Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 142–145.

УДК 520.6.05, 520.248, 520.2.03, 523.9-355, 523.982
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-142
ORCID Автора: 0009-0000-7535-2076

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ДОППЛЕРОВСКИХ СКОРОСТЕЙ SDO/HMI В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

А.М. Садыков[1, 2]

[1] Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, sadykov.am19@physics.msu.ru
[2] Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

DAILY VARIATIONS OF OBSERVED SDO/HMI DOPPLER VELOCITIES IN STRONG MAGNETIC FIELDS

A.M. Sadykov[1, 2]

[1] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, sadykov.am19@physics.msu.ru
[2] Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia

Аннотация. Данные прибора Helioseismic and Magnetic Imager на борту Solar Dynamics Observatory широко используются для исследования допплеровских скоростей по лучу зрения и магнитных полей в фотосфере Солнца. Однако наблюдаемые величины HMI подвержены систематическим ошибкам, связанным с алгоритмом восстановления и орбитальным движением SDO. В данной работе анализируются суточные вариации допплеровских скоростей HMI в областях сильного магнитного поля на примере активной области NOAA 11158. В условиях сильных магнитных полей обнаружены выраженные отклонения от суточного среднего значения с модуляцией, близкой к 24 часам. Для интерпретации этого эффекта используется упрощенный алгоритм HMI, основанный на синтетических фильтрограммах линии Fe I 6173.3 Å. Полученные результаты показывают, что наблюдаемая модуляция может быть в значительной степени объяснена совместным влиянием орбитального допплеровского сдвига, зеемановского расщепления и конечной спектральной выборки, что создает основу для разработки алгоритма коррекции данных HMI.

Ключевые слова: Солнечная фотосфера, Активная область, Допплеровская скорость, Магнитные поля, SDO/HMI, Инструментальные эффекты, Зеемановское расщепление.

Abstract. Data from the Helioseismic and Magnetic Imager onboard the Solar Dynamics Observatory are widely used to study line-of-sight Doppler velocities and magnetic fields in the solar photosphere. However, HMI observables are affected by systematic errors associated with the reconstruction algorithm and the orbital motion of SDO. In this paper, we analyze daily variations of HMI Doppler velocities in strong magnetic-field regions using NOAA active region 11158 as a case study. Under conditions of strong magnetic fields, pronounced deviations from the daily mean are detected, with a modulation close to a 24-hour period. To interpret this effect, we use a simplified HMI algorithm based on synthetic filtergrams of the Fe I 6173.3 Å line. The results show that the observed modulation can be largely explained by the combined influence of orbital Doppler shifts, Zeeman splitting, and finite spectral sampling, providing a basis for developing a correction algorithm for HMI data.

Keywords: Solar photosphere, active regions, Doppler velocity, magnetic fields, SDO/HMI, instrumental effects, Zeeman splitting.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения прибора Helioseismic and Magnetic Imager на борту Solar Dynamics Observatory (SDO/HMI) основаны на измерениях поляризованных фильтрограмм в линии Fe I 6173.3 Å. Наблюдаемые величины восстанавливаются по шести спектральным положениям относительно центра линии [Schou et al., 2012; Couvidat et al., 2016]. Существенным источником систематических ошибок в продуктах HMI является лучевая скорость аппарата SDO относительно Солнца. Из-за геосинхронной орбиты она изменяется с периодом около суток и достигает амплитуды около 3.5 км/с. В обработке HMI вводятся соответствующие поправки, однако остаточные суточные эффекты сохраняются [Couvidat et al., 2016]. Такие вариации проявляются как в допплеровских скоростях, так и в магнитных измерениях, особенно в областях сильного магнитного поля [Smirnova et al., 2013; Hoeksema et al., 2014].

Повышенная чувствительность областей с сильным магнитным полем связана с зеемановским расщеплением линии. Совместный вклад орбитального допплеровского сдвига, конечной спектральной выборки HMI и алгоритма восстановления приводит к нелинейным ошибкам в определении скорости и магнитного поля. В настоящей работе этот эффект исследуется на примере активной области NOAA 11158 с использованием данных HMI и упрощенной модели алгоритма восстановления.

