ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ (ARC-POLARIZED) АЛЬВЕНОВСКИХ ВОЛН В ОКОЛОЗЕМНОМ СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Ерофеев Д.В.

Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН, г. Уссурийск, Россия

CHARACTERISTICS OF ARC-POLARIZED ALFVEN WAVES IN NEAR-EARTH SOLAR WIND

Erofeev D.V.

Ussuriysk Astrophysical Observatory of FEB RAS, Ussuriysk, Russia

We have investigated arc-polarized Alfven waves, using data obtained WIND spacecraft in near-Earth solar wind during the time interval from 1995 to 2011. Most interest result of our investigation is that directions of polarization of Alfven waves are distributed not randomly, but they concentrate near two axes. These axes are inclined to heliospheric equator at angles of about 40° .

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-157-160

Солнечный ветер (СВ) представляет собой турбулентную среду, в которой присутствуют разные типы неоднородностей и МГД волн [1], при этом наиболее видную роль играют альвеновские волны. Последние, как правило, наблюдаются в смеси с другими типами флуктуаций. Однако время от времени космические аппараты в течение интервалов времени длительностью в десятки минут регистрируют альвеновские волны практически в чистом виде. Среди «чистых» альвеновских волн встречаются события, в ходе которых вектор магнитного поля $\mathbf{B}$ изменяет направление, оставаясь лежащим приблизительно в одной плоскости. На графиках, показывающих изменение $\mathbf{B}$ в ходе таких событий, конец вектора магнитного поля описывает дугу, вследствие чего эти волны были названы поляризованными по дуге (arc-polarized). Волны такого типа исследовались в ряде работ [2–6]. В настоящей работе продолжено исследование характеристик поляризованных альвеновских волн по данным, полученным в околоземном СВ.

Для нашего исследования были использованы измерения магнитного поля и скорости плазмы солнечного ветра с временным разрешением около 92 с, полученные приборами КА WIND в 1995–2011 гг. Из рядов данных были удалены измерения, полученные в сильно возмущенных областях СВ, в частности в областях взаимодействия медленных и быстрых потоков. Альвеновские волны выделялись по трем критериям: (1) абсолютное значение коэффициента корреляции флуктуаций магнитного поля и скорости превышает 0.9; (2) среднеквадратичное значение флуктуаций модуля магнитного поля составляет не более 0.05 от средней величины $|\mathbf{B}|$; (3) указан-

ные выше условия выполняются для интервала времени длиной 30 мин или более. Обработка данных показала, что доля времени, когда в околоземном СВ наблюдаются альвеновские волны, возрастает с ростом солнечной активности (что согласуется с результатами [7]), причем в быстром СВ альвеновские волны наблюдаются вдвое чаще, чем в медленном.

Поляризация альвеновских волн определялась с помощью хорошо известного метода минимума дисперсии, несколько модифицированного с учетом постоянства $|\mathbf{B}|$. Метод позволяет определить три ортогональных направления, таких, что в направлениях ортов $\mathbf{W}_{\text{Max}}$ и $\mathbf{W}_{\text{min}}$ дисперсия флуктуаций вектора магнитного поля имеет соответственно максимум и минимум. В качестве меры поляризации использовалось отношение $P = D_{\text{Max}}/D_{\text{min}}$, где D_{Max} и D_{min} – максимальная и минимальная дисперсии флуктуаций магнитного поля. На рис. 1 показано распределение альвеновских волн по степени поляризации. Этот график показывает, что относительное число поляризованных волн выше в медленном СВ, чем в быстром СВ, причем различие возрастает с ростом P .

Рис. 1. Распределения альвеновских волн по степени поляризации P (сплошная линия – быстрый СВ, штриховая – медленный СВ).

Всего по данным за 1995–2011 гг. обнаружено 1880 событий, представляющих собой альвеновские волны с высокой поляризацией ($P > 20$), из них 628 найдено в быстром СВ и 1252 в медленном СВ. Статистическое исследование этой выборки позволило получить следующие результаты.

