

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Березин И.А., Тлатов А.Г.

Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, tlatov@mail.ru

Современные методы моделирования солнечного ветра (СВ) основаны на эмпирически найденной зависимости скорости СВ от фактора расширения (ФР) силовых трубок коронального магнитного поля. Это так называемая модель WSA (Wang-Shelley-Arge). Данный подход в полной мере не объясняет механизмы формирования СВ. Мы предлагаем для моделирования солнечного ветра использовать другие параметры магнитного поля, такие как: длина силовых линий, абсолютная величина магнитного потока на источнике ветра, расстояние до гелиосферного токового слоя и другие. Мы проанализировали ряд возможных параметров, определяющих скорость солнечного ветра, по данным наблюдений в Кисловодске (СТОП), Стэнфорде (WSO), а также на спутнике SDO/HMI. Было обнаружено, что, отказавшись от использования ФР, можно добиться корреляции между скоростью модельного и наблюдаемого СВ не хуже или лучше, чем с использованием стандартной модели WSA.

Модель СВ WSA основана на идее о том, что слабо расширяющиеся трубки коронального магнитного поля связаны с источниками быстрого СВ и наоборот. Моделирование коронального поля для вычисления степени расширения силовых линий делается в потенциальном приближении (например, PFSS-модель). Входными параметрами модели являются синоптические карты крупномасштабного магнитного поля, измеренного на магнитографах полного диска Солнца. Геометрия открытых силовых линий строится от поверхности источника (радиус $R_s = 2.5R_\odot$) вниз к фотосфере (рис.1). Основания открытых силовых линий лежат в отдельно локализованных областях фотосферы, называемых корональными дырами (КД). На рис. 1. контуры КД нанесены зелёным цветом. Эмпирическая формула для скорости СВ на поверхности источника строится на двух параметрах. Первый – ФР $f_s = R_\odot^2 B_r(R_\odot) / (R_s^2 B_r(R_s))$, где B_r – радиальная компонента магнитного поля, вычисляемая для каждой силовой линии на фотосфере и на поверхности источника.

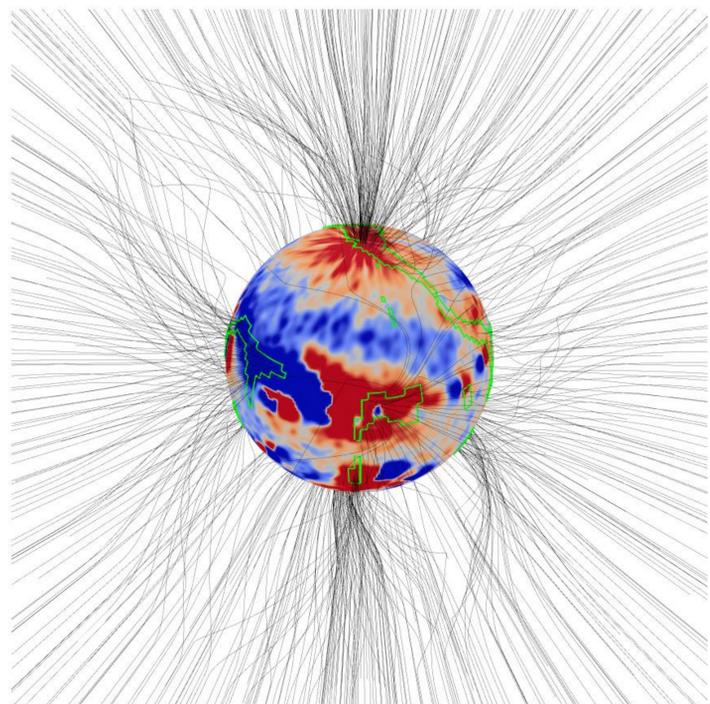


Рис. 1. Силовые линии коронального магнитного поля, PFSS-приближение. Расчёт по данным наблюдений СТОП (Кисловодск), 2257 оборот Кэррингтона.

Второй параметр – θ_b – кратчайшее угловое расстояние от основания силовой линии на фотосфере до края КД.

