

УДК 523.62-726:533.6.011.72

**В. Н. Решетник, А. В. Агапитов**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УДАРНЫХ ВОЛН В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ ВБЛИЗИ ОРБИТЫ ЗЕМЛИ

*Аналізуються границі неоднорідностей параметрів сонячного вітру і міжпланетного магнітного поля (ММП) на різних просторових масштабах за вимірюваннями чотирьох космічних апаратів STEREO A, STEREO B, ACE і «Wind» у 2007 р. Проаналізовано радіуси кривизни поверхонь фронтів розривів плазмових параметрів в залежності від відстані між космічними апаратами. Радіуси кривизни поверхні фронту гідродинамічних розривів у площині екліптики для різних подій варіюють у межах декількох сотень RE. Показано, що при розгляді фізичних процесів у навколосезному космічному просторі й у магнітосфері Землі фронти ударних хвиль можуть вважатися плоскими. На просторових масштабах взаємного віддалення системи STEREO A і STEREO B (у 2007 р. — кілька тисяч RE) радіус кривизни змінюється слабо, і в рамках похибки може вважатися сталим.*

### ВВЕДЕНИЕ

Солнечный ветер на орбите Земли имеет нестационарную во времени и пространстве структуру. Ударные волны и другие границы неоднородностей параметров солнечного ветра обеспечивают условия для переноса массы, импульса и энергии в плазме межпланетной среды и являются предметом детального изучения [4, 11]. Время наблюдения, обычно не превышающее десятки секунд, и сложная геометрия поверхности наблюдаемых разрывов усложняют интерпретацию наблюдений, зафиксированных на борту одного или нескольких близко расположенных космических аппаратов [10, 13]. Геометрические параметры поверхностей неоднородностей в солнечном ветре — параметры, которые могут использоваться для моделирования взаимодействия неоднородностей солнечного ветра с магнитосферой Земли [1, 2, 12, 14]. На их основе может быть проведен анализ источника генерации разрыва и особенностей его распространения в межпланетной среде [10]. Эти факторы определяют актуальность исследования геометрических параметров границ неоднородностей плазмы солнечного ветра на основе уникальной по численности и конфигурации группировки космических аппаратов, проводя-

щих измерения в солнечном ветре. Это космические аппараты в окрестности первой точки Лагранжа ACE и «Wind», и два космических аппарата проекта STEREO [9], обеспечивающих азимутальное пространственное разрешение параметров разрыва.

### МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Граница в плазме — это поверхность, которая разделяет две области пространства, заполненные плазмой с различными физическими параметрами. Толщина переходной области для бесстолкновительной плазмы с магнитным полем по порядку величины соответствует ларморовскому радиусу. На пространственном масштабе, намного большем, чем характерные масштабы в плазме (инерционный, ларморовский и дебаевский радиусы), граница может быть представлена в виде разрыва в макроскопических параметрах плазмы, таких как плотность, температура, скорость, аналогично границам в гидродинамике.

В работе использованы измерения параметров плазмы и магнитного поля солнечного ветра на борту космических аппаратов ACE, «Wind», STEREO A и STEREO B, которые находились поблизости от плоскости эклиптики и были разнесены в пространстве азимутально. «Wind», ACE проводили измерения вблизи Земли, тогда как STEREO A и STEREO B постепенно отдаля-

лись от Земли. Космические аппараты STEREO A и STEREO B выведены на гелиоцентрические орбиты в 2006 г.

В работе использованы измерения межпланетного магнитного поля (ММП) на борту космического аппарата ACE с временным разрешением 16 с [15] и на борту аппарата «Wind» с разрешением в 3 с [7]. Измерения концентрации и скорости потока плазмы солнечного ветра, полученные на борту аппаратов ACE и «Wind», использовались с временным разрешением 64 и 60 с соответственно [5, 8]. Временное разрешение используемых в работе магнитометрических и пламенных измерений на борту космических аппаратов STEREO A и STEREO B составляет 60 с [9].