ДНЕВНЫЕ ВАРИАЦИИ В ДОППЛЕРОВСКИХ СКОРОСТЯХ

Для исследования систематических вариаций использовались допплерограммы и магнитограммы SDO/HMI для активной области NOAA 11158. Для каждого момента времени пикселям допплерограммы сопоставлялись соответствующие пиксели магнитограммы, после чего каждому пикселю ставилась в соответствие пара величин: допплеровская скорость V_{Dop} и магнитное поле B. Значение V_{Dop} рассматривалось относительно средней допплеровской скорости в пределах

выбранного кадра с активной областью. Размер кадра составляет 342×342 пикселя HMI или $2.74' \times 2.74'$.

Для выделения суточной компоненты рассматривалось отклонение допплеровской скорости от суточного среднего значения. Диапазон магнитного поля от 0 до 2000 Гс был разбит на интервалы шириной 50 Гс. Для каждого интервала вычислялось среднее значение скорости в данный момент времени, а затем определялось его отклонение от среднего значения за сутки:

$$\Delta V(B,t) = \langle V_{\mathrm{Dop}}(B,t)\rangle - \langle V_{\mathrm{Dop}}(B,t)\rangle_{\mathrm{day}} \quad (1)$$

где $\langle V_{\mathrm{Dop}}(B,t)\rangle$ – средняя допплеровская скорость в заданном интервале магнитного поля в момент времени t, а $\langle V_{\mathrm{Dop}}(B,t)\rangle_{\mathrm{day}}$ – соответствующее среднее значение с временным окном в 24 часа.

На рисунке 1 видно, что в сильных магнитных полях появляются выраженные систематические отклонения. Эти отклонения изменяются квазипериодически с характерным периодом около 24 часов. В качестве опорной точки будем рассматривать значение магнитного поля около $B \approx 1750$ Гс, для активной области NOAA 11158 при данном магнитном поле отклонения достигают ± 400 м/с.

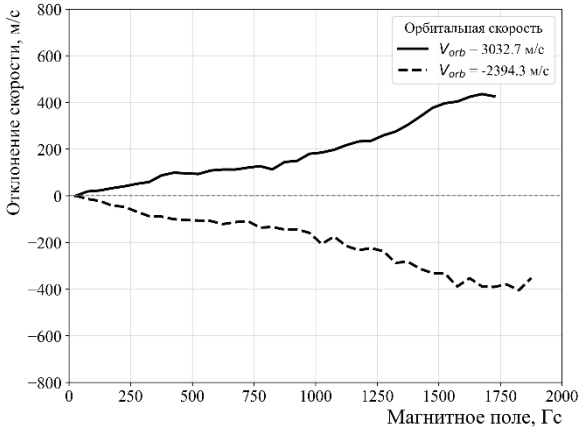

Рис. 1. Отклонение средней допплеровской скорости от суточного среднего в зависимости от магнитного поля

МОДЕЛЬНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ЛИНИЯ

Для интерпретации наблюдаемых вариаций использовалась упрощенная модель восстановления допплеровской скорости по HMI-фильтрограммам. В качестве входного профиля была выбрана модельная линия Fe I 6173.3 Å, рассчитанная по модели фотосферы Солнца в симуляции StellarBox размером $6.4 \times 6.4 \times 6.2$ Мм [Kitiashvili et al., 2015]. Исходный профиль сдвигался на заданную величину, после чего из него формировались синтетические интенсивности в шести спектральных положениях HMI. Для заданной скорости V_{true} допплеровский сдвиг задавался выражением:

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{V_{\mathrm{true}}}{c} \quad (2)$$

где $\lambda_0 = 6173.3\,A^{\circ}$ – центральная длина волны линии, а c – скорость света.

Затем по синтетическим фильтрограммам рассчитывалась скорость V_{HMI}, восстановленная упрощенным алгоритмом.

В штатной обработке HMI используются дискретные оценки коэффициентов Фурье профиля линии. Поскольку профиль задается только шестью спектральными отсчетами, восстановленная скорость может отличаться от истинной [Kitiashvili et al., 2015]. Полученная зависимость $V_{\mathrm{HMI}} = V_{true}$ оказывается нелинейной: при увеличении модуля скорости отклонение от линейного закона возрастает (Рис. 2). Следовательно, даже без учета магнитного поля алгоритм вносит собственную нелинейность, которая в сильных полях может усиливаться из-за зеемановского расщепления.