Мы хотим понять, насколько хороши эти два параметра, описывают ли они механизмы определяющие разгон СВ, или же их использование в модели WSA является следствием стечения обстоятельств. Для этого мы ввели ряд других параметров коронального магнитного поля:

- **Длина линии (L)**. Мы вычисляем длину каждой силовой линии магнитного поля от поверхности источника до фотосферы в единицах солнечного радиуса (рис. 2, средняя панель).
- **Расстояние до гелиосферного токового слоя (θ_{HCS})**. Кратчайшее угловое расстояние в радианах от точки на поверхности источника до гелиосферного слоя (рис. 2, нижняя панель).
- **Средний угол отклонения силовой линии от радиального направления α_r** . Усреднение берётся по высоте, в данном случае от 1 до $1.5 R_\odot$.
- Также мы рассмотрели абсолютные величины радиальной компоненты магнитного потока на фотосфере ($|B_r(R_\odot)|$) и на поверхности источника ($|B_r(R_s)|$).

Сопоставление вышеперечисленных параметров с наблюдаемой скоростью СВ (данные из базы OMNI2) показывает некоторые взаимосвязи. Примеры зависимости скорости СВ от двух параметров коронального магнитного поля представлены на рис. 3.

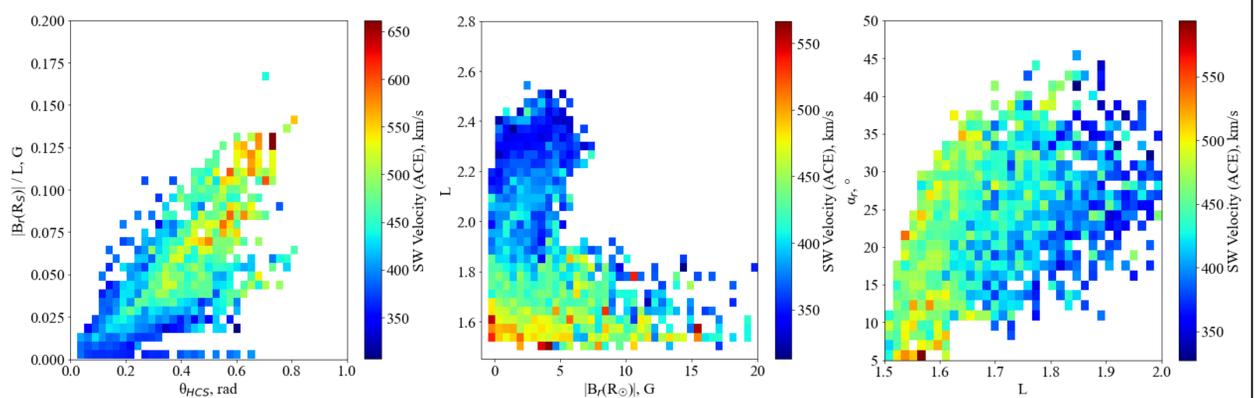


Рис. 3. Зависимость наблюдаемой скорости СВ (ACE) от параметров магнитного поля. Слева-направо: θ_{HCS} и отношение $|B_r(R_s)|$ к L ; $|B_r(R_\odot)|$ и L ; L и α_r . Расчёт по данным наблюдений СТОП (Кисловодск), 2014-2022 гг.

Таблица 1. Коэффициент корреляции между параметрами коронального магнитного поля и наблюдаемой скоростью СВ (OMNI2). Данные усреднены по оборотам Кэррингтона

	V_{WSA}	$1/f_s$	θ_b	$1/L$	$ B_r(R_s) $	θ_{HCS}	$ B_r(R_\odot) $
СТОП (2014-2022)	0.459	0.212	0.529	0.522	0.367	0.396	0.209
SDO/HMI (2010-2022)	0.280	0.056	0.418	0.274	0.279	0.155	-0.017
WSO (1974-2022)	0.312	-0.033	0.252	0.162	0.212	-0.016	-0.011