Для оценки направления нормали к фронту ударной волны или разрыва использовался метод поиска направления наименьших вариаций магнитного поля (MVAB) [16]. Эта методика на основе измерений трех компонент магнитного поля при пересечении разрыва позволяет восстановить направление нормали [6]. Из условия  $\text{div} \mathbf{B} = 0$  в приближении одномерной границы получаем  $\partial B_z / \partial z = 0$ . В работе [16] показано, что направление нормали к токовому слою разрыва  $\mathbf{n}$  совпадает с направлением минимума вариации вектора магнитного поля при пересечении поверхности разрыва. Направление оси  $\mathbf{e}_1$  может быть определено путем минимизации величины  $\sigma$ :

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left| \langle \mathbf{B}^{(m)} - \langle \mathbf{B} \rangle \cdot \mathbf{n} \rangle \right|^2,$$

где  $m$  — различные измерения вектора магнитного поля, принимающие участие в анализе,  $M$  — количество измерений в выборке; среднее значение вектора магнитного поля определяется как

$$\langle \mathbf{B} \rangle = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{B}^{(m)}.$$

Минимизация достигается нормализацией налагаемой связи  $|\mathbf{n}| = 1$ . Для реализации этого ограничения в работе используется метод множителей Лагранжа. В результате задача сводится к решению линейной однородной системы уравнений

$$\sum_{v=1}^3 M_{\mu v}^B n_v = \lambda_{\mu} n_{\mu},$$

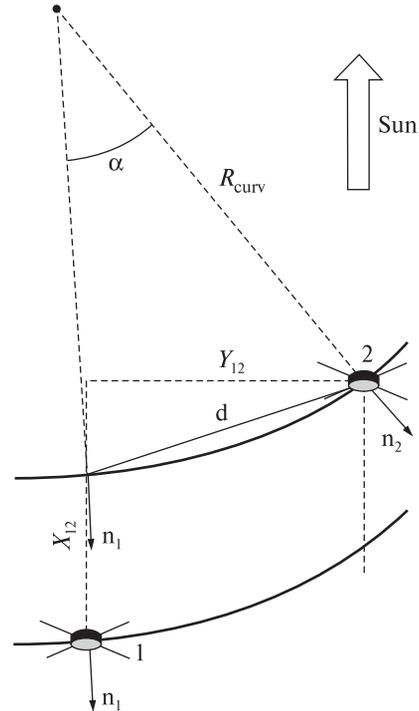


Рис. 1. Определение радиуса кривизны фронта магнито-гидродинамического разрыва

где  $\mu$  и  $\nu$  — компоненты в декартовой системе (в нашем случае GSE),  $M_{\mu\nu}^B = \langle B_{\mu} B_{\nu} \rangle - \langle B_{\mu} \rangle \langle B_{\nu} \rangle$  — матрица вариаций магнитного поля с собственными значениями  $\lambda_1, \lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Собственные вектора матрицы  $M^B$  ортогональны и образуют базис собственной системы координат разрыва.

Радиус кривизны фронта разрыва определялся в плоскости эклиптики, так как направления нормалей к фронтам анализируемых гидродинамических разрывов в солнечном ветре  $|n_z| < |n_x, n_y|$ , и приближенно фронт можно считать двумерным. В приближении цилиндрической симметрии оценка радиусов кривизны фронтов гидродинамических разрывов проводилась по формуле

$$R = 0.5 \left[ (x_{12} - \tau_{12} V_{sw})^2 + y_{12}^2 \right]^{1/2} / \sin(0.5\alpha_{12}),$$

где  $V_{sw}$  — скорость солнечного ветра,  $\alpha_{12}$  — угол между направлениями нормалей, определенных в точках 1 и 2,  $x_{12}$  и  $y_{12}$  — координаты космических аппаратов в системе GSE,  $\tau_{12}$  — промежуток времени между регистрацией пересечения границы на борту первого и второго аппаратов (рис. 1).

## АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАЗРЫВОВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

В работе проводился анализ измерений параметров солнечного ветра за 2007 г. На материалах измерений космических аппаратов ACE, «Wind», STEREO A и STEREO B в 2007 г. выделены крупномасштабные разрывы в плазме солнечного ветра. Критерием регистрации гидродинамического разрыва выбрано резкое (соответствующее по пространственному масштабу ларморовскому радиусу протонов в солнечном ветре) изменение модуля межпланетного магнитного поля, составляющее по модулю не менее 10 нТл в минуту. Для идентификации типа границы анализировались параметры изменения скорости потока и концентрации плазмы солнечного ветра в момент скачка величины ММП. Небольшое количество гидродинамических разрывов, обнаруженное за анализируемый период, обусловлено относительно низким уровнем солнечной активности в 2007 г. Неоднократно встречались ситуации, когда ударная волна или другой тип гидродинамического разрыва регистрировался на одном аппарате, тогда как датчики иной космической миссии его не регистрировали. Ниже представлены результаты анализа данных по пяти интервалам времени, на которых были зарегистрированы границы разного типа (зарегистрированные на борту всех космических аппаратов). Динамика изменения модуля магнитного поля, концентрации ионов и скорости потока плазмы солнечного ветра по данным измерений аппарата «Wind» для всех событий представлены на рис. 2.

14 января 2007 г. в 19:32 UT космическим аппаратом «Wind» был зарегистрирован приход ударной волны, при этом резко увеличилась скорость потока, концентрация плазмы солнечного ветра и модуль межпланетного магнитного поля (рис. 2, а). Данное событие представляет собой ударную волну, которая сильно диссипировала в межпланетной среде в процессе распространения.

Событие 12 февраля характеризуется резким прыжком величины ММП в 12:13 UT (для космического аппарата «Wind»). В момент регистрации разрыва концентрация солнечного ветра

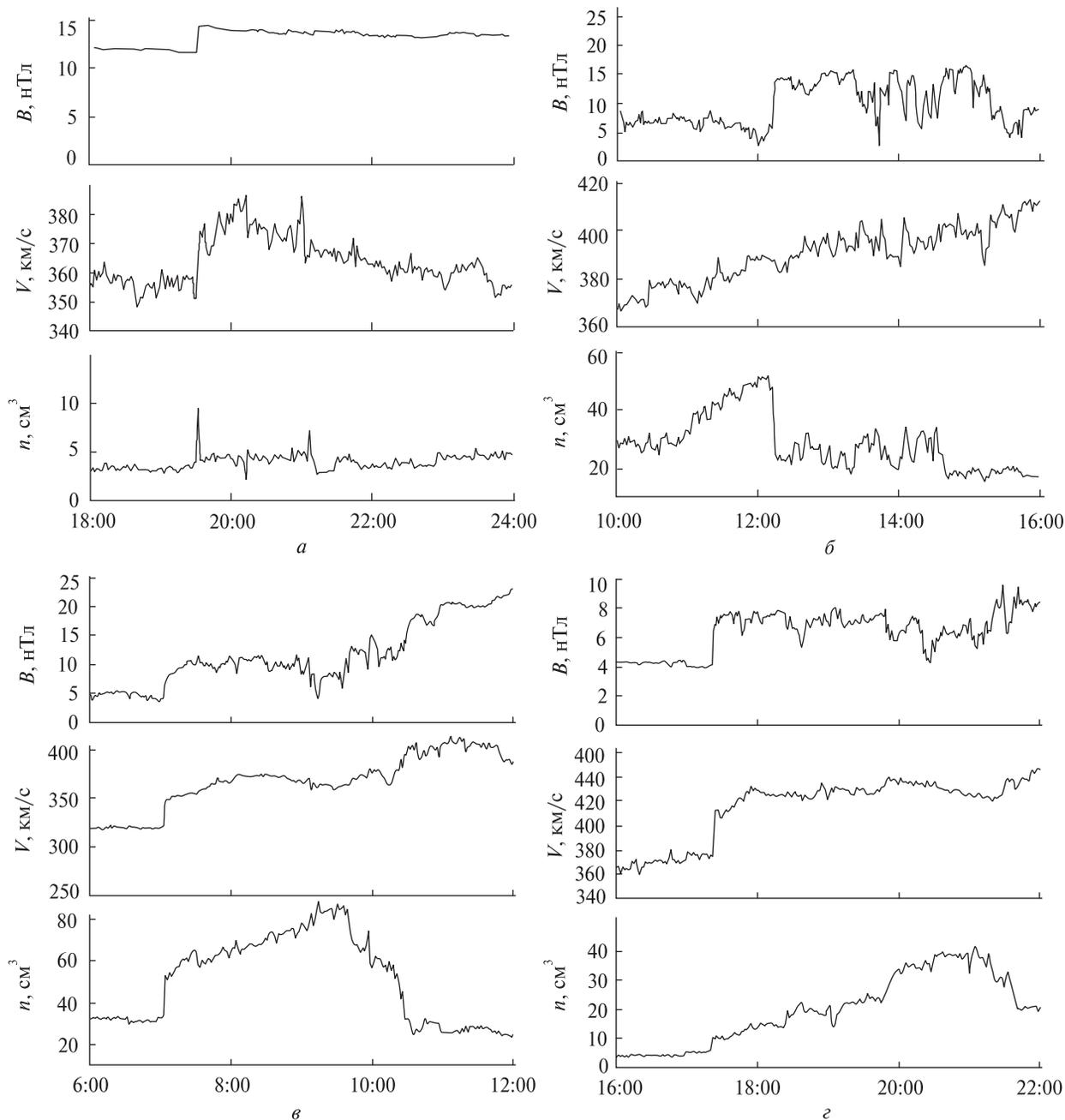
уменьшилась, а скорость плазмы не показывала заметных изменений, флуктуируя на фоне постоянного роста (рис. 2, б). Таким образом, данное событие можно отнести к тангенциальному разрыву. Событие, зарегистрированное «Wind» 12 февраля, не является локальной флуктуацией в солнечном ветре, это подтверждают измерения с других космических миссий (рис. 3, а).

