

ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ, ОТКЛОНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ОБРАТНОГО ПОТОКА В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Якунина Г.В.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

yakunina45@yandex.ru

Солнечный зонд «Паркер» (Parker Solar Probe, PSP) был запущен 12 августа 2018 года для изучения структуры коронального магнитного поля, углубления понимания процессов нагрева короны и формирования солнечного ветра. Основная цель миссии PSP — определить динамику и структуру плазмы и магнитного поля в источниках солнечного ветра. Ни один из космических аппаратов не подлетал так близко к Солнцу. Это дало возможность получить новые результаты с временным разрешением недоступным для космических аппаратов Helios, Ulysses и Wind.

Одним из ранних открытий PSP является наблюдение разворотов магнитного поля (от 30° до $>120^\circ$) в околосолнечном солнечном ветре, которые теперь называются switchbacks (обратные переключения). Эти кратковременные явления характеризуются резким отклонением вектора магнитного поля от направления окружающего магнитного поля и возвращением в исходное положение. Switchbacks сопровождаются ускорением солнечного ветра и повышением температуры. Согласно одной из часто используемых теорий, «переключения» возникают в нижних слоях солнечной короны в результате магнитного пересоединения и тесно связаны с солнечными струями. Как в корональных дырах, так и на спокойном Солнце можно наблюдать множество явлений, в том числе plumes, джеты и яркие точки.

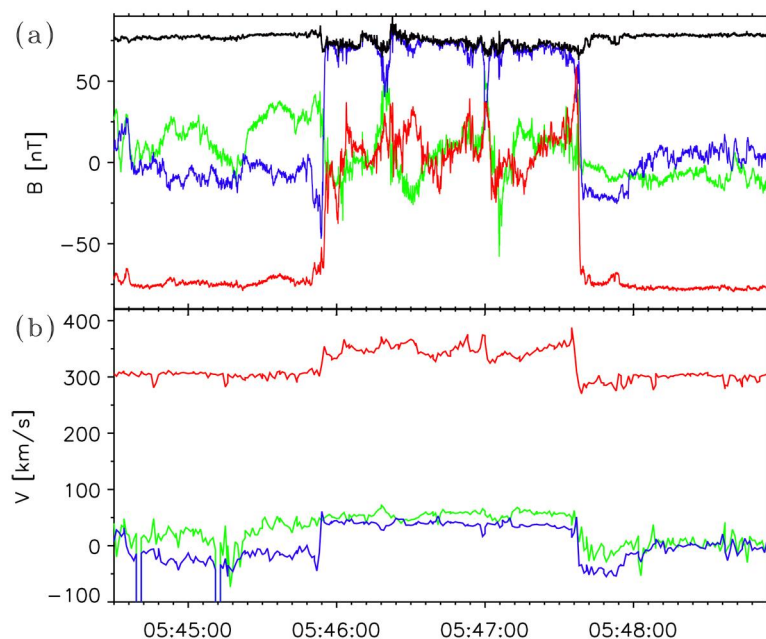
Благодаря наблюдениям Parker Solar Probe (PSP) и Solar Orbiter (SolO) большое внимание уделяется вопросам, связанным с явлениями и структурами солнечной короны и их измерениями. Среди этих нерешенных вопросов - возможная связь между событиями, подобными корональным струям, и обратными переключениями в солнечном ветре (switchbacks).

Резкие изменения направления магнитного поля являются характерной особенностью солнечного ветра (СВ) встречаются в солнечном ветре вблизи Солнца и особенно ярко проявляются в данных зонда Parker Solar Probe (PSP). Магнитные переключения (magnetic switchbacks) соответствуют развороту одной и той же силовой линии магнитного поля.

Эти «обратные» потоки сопровождаются увеличением радиальной скорости и температуры протонов СВ, а также незначительными изменениями плотности. Температура протонов выше внутри обратных потоков (Kasper et al. 2019; Mozer et al. 2020; Krasnoselskikh et al. 2020). Переключения являются характерной особенностью СВ на расстоянии менее 0,3 а.е. Измерения PSP отличаются обилием таких событий.