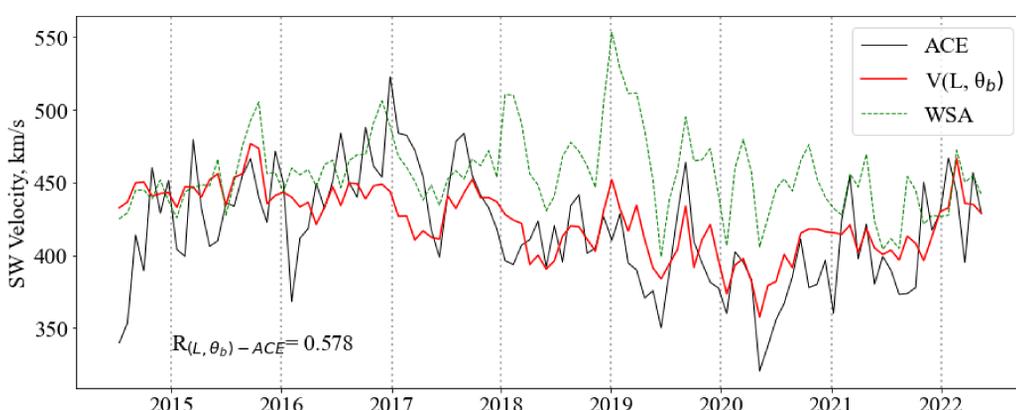


Рис. 4. Смоделированная скорость солнечного ветра по данным наблюдений СТОП (Кисловодск), усреднение по оборотам Кэррингтона. Сравнение с моделью WSA и наблюдаемыми данными (ACE).

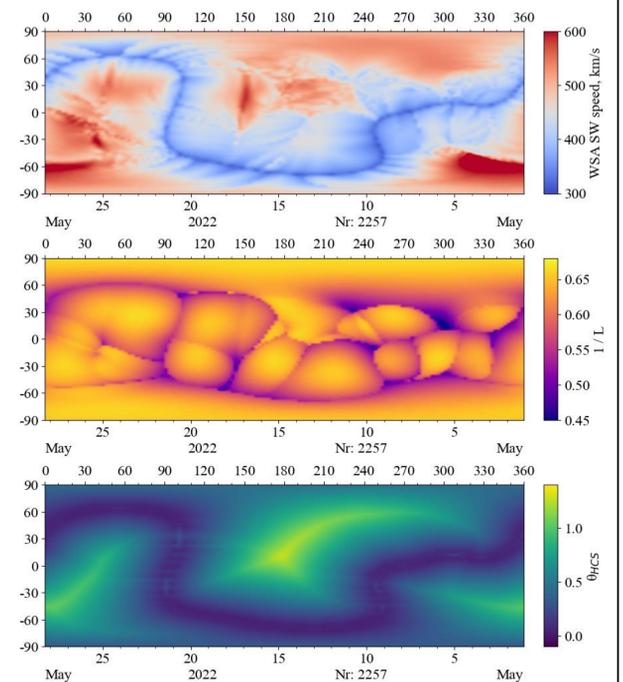


Рис. 2. Распределение параметров на поверхности источника. Сверху-вниз: скорость СВ (WSA), $1/L$ / длина линии, расстояние до гелиосферного токового слоя. Расчёт по данным наблюдений СТОП (Кисловодск), 2257 оборот Кэррингтона.

Мы видим интуитивно понятные связи:

- Меньшая длина силовых линий связана с более быстрыми потоками СВ (рис 3, средняя и правая панель);
- Чем сильнее отклоняется линия от радиального направления на начальном этапе (до $1.5 R_\odot$), тем медленней СВ (рис. 3, правая панель);
- Большой поток магнитного поля на поверхности источника связан с большими скоростями, для фотосферного поля зависимость обратная (рис. 3, левая и средняя панели);
- С удалением на поверхности источника от гелиосферного токового слоя увеличивается скорость СВ (рис. 3, левая панель).

Корреляции между параметрами магнитного поля и наблюдаемой скоростью СВ представлены в таблице 1 для разных рядов входных данных. Для всех рядов данных ФР демонстрирует практически наихудшую корреляцию. Судя по всему, основную роль в модели WSA играет параметр θ_b , который был введён в модель Wang-Sheeley гораздо позже, чем ФР. По расчётам, основанным на данных СТОП, длина линии также представляется перспективным параметром для моделирования скорости СВ. Мы нашли эмпирическую зависимость между скоростью СВ на источнике и параметрами θ_b и L (рис. 4):

$$V(L, \theta_b) = 265 + \frac{1.2 \cdot 10^{-4}}{L^{0.7}} \left(6.2 - 7.1 \exp\left(\frac{-\theta_b}{2.5}\right)^{2.4} \right)^{8.2}$$

Представленная выше формула показывает лучшую корреляцию с наблюдениями – коэффициент корреляции 0.578 против 0.459. При этом в ней не используется ФР – параметр лежащий в основе модели WSA, который, как принято считать, напрямую связан с механизмом разгона солнечного ветра.