На космическом аппарате «Wind» 7 мая 2007 г. в 7:03 UT наблюдается резкое увеличение величины ММП, концентрации и скорости солнечного ветра. После наблюдается магнитное облако, с концентрацией плазмы в 3–4 раза большей, чем фоновая, невозмущенная до ударной волны (рис. 2, в). Измерения с других космических аппаратов показывают подобное поведение (рис. 3, б). Время наблюдения межпланетного магнитного облака составило около 3.5 ч. Задний фронт облака более размазан в пространстве и наблюдается около 10:30 UT по данным «Wind». Передний и задний фронты магнитного облака 7 мая 2007 г. были отобраны для дальнейшего анализа. Событие 7 мая является одним из наилучших примеров ударных волн зарегистрированных в солнечном ветре за 2007 год в целом.

Событие, зарегистрированное аппаратом «Wind» 19 ноября в 17:23 UT, является второй сильной ударной волной в солнечном ветре, которые наблюдались на орбите Земли за 2007 год. Скорость плазмы солнечного ветра увеличилась на 15 %, а концентрация и модуль ММП увеличились практически в два раза (рис. 2, г). В измерениях на борту космических аппаратов ACE, STEREO A и STEREO B были выделены аналогичные изменения параметров солнечного ветра.

Для каждого из выделенных событий были найдены нормали к фронтам магнитогидродинамических разрывов (таблица). Различие моментов прихода разрывов объясняется геометрическим расположением космических аппаратов и, возможно, сложной формой фронта МГД-разрыва.

Распределение найденных нормалей к фронтам разрывов, спроектированных на плоскость эклиптики, приведены на рис. 4. Чем ближе спутники расположены в пространстве, тем меньше отклонение нормалей. Незначитель-



**Рис. 2.** Гидродинамические разрывы в плазме солнечного ветра по наблюдениям магнитного поля, скорости потока плазмы и концентрации положительных ионов на борту космического аппарата «Wind» 14 января (а), 12 февраля (б), 7 мая (в) и 19 ноября 2007 г. (г)

ные различия направлений нормалей, определенных по измерениям космических аппаратов ACE и STEREO B, подтверждает использованное приближение радиального распространения разрыва. Высокая степень корреляции магнито-

метрических и плазменных измерений на борту разных аппаратов показывает, что на временных масштабах порядка единиц часов макроскопические параметры фронтов ударных волн можно считать стационарными (рис. 4, а и б). На боль-

