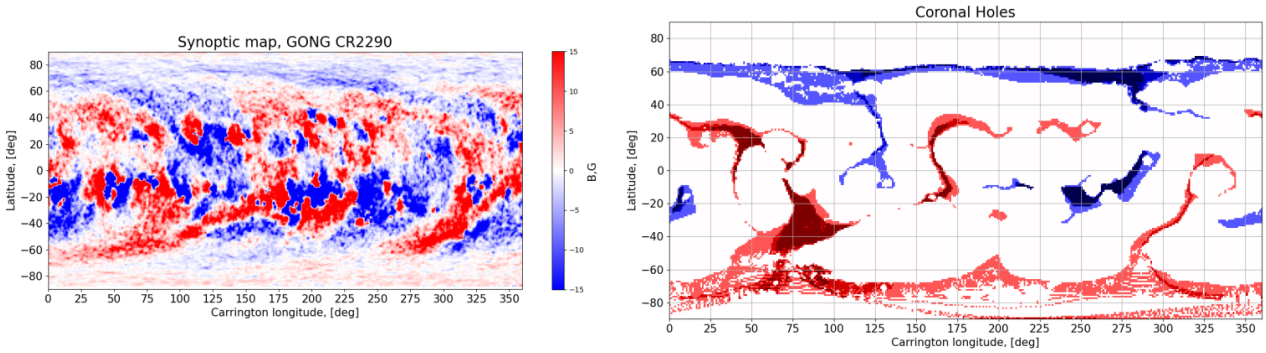

Рис. 1. Карта радиальной компоненты магнитного поля Солнца на фотосфере по данным GONG (слева); границы корональных дыр (справа), рассчитанные по модели PFSS для $R_{ss} = 1.5R_{\odot}$ (светлые области) и $R_{ss} = 2.5R_{\odot}$ (темные области). Отрицательная и положительная полярности показаны синим и красным цветом соответственно. Различие в конфигурации границ отражает зависимость топологии открытого магнитного поля от выбора R_{ss} в модели PFSS

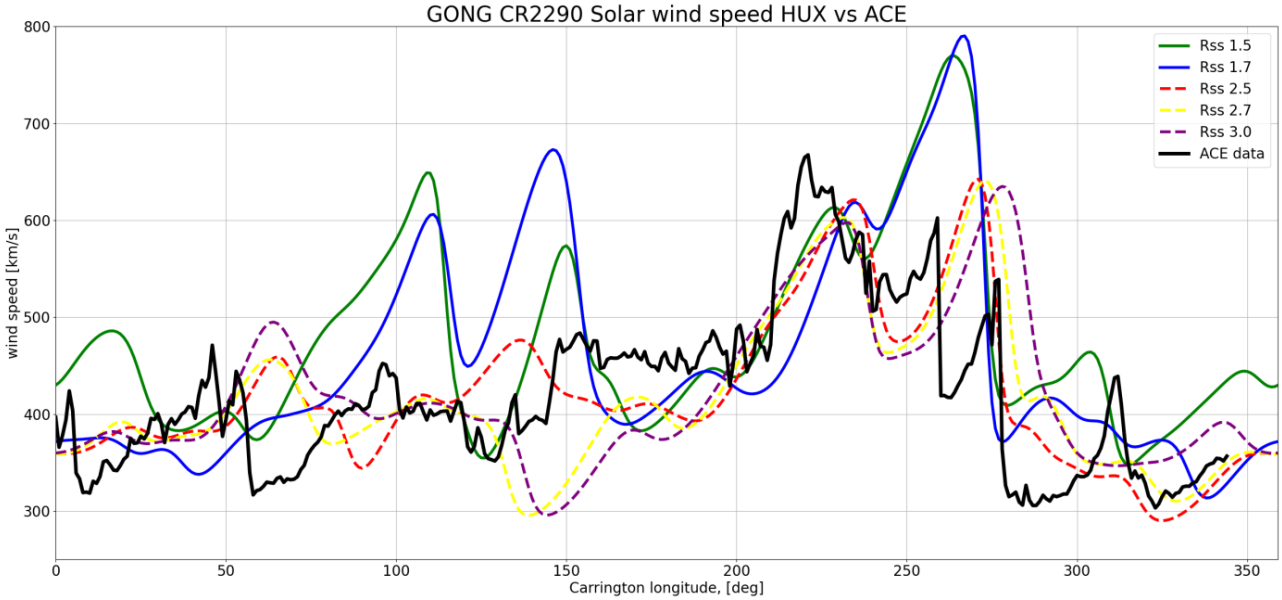

Рис. 2. Сравнение скорости солнечного ветра, полученной по модели HUX на расстоянии 1 а.е. с данными ACE, цветом показаны результаты для разных граничных условий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена комплексная оценка чувствительности прогноза скорости солнечного ветра к выбору граничных условий в модели потенциального поля PFSS на основе применения модельной цепочки PFSS-WSA-HUX. Сравнение расчетов с данными космического аппарата ACE, полученными в максимуме солнечной активности 2024 г., показало высокую степень согласования модельных предсказаний с прямыми измерениями. Установлено, что оптимальное значение радиуса поверхности источника соответствует канонической величине $R_{ss} = 2.5R_{\odot}$, однако во всем исследованном диапазоне вариаций параметра R_{ss} сохраняются стабильно высокие линейная корреляция и низкая среднеквадратичная ошибка, что свидетельствует об устойчивости модельного подхода и его высокой эффективности для воспроизведения динамики солнечного ветра в условиях максимума солнечной активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Altschuler M., Newkirk G. Magnetic fields and the structure of the solar corona // Solar Phys. 1969. V. 9. P. 131─149. https://doi.org/10.1007/BF00145734.

Arge C.N., Odstrcil D., Pizzo V.J., Mayer L.R. Improved method for specifying solar wind speed near the Sun // Proc. AIP Conf. 2 September 2003. V. 679, N 1. P. 190–193. https://doi.org/10.1063/1.1618574.

Demidov M.L., Hanaoka Y., Wang X., Kirichkov P. On the differences in the ambient solar wind speed forecasting caused by using synoptic maps from different observatories // Solar Phys. 2019. V. 240. N 2. DOI: 10.3847/1538-4365/aaf8b3.

Majumdar S., Reiss M., Muglach K., Arge C.N. What causes errors in Wang──Sheeley──Arge solar wind modeling at L1? // Astrophys. J. 2025. 988:239 https://doi.org/10.3847/1538-4357/ade3d5.

Nikolic L. Modelling the magnetic field of the solar corona with potential-field source-surface and Schatten current sheet models // Geological Survey of Canada. 2017. P. 69. https://doi.org/10.4095/300826.

Riley P., Lionello R. Mapping solar wind streams from the Sun to 1 AU: A comparison of techniques// Solar Phys. 2011. V. 270, P. 575–592. https://doi.org/10.1007/s11207-011-9766-x.

Schatten K.H. Current sheet magnetic model for the solar corona // Cosmic Electrodynamics. 1971.