Зонд PSP зафиксировал первое обратное переключение 6 ноября 2018 г. Это открытие локальных магнитных инверсий в зарождающемся солнечном ветре — вызвало интерес к изучению их происхождения.

На рисунке представлен пример увеличения скорости и связанной с ним магнитной структуры. Во время события радиальная скорость резко возрастает. Подобные увеличения скорости иногда наблюдались, хотя и гораздо реже, в полярном солнечном ветре. Увеличение радиальной скорости сопровождается резким поворотом магнитного поля из отрицательного радиального направления в N , при этом общая амплитуда магнитного поля остается практически неизменной.



Радиальное магнитное поле (красным цветом) демонстрирует переход от отрицательного к положительному. Заштрихованные области - это области с вероятными линиями магнитного потока, рис. 1 из работы Drake et al., 2021. Событие “switchbacks” соответствует пересечению трех различных линий магнитного потока.

PSP наблюдал большое количество скачков радиальной скорости СВ и связанных с ними разворотов в локальном радиальном магнитном поле.

Было предложено несколько возможных механизмов их происхождения. До сих пор неясно, какой из этих механизмов доминирует в генерации обратных потоков, наблюдаемых PSP.

Считается, что switchbacks возникают либо в нижних слоях солнечной атмосферы в результате процессов магнитного пересоединения, либо в результате развития турбулентности или сдвига скоростей в расширяющемся солнечном ветре. Происхождение обратных отклонений не установлено, но было выдвинуто несколько гипотез. Эти модели, как правило, связаны либо с магнитным пересоединением (Fisk et al., 2020), либо с альвеновскими волнами большой амплитуды (Tenerani et al., 2020).

Подробный анализ наблюдаемых свойств переключений проведен в работе (Dudok et al., 2020). Они обнаружили, что распределение отклонений магнитного поля является непрерывным и монотонно уменьшается по направлению к отклонениям на 180° (наименее многочисленные, но наиболее экстремальные отклонения). Спокойный солнечный ветер зарождается в нижних слоях короны, значительно ниже «альвеновской поверхности», в то время как обратные потоки имеют другое происхождение и зарождаются выше в солнечной короне.

Наблюдения (Chitta et al., 2023) предоставили важную информацию, дополняющую данные о высокоструктурированном медленном солнечном ветре, выходящем из экваториальной корональной дыры, зафиксированные аппаратом Parker Solar Probe (PSP) во время его первого прохождения перигелия 6 ноября 2018 года.

Согласно одной из основных теорий, обратные инверсии (switchbacks) возникают в нижней части солнечной короны в результате процессов магнитного пересоединения, тесно связанные с солнечными джетами. Джеты — это явления, наблюдаемые в различных масштабах в разных слоях солнечной атмосферы и связанные с высвобождением магнитного скручивания и спиральности.

В зависимости от размера, местоположения и диапазона наблюдения солнечные струйные явления исторически получали разные названия: спиккулы, фотосферные джеты, хромосферные джеты, протуберанцы, джетлеты, макроспиккулы, корональные джеты, джеты в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне, рентгеновские джеты и т. д. (см. обзоры Raouafi et al., 2016; Shen, 2021).

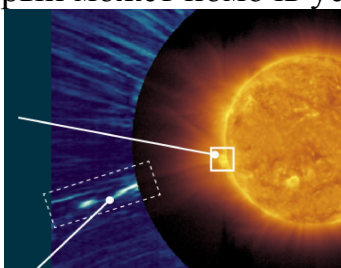
Возникает вопрос - существует ли прямая связь между конкретными солнечными джетами и switchbacks, наблюдаемыми с помощью PSP.

На сегодняшний день исследование Parenti et al., (2021) является единственным, в котором удалось установить однозначную связь между конкретными наблюдениями корональных джетов и измерениями на поверхности Солнца. Это подчеркивает сложность проведения такого прямого сравнения даже для крупных джетов, особенно с точки зрения их взаимосвязи. Kumar et al., (2023) выявили повторяющиеся джеты, возникающие в результате пересоединения при смене полярности или прорыва в ярких точках корональных дыр и у оснований плюмов, которые, вероятно, являются источником микропотоков и switchbacks, наблюдаемых в СВ.