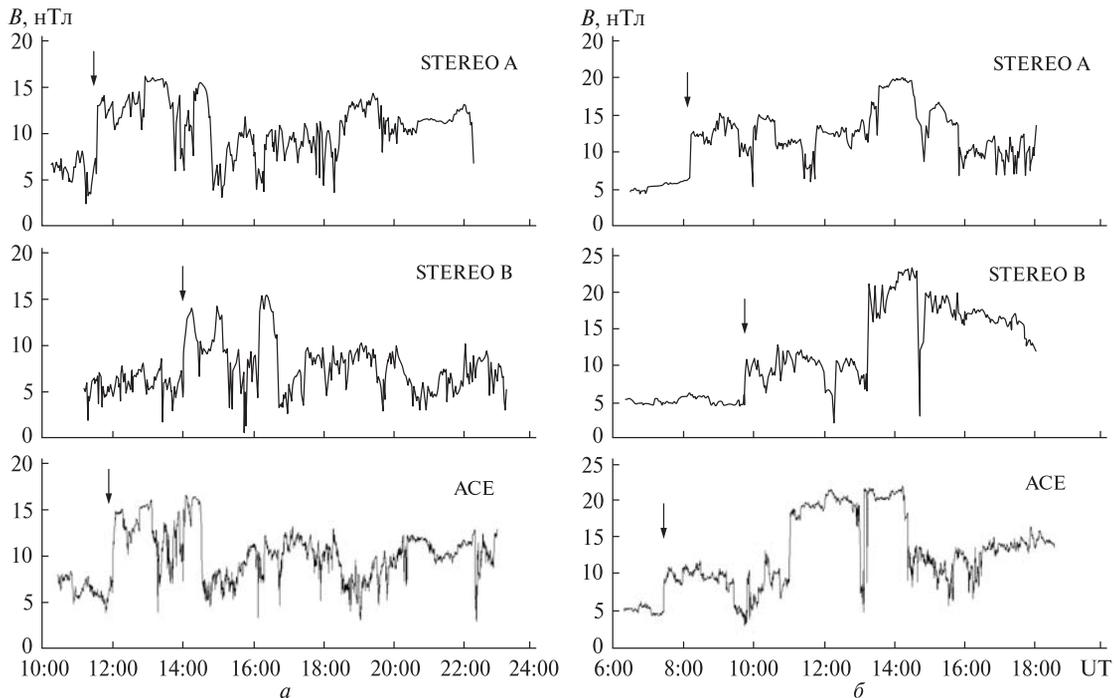


Рис. 3. Межпланетные гидродинамические разрывы, наблюдаемые в измерениях модуля ММП на борту космических аппаратов STEREO A, STEREO B и ACE соответственно, 12 февраля (а) и 7 мая 2007 г. (б)