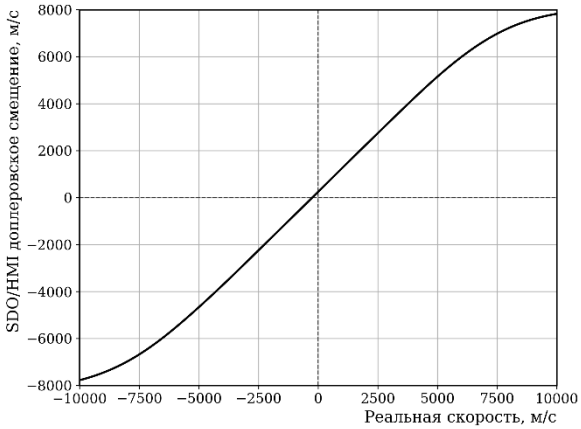

Рис. 2. Зависимость допплеровской скорости, восстановленной упрощенным алгоритмом HMI, от реальной скорости, заданной в модельной спектральной линии

Полученная зависимость $V_{\mathrm{HMI}}(V_{true})$ была использована для построения корректировки алгоритм HMI. Для этого зависимость между заданной скоростью V_{true} и скоростью, восстановленной упрощенным алгоритмом V_{HMI}, рассматривалась как калибровочная функция. Коррекция выполнялась путем обратного преобразования: для каждого значения V_{HMI}, полученного в модели, определялась соответствующая скорость V_{corr}.

АНСАМБЛЬ СОСТОЯНИЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ

Реальный пиксель HMI не обязательно будет соответствовать однородной атмосфере с единственными значениями скорости и магнитного поля. В пределах одного пикселя могут присутствовать мелкомасштабные компоненты с различными лучевыми скоростями и напряженностями магнитного поля. Поэтому в работе рассматривается ансамбль состояний спектральной линии.

Ансамбль задавался в двумерном пространстве параметров: лучевая скорость V и магнитное поле B. Для каждого расчетного случая выбирались центральные значения V_0 и B_0, вокруг которых строилось распределение состояний. Область параметров разбивалась на сетку 100×100 точек:

100 значений по скорости и 100 значений по магнитному полю. Каждая точка сетки соответствовала условному субпикселю с заданными значениями V_i и B_j.

Отдельные состояния задаются распределением, основанным на функции ошибок. Далее для каждого состояния рассчитывался свой профиль спектральной линии с учетом допплеровского смещения и зеемановского расщепления. Итоговые профили право- и левополяризованных компонент ансамбля рассчитывались как взвешенная сумма вкладов всех состояний:

$$I_{\mathrm{R}}(\lambda) = \sum_{i,j} W_{ij}\ I_{\mathrm{R}}(\lambda; V_i, B_j) \quad (3)$$

$$I_{\mathrm{L}}(\lambda) = \sum_{i,j} W_{ij}\ I_{\mathrm{L}}(\lambda; V_i, B_j) \quad (4)$$

где I_R и I_L – профили право- и левополяризованного компонента, а W_{ij} – нормированный вес соответствующего состояния. Веса всех состояний одинаковы и соответствуют условию:

$$\sum_{i,j} W_{ij} = 1 \quad (5)$$

Таким образом, результирующий спектр описывает не один однородный пиксель, а усредненный сигнал от набора субпиксельных компонент.

Результаты

С использованием описанной модели были рассчитаны отклонения допплеровской скорости, возникающие при прохождении ансамблевых профилей через упрощенный алгоритм HMI. В расчетах учитывались допплеровское смещение, связанное с лучевой орбитальной скоростью SDO и искусственной скоростью поверхности, зеемановское расщепление линии Fe I 6173.3 Å и ансамблевое распределение состояний по скорости и магнитному полю.

Для случая без применения корректировки видно, что модель воспроизводит выраженную суточную модуляцию восстановленной скорости (Рис. 3а, б). Максимальные отклонения возникают не во всем диапазоне магнитного поля, а в сильных магнитных полях. Для ансамбля с разбросом ± 500 м/с по скорости и ± 500 Гс по магнитному полю амплитуда отклонений достигает примерно от -500 до $+400$ м/с для случая со скоростью поверхности $V_{\text{пов}} = 0$ км/с. По величине и положению максимума по магнитному полю этот результат близок к отклонениям, полученным по реальным данным HMI для NOAA 11158.