Результаты анализа показали, что джеты, связанные с switchbacks (SBs), образуются в результате магнитного пересоединения на границе хромосферной сетки, (How et al., 2024). SBs, солнечные джеты и магнитное пересоединение взаимосвязаны. Солнечные джеты и SBs вызваны одним и тем же процессом магнитного пересоединения. SBs возникают в результате магнитного пересоединения в переходной области или в нижней части короны, а также на границах хромосферной сетки. Такие параметры, как частота и количество

магнитного потока, связанного с деформацией силовых линий магнитного поля в ходе SBs, помогут определить частоту и продолжительность коронального магнитного пересоединения и, таким образом, количественно оценить перенос энергии и массы в межпланетное пространство турбулентным солнечным ветром.

25 марта 2022 г. Solar Orbiter впервые в истории дистанционно наблюдал быстрые изменения в радиальной ориентации магнитного поля (“switchback”) доказывая их происхождение на поверхности Солнца и указывая на механизм, который может помочь ускорить солнечный ветер. (Telloni et al., 2022).

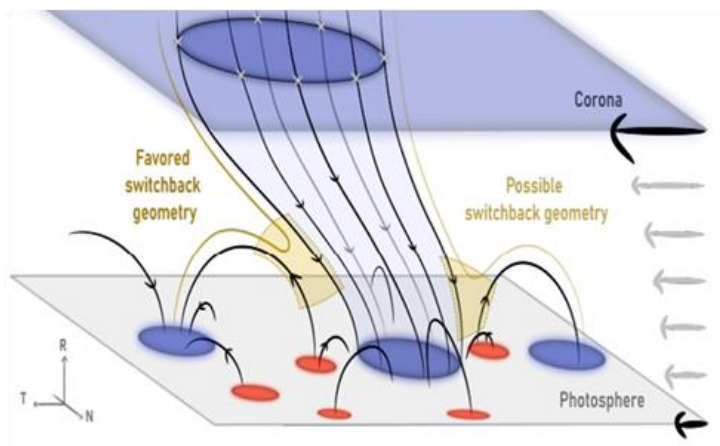


Стрелки показывают АО на диске и switchback.

Это первый случай, когда магнитное обратное движение наблюдалось дистанционно. Все другие обнаружения имели место, когда космический корабль пролетал через возмущенные магнитные области.

Магнитные инверсии вызывают повышенный интерес из-за их потенциальной роли в нагреве и ускорении солнечного ветра, но их происхождение до сих пор вызывает споры. Когда открытые и замкнутые силовые линии магнитного поля взаимодействуют вблизи активной области, магнитное поле перестраивается и энергия высвобождается в виде S-образного плазменного возмущения. Zank et al., 2020.

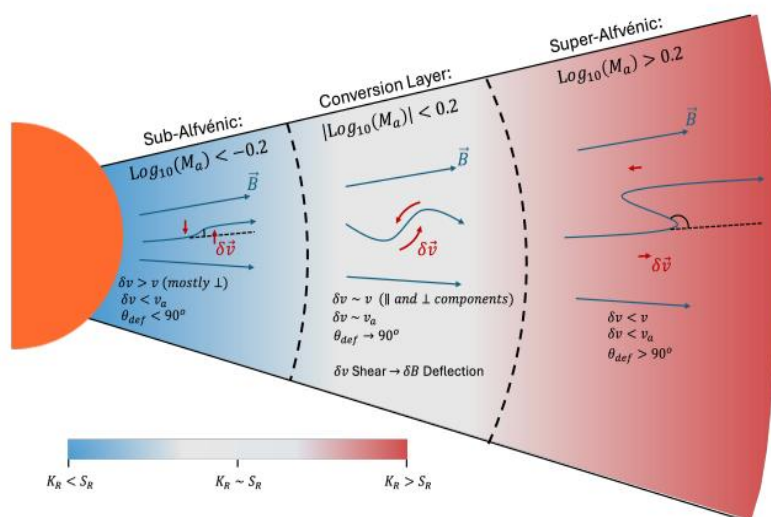
На рисунке представлена иллюстрация возможного объяснения преимущественной ориентации обратного переключения, предполагающая пересоединение в низкой короне.