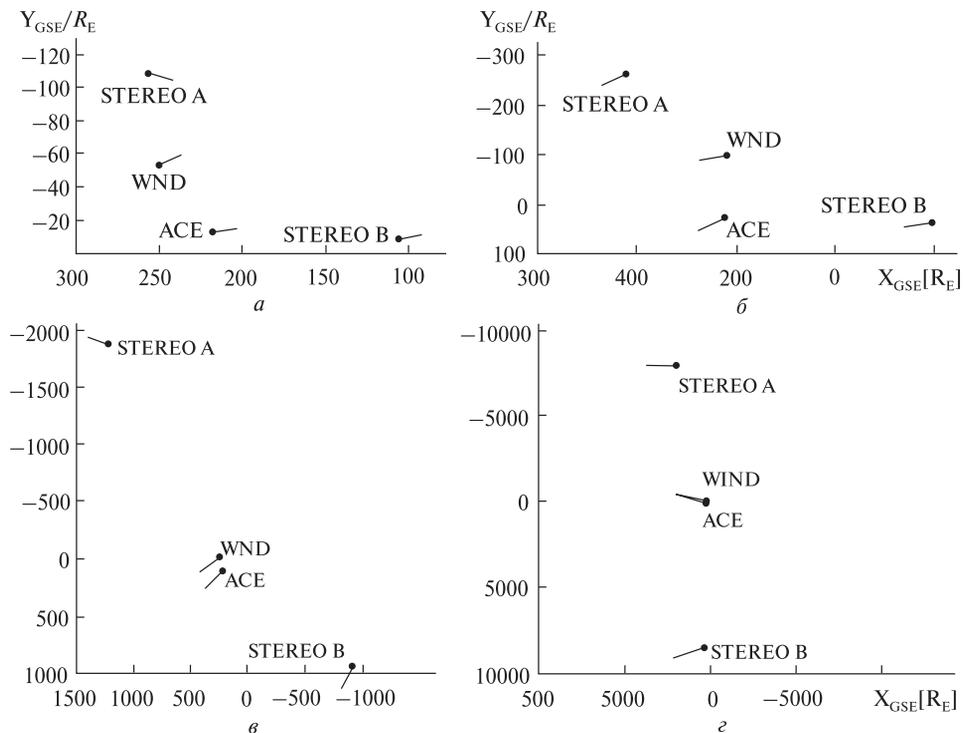


Рис. 4. Нормали к фронтам гидродинамических разрывов в солнечном ветре по измерениям ММП на борту космических аппаратов STEREO A, STEREO B, ACE и «Wind» для событий 14 января (а), 12 февраля (б), 7 мая (в) и 19 ноября 2007 г. (з)

**Параметры гидродинамических разрывов, определенные по измерениям космических аппаратов ACE, «Wind», STEREO A и B**

Космический аппарат	UT	$[X_{GSE}, Y_{GSE}, Z_{GSE}], R_E$	$[n_x, n_y, n_z]$
14 января 2007 г.			
STEREO AHEAD	19:37	[256.29, -108.06, -43.08]	[-0.95, 0.27, 0.16]
STEREO BEHIND	20:01	[105.52, -8.35, -17.47]	[-0.97, -0.22, 0.05]
ACE	19:36	[218.02, -13.04, 22.29]	[-0.99, -0.11, -0.07]
«Wind»	19:32	[250.10, -53.21, 18.40]	[-0.87, -0.40, 0.28]
12 февраля 2007 г.			
STEREO AHEAD	11:36	[ 420.32, -260.37, -45.95]	[0.82, 0.32, 0.47]
STEREO BEHIND	14:01	[-193.53, 36.02, 33.66 ]	[0.95, 0.09, -0.29]
ACE	12:01	[221.30, 26.28, 6.98]	[0.90, 0.40, 0.12]
«Wind»	12:13	[218.52 -99.06 0.12]	[0.95, 0.17, -0.25]
7 мая 2007 г.			
STEREO AHEAD	8:10	[1214.43, -1878.63, 14.60]	[0.86, -0.25, 0.44]
STEREO BEHIND	9:46	[-912.70, 942.03, -117.03]	[0.48, 0.85, 0.23]
«Wind»	7:03	[220.80, 98.88, 4.65]	[0.64, 0.67, -0.37]
ACE	7:25	[245.04, -23.12, -15.04]	[0.78, 0.59, 0.18]
7 мая 2007 г.			
STEREO AHEAD	11:47	[1216.03, -1883.31, 14.73]	[0.71, -0.48, 0.50]
STEREO BEHIND	13:15	[-924.54, 971.35, -118.05]	[0.79, 0.56, -0.23]
«Wind»	10:29	[220.74, 98.80, 4.76]	[0.87, 0.50, -0.05]
ACE	10:55	[244.95, -24.46, -14.29]	[0.88, 0.46, -0.12]
19 ноября 2007 г.			
STEREO AHEAD	22:00	[1951.32, -7883.88, -33.14]	[0.96, -0.03, -0.28]
STEREO BEHIND	13:47	[342.01, 8488.87, 107.97]	[0.94, 0.30, 0.18]
ACE	17:17	[233.26, -36.79, -5.04]	[-0.95, 0.21, 0.23]
«Wind»	17:23	[235.46, 86.66, 15.50]	[-0.92, 0.24, 0.30]

ших расстояниях фронт изменяется сильнее, что хорошо заметно на рис. 4, *в* и *г*; здесь относительно близко расположенные ACE и «Wind» показывают практически коллинеарные нормали, тогда как нормали определенные на основе измерений STEREO, имеют большее отклонение. Приход фронта ударной волны 7 мая 2007 г. вначале был зарегистрирован на космических аппаратах «Wind» и ACE, и только потом на STEREO A, который находился на меньшем гелиоцентрическом расстоянии, что подтверждает вывод о малой степени корреляции процессов в солнечном ветре на азимутальных расстояниях более тысячи  $R_E$ .