После применения корректировки, построенной по зависимости $V_{HMI}(V_{true})$, амплитуда модельных отклонений заметно уменьшается (Рис. 3в, г). В случае ансамбля ± 500 м/с и ± 500 Гс максимальные значения снижаются примерно до диапазона от -100 до $+75$ м/с для той же скорости поверхности. Это показывает, что значительная часть эффекта связана с нелинейностью восстановления скорости по дискретным спектральным отсчетам.

Вместе с тем корректировка не устраняет отклонения полностью. Например, при увеличении разброса магнитного поля в ансамбле до ± 1000 Гс остаточные вариации снова становятся заметными и достигают примерно от -350 до $+250$ м/с (Рис. 3д, е). Таким образом, амплитуда суточных отклонений определяется не только калибровочной нелинейностью алгоритма, но и формой усредненного спектрального профиля, зависящей от субпиксельного распределения магнитного поля.

Заключение

В работе исследовано влияние орбитальной лучевой скорости SDO на восстановление допплеровских скоростей и магнитного поля по данным SDO/HMI. На примере активной области NOAA 11158 показано, что в областях сильного магнитного поля наблюдаются выраженные суточные отклонения допплеровской скорости от среднего значения. Максимальные отклонения достигают нескольких сотен м/с и проявляются преимущественно в областях с сильным магнитным полем, что указывает на связь данного эффекта не только с орбитальным движением SDO, но и с магнитной структурой наблюдаемой области.

Моделирование ансамбля состояний спектральной линии показало, что суточные отклонения могут возникать вследствие совместного действия орбитальной скорости аппарата, скорости поверхности, зеемановского расщепления и конечной спектральной выборки HMI. Без корректировки модель воспроизводит отклонения, близкие по амплитуде и зависимости от магнитного поля к наблюдаемым в данных HMI. После применения корректировки амплитуда отклонений заметно уменьшается, однако полностью эффект не исчезает, особенно при большом разбросе магнитного поля внутри ансамбля.

Полученные результаты показывают, что учет корректировки, основанной на нелинейности наблюдаемых HMI скоростей, может существенно снизить суточные вариации в HMI-допплерограммах. Вместе с тем остаточные отклонения указывают на необходимость дальнейшего учета субпиксельной структуры и более полного описания формы спектральной линии. Эти результаты могут быть использованы как основа для разработки корректирующего алгоритма, направленного на повышение точности допплеровских и магнитометрических измерений SDO/HMI.