Стрелки показывают относительный градиент скорости между дифференциально вращающейся фотосферой и квазижестко вращающейся короной. Первичным механизмом является пересоединение в нижней части короны. Показаны открытые силовые линии расширяющиеся из фотосферы. Места пересоединения выделены светло-желтым, а пересоединенные силовые линии — желтым. (Fargett, 2022, рис. 10)

В работе (Payne et al., 2026) изучалась статистика альфвеновских отклонений как в субальфвеновском, так и в сверхальфвеновском солнечном ветре. В субальфвеновских режимах маловероятно отклонение магнитного поля на угол более 90 градусов. Результаты показывают, что вблизи альфвеновской поверхности (где число Маха, $Ma = 1$) существует критическая область в пространстве параметров, в которой отклонения скорости приближаются к альфвеновской скорости. Переходный слой (conversion layer) существенно влияет на эволюцию магнитных аномалий. Он создает условия для превращения магнитной энергии в энергию частиц. Возможно, это способствует возникновению обратных магнитных колебаний в сверхальфвеновском СВ.

Статистические данные не обязательно указывают на то, что отдельная структура, пересекая границу с числом Маха ($Ma = 1$), мгновенно потеряет значительную часть своего скоростного сдвига и потока электромагнитной энергии. Диаграмма иллюстрирует наблюдаемые особенности субальфвеновского и суперальфвеновского режимов, а также переходного слоя (conversion layer). Значительные отклонения скорости в слое преобразования становятся всё более параллельными магнитному полю и нестабильными по мере приближения скорости к альфвеновской скорости. В таких условиях могут возникать неустойчивости, аналогичные описанным в исследовании Ruffolo et al., 2020, которые могут вызывать значительные углы магнитного отклонения. Переходный слой оказывает значительное влияние на эволюцию магнитных аномалий. Он создает условия для превращения магнитной энергии в энергию частиц. Возможно, это способствует возникновению обратных магнитных инверсий в суперальфвеновском солнечном ветре.



Диаграмма, иллюстрирующая характеристики субальфвеновского и суперальфвеновского режимов, а также так называемого "конверсионного слоя", где близость к поверхности Альфвена приводит к нелинейным взаимодействиям между магнитными отклонениями и отклонениями скорости, рис.4 из работы Payne et al., 2026.

Важным открытием Parker Solar Probe (PSP) были наблюдения большого количества локализованных скачков лучевой скорости и связанных с ними разворотов или переключений в локальном радиальном магнитном поле вблизи первого перигелия при $35,7 R_{\odot}$. Из-за отсутствия многоточечных наблюдений сложно найти ограничения, которые позволили бы четко разграничить конкурирующие модели, дающие схожие результаты, (Stumpo et al., 2025)

Магнитные инверсии вызывают повышенный интерес из-за их потенциальной роли в нагреве и ускорении солнечного ветра, но их происхождение до сих пор вызывает споры.

Возникновение switchbacks и их свойства зависят от области источника солнечного ветра. Переключения формируются в нижней части солнечной короны и модулируются конвекцией на поверхности Солнца.

К физическим характеристикам обратных потоков относятся высокая альфвеновская скорость, увеличение скорости солнечного ветра, а также локальные изменения плотности и температуры (Mozer et al. 2020; Dudock de Wit et al. 2020; Huang et al. 2023).

Многоточечные наблюдения за Солнцем и внутренней гелиосферой (с помощью прибора PSP, космического аппарата Solar Orbiter, SDO и др.) помогут в изучении происхождения и формирования switchbacks, помогут выявить их структуру, в том числе их кинематику и динамику. (How et al., 2024).

Кроме того, передовые методы численного моделирования также являются мощным инструментом для решения этой важнейшей проблемы в области исследований солнечной и гелиосферной физики.

Изучение сложных взаимосвязей между явлениями, влияющими на продолжительность обратных потоков, заслуживает дальнейшего изучения (How, 2024).