Ударная волна 19 ноября 2007 г. вначале была зарегистрирована STEREO B, после того — околоземными космическими аппаратами (ACE, «Wind»), и, наконец, STEREO A. 19 ноября расстояние между аппаратами STEREO составляло уже практически 20 тысяч радиусов Земли, поэтому можно говорить о распространении ударных волн на гелиосферных масштабах. Вследствие этого ударные волны будут двигаться не только преимущественно радиально от Солнца, но и иметь определенную тангенциальную составляющую, направленную вдоль вектора орбитальной скорости Земли [3]. Однако в целом нормали, определенные по космическим аппа-

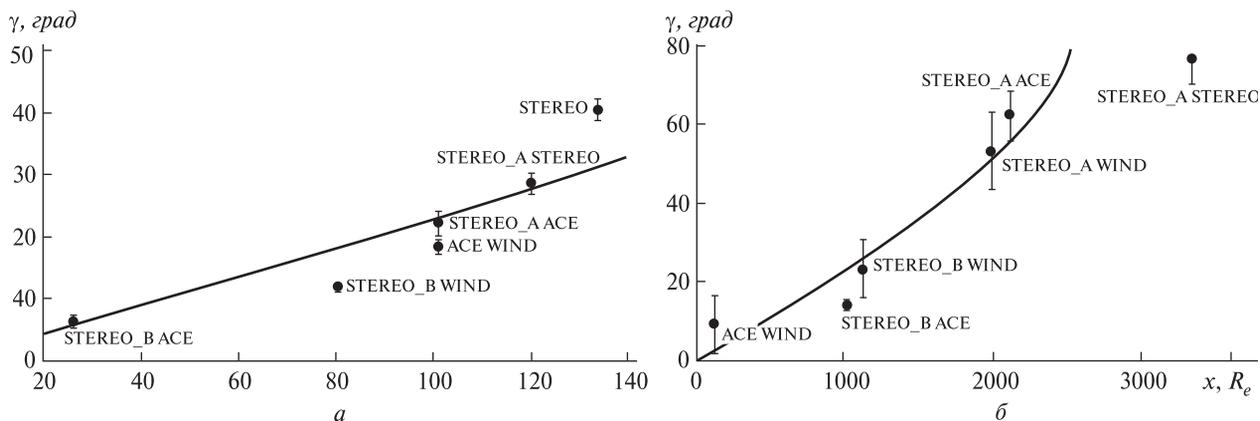


Рис. 5. Зависимость угла  $\gamma$  между нормальными к фронтам гидродинамических разрывов 12 февраля (а) и 7 мая (б) 2007 г.

ратам, расположенным на расстоянии до нескольких сотен радиусов Земли, не показывают значительного разброса, что может свидетельствовать о том, что найденные события являются скоррелированными на этих масштабах.

Зависимость угла между векторами нормалей к фронту от расстояния между парами космических аппаратов, по измерениям которых они были оценены, представлены на рис. 5. Изменение угла между нормальными при увеличении расстояния между аппаратами хорошо описывается арксинусом при условии, что фронт гидродинамического разрыва аппроксимируется окружностью. Рис. 5, а иллюстрирует ударную волну на малых масштабах, когда вся группировка космических аппаратов находилась на взаимном расстоянии порядка сотен радиусов Земли. Поскольку аппроксимация арксинусом очень хорошо описывает наше событие, то форму фронта можно считать круглым на данных пространственных масштабах. На малых масштабах, порядка сотен радиусов Земли, радиус кривизны анализируемых гидродинамических разрывов в солнечном ветре при увеличении расстояния между точками наблюдения изменяется незначительно. Картина распределения нормалей события 12 февраля подобна событию 14 января, только имеет большую дисперсию. Возможно, это связано с тем, что тангенциальные разрывы не очень сильные события с энергетической точки зрения, и подвержены более сильному влиянию

межпланетной среды, что и увеличивает степень «несферичности» их фронта.

С увеличением взаимного расстояния между космическими аппаратами мы наблюдаем иную картину. Рис. 5, б (событие 7 мая) хорошо показывает переходный этап, когда на расстояниях порядка  $3000R_E$  (пара STEREO A – STEREO B) фронт уже нельзя описывать окружностью – приближение арксинуса уже не работает. Хотя из нашей аппроксимирующей зависимости выпадает и пара ближайших аппаратов («Wind» – ACE), но угол между ними на таком расстоянии фактически не может быть определен по имеющимся в наличии измерениям, и находится ниже уровня шумов для данного события.