Не менее 80% волн с $P > 20$ обладают линейной поляризацией, т.е. вектор $\mathbf{B}$ изменяет направление, оставаясь лежащим приблизительно в одной плоскости. Около 10% волн с $P > 20$ имеют циркулярную поляризацию, при

которой вектор $\mathbf{B}$ содержит постоянную компоненту и изменяет направление, оставаясь на поверхности конуса.

В качестве меры интенсивности волны нами использовалось максимальное изменение направления магнитного поля в ходе события (магнитуда). Распределение поляризованных альвеновских волн по магнитудам довольно широкое, однако волны с магнитудами около 180° или более наблюдаются очень редко (менее чем в 1% случаев). Среднее значение магнитуды в медленном СВ составляет 89° , в быстром СВ – 108° .

Рис. 2. Распределения направлений среднего магнитного поля $\langle \mathbf{B} \rangle$ (верхняя панель) и направлений максимума дисперсии $\mathbf{W}_{\text{Max}}$ (нижняя панель), для альвеновских волн с $P > 20$ в быстром СВ.

Ранее отмечалось [4, 5], что поляризованные альвеновские волны часто содержат «встроенные» вращательные разрывы. По данным с минутным разрешением невозможно надежно идентифицировать все разрывы, поэтому мы оценили только долю волн, которые содержат скачкообразные изменения направления $\mathbf{B}$ величиной в половину магнитуды волны или более. Оценка показала, что такие вращательные разрывы содержат не менее 30% поляризованных альвеновских волн, причем в ряде событий наблюдалось более одного разрыва.

Для исследования ориентации поляризованных альвеновских волн в гелиосфере использовались два независимо определенных вектора: среднее магнитное поле волны $\langle \mathbf{B} \rangle$ и вектор максимума дисперсии $\mathbf{W}_{\text{Max}}$. Эти векторы лежат в плоскости поляризации волны и приблизительно ортогональны. Направления векторов удобно характеризовать углами ϕ и θ (азимут ϕ отсчитывается от радиального направления $\mathbf{R}$ в направлении восток-запад, а

наклонение θ отсчитывается на север от оси R). Распределения направлений векторов $\langle \mathbf{V} \rangle$ и $\mathbf{W}_{\text{Max}}$ для быстрого СВ показаны на рис. 2 (аналогичные распределения для медленного СВ не имеют существенных отличий). Как можно видеть на рис. 2, векторы $\langle \mathbf{V} \rangle$ концентрируются вдоль оси, задаваемой направлением спирали Паркера ($\varphi \approx 45^\circ$, $\theta = 0$). Отсюда следует, что векторы $\mathbf{W}_{\text{Max}}$ должны концентрироваться около круга, ортогонального к направлению спирали Паркера. Однако фактически концентрация $\mathbf{W}_{\text{Max}}$ более неравномерна. На рис. 2 можно видеть четыре максимума распределения направлений $\mathbf{W}_{\text{Max}}$, которые образуют две пары, в каждой из которых угловое расстояние между максимумами составляет 180° . Такое расположение максимумов распределения означает, что $\mathbf{W}_{\text{Max}}$ концентрируются вблизи двух выделенных в пространстве направлений (осей). Эти оси имеют наклон около 40° к плоскости гелиоэкватора. Таким образом, ориентация плоскости поляризации альвеновских волн в околоземном СВ имеет неслучайный характер, она определяется наличием двух выделенных направлений.

Использованные в работе экспериментальные данные получены из архива National Space Science Data Center and Space Physics Data Facility (ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/).

Литература

1. Tu C.-Y., Marsch E. // Space Sci. Rev., 1995, V. 73, P. 1-210.
2. Riley P., Sonett C., Balogh A. et al. // Space Sci. Rev., 1995, **72**, 197-200.
3. Riley P., Sonett C., Tsurutani B., et al. // JGR, 1996, **101**, No. A9, 19,987–19,993.
4. Tsurutani B., Ho C., Arballo J. et al. // JGR, 1996, **101**, No. A5, 11,027–11,038.
5. Tsurutani B., Ho C. // Reviews of Geophysics, 1999, **37**, 517–541.
6. Wang X., He J., Tu C., et al. // Astrophys. J., 2012, 746:147.
7. Shi M., Xiao C., Li Q. et al. // Astrophys. J., 2015, 815:122.