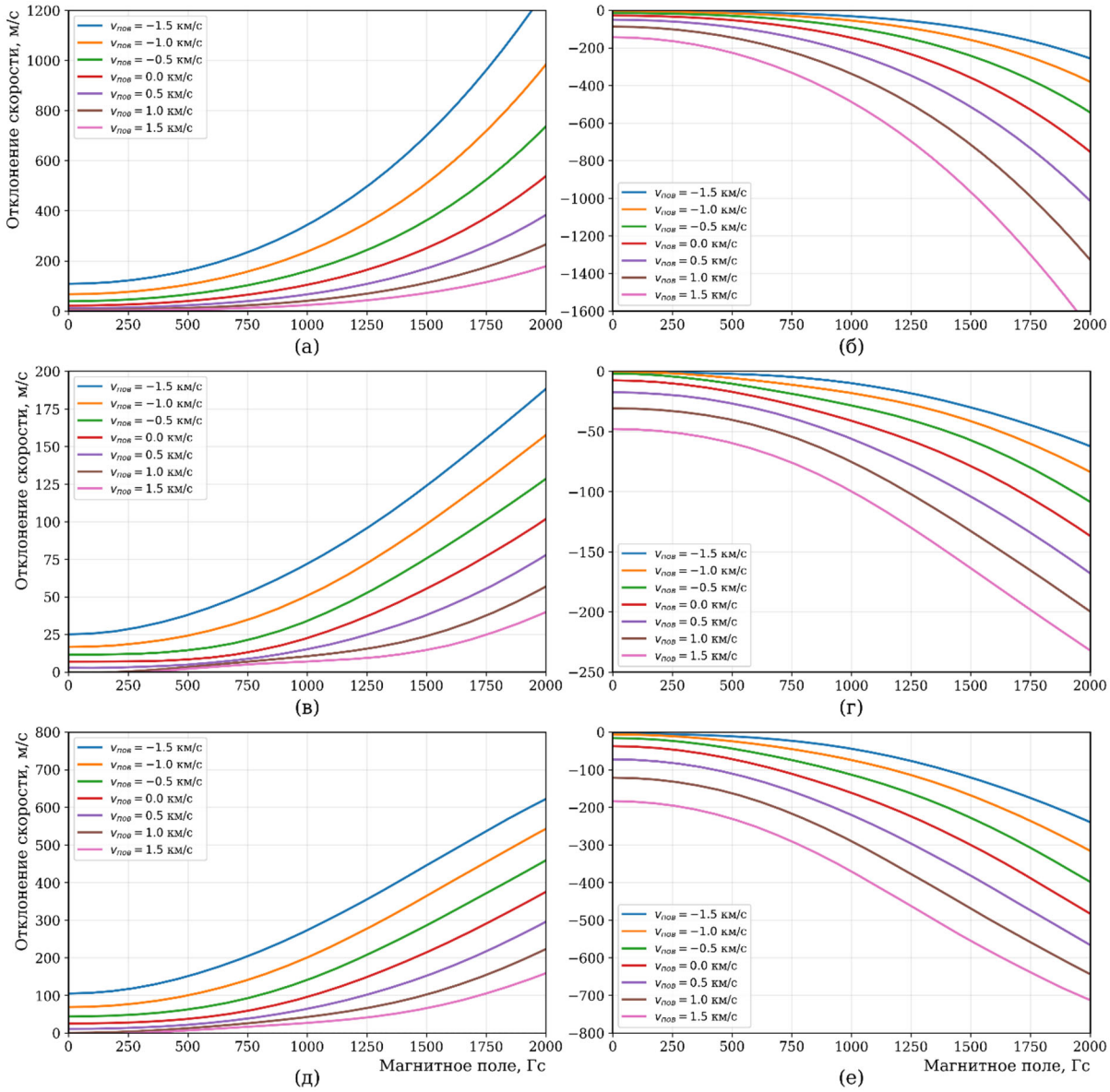

Рис. 3. Отклонения допплеровской скорости, восстановленной упрощенным алгоритмом HMI, в зависимости от магнитного поля для различных значений скорости поверхности $V_{пов}$. Панели (а), (б) соответствуют расчету без применения корректировки алгоритмической нелинейности; панели (в), (г), (д), (е) – расчету с учетом корректировки. В левой колонке, (а), (в), (д), задана лучевая орбитальная скорость SDO $V_{orb} = +3500$ м/с; в правой колонке, (б), (г), (е), $V_{orb} = -3500$ м/с. Для панелей (а), (б), (в), (г) использовался ансамбль состояний с разбросом ± 500 м/с по скорости и ± 500 Гс по магнитному полю; для панелей (д), (е) – ансамбль с разбросом ± 500 м/с и ± 1000 Гс соответственно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Couvidat S., Schou J., Hoeksema J.T. et al. Observables Processing for the Helioseismic and Magnetic Imager Instrument on the Solar Dynamics Observatory // Solar Physics. 2016. V. 291. P. 1887–1938.

Hoeksema J.T., Liu Y., Hayashi K. et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Vector Magnetic Field Pipeline: Overview and Performance // Solar Physics. 2014. V. 289. P. 3483–3530.

Kitiashvili I.N., Couvidat S., Lagg A. Using Realistic MHD Simulations for Modeling and Interpretation of Quiet-Sun Observations with the Solar Dynamics Observatory Helioseismic and Magnetic Imager // The Astrophysical Journal. 2015. V. 808. iss. 1. article id. 59.

Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I. et al. Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Physics. 2012. V. 275. P. 229–259.

Smirnova V., Efremov V.I., Parfinenko L.D. et al. Artifacts of SDO/HMI data and long-period oscillations of sunspots // Astronomy & Astrophysics. 2013. V. 554. A121.