Событие 19 ноября вообще нельзя описать арксинусом, что свидетельствует о том, что аппроксимация фронта цилиндрической поверхностью на данных взаимных расстояниях (порядка десятков тысяч радиусов Земли) недопустима. По-видимому, на таких пространственных масштабах фронт ударных волн имеет сложную форму и не может быть аппроксимирован окружностью.

Для гидродинамического разрыва в солнечном ветре 14 января радиус кривизны фронта составил  $(208 \pm 12)R_E$ , тогда как для ударной волны 7 мая  $(1900 \pm 300)R_E$ . Другие события показали подобные значения, за исключением события 19 ноября, поскольку расстояние между парами космических аппаратов составляло десятки ты-

сяч радиусов Земли, что превышает характерные радиусы кривизны фронтов, определенные по предыдущим событиям и по паре близких аппаратов («Wind» — ACE). Можно сделать вывод, что ударные волны в межпланетной среде могут иметь характерные размеры порядка десятков тысяч радиусов Земли (около 1 а. е., что легко подтверждается как прямыми наблюдениями межпланетных корональных выбросов, так и тем фактом, что их непосредственно регистрируют космические аппараты STEREO в межпланетной среде на данном расстоянии), но при этом ее фронт имеет искривленную форму с характерным радиусом кривизны сотни радиусов Земли. Существует ранжирование пространственных масштабов в геометрии фронтов ударных волн, причем процессы на меньших масштабах уже хорошо скоррелированы между собой, поскольку могут быть хорошо аппроксимированы окружностью.

Полученные нами результаты хорошо согласуются с оценками радиуса кривизны фронта ударной волны, базирующимися на измерениях близких расположенных космических аппаратов [7].

Таким образом, на масштабах порядка размеров магнитосферы Земли фронт межпланетного гидродинамического разрыва можно считать плоским. Эти результаты могут использоваться как входные параметры для моделирования взаимодействия ударных волн с магнитосферой Земли.

## ВЫВОДЫ

В работе на разных пространственных масштабах был проведен анализ параметров солнечного ветра, полученных в результате измерений на борту четырех космических аппаратов STEREO A, STEREO B, ACE и «Wind» в 2007 г. Показано, что фронты границ неоднородностей параметров солнечного ветра на орбите Земли в плоскости эклиптики могут быть аппроксимированы окружностями в диапазоне масштабов от десятков до единиц тысяч радиусов Земли. При этом для радиусов кривизны поверхности рассмотренных границ получены оценки в диапазоне от 200 до 2000  $R_E$  для различных событий. Таким образом, для динамических процессов на магнитопау-

зе Земли и в магнитосфере фронт межпланетных ударных волн и тангенциальных разрывов можно считать плоским. Показано, что анализ геометрических параметров границ неоднородностей солнечного ветра на основе измерений космических аппаратов (таких как ACE, «Wind» и «Geotail») дает статистически достоверные и несмещенные оценки на относительно малых гелиосферных масштабах (50—200)  $R_E$ . Оценка радиуса кривизны фронта устойчива на расстояниях между аппаратами до 1000  $R_E$ .

На расстояниях менее (20—30)  $R_E$  необходимо учитывать случайные флуктуации поверхности. Несферичность фронта гидродинамического разрыва, проявляющаяся на масштабах более 2000  $R_E$ , связана с макроскопическими неоднородностями солнечного ветра (активные области на Солнце, секторная структура).

Авторы благодарны командам космических миссий STEREO, ACE и «Wind» за возможность работы с измерениями межпланетного магнитного поля, скорости и концентрации плазмы солнечного ветра.

1. *Andreeva K., Prech L.* Propagation of interplanetary shocks into the Earth's magnetosphere // *Adv. Space Res.* — 2007. — **40**, N 12. — P. 1871—1880.
2. *Andreeva K., Pulkkinen T. I., Laitinen T. V., Prech L.* Shock propagation in the magnetosphere: Observations and MHD simulations compared // *J. Geophys. Res.* — 2008. — **113A**, N 9. — doi:10.1029/2008JA013350.
3. *Burlaga L. F.* Interplanetary streams and their interaction with the Earth // *Space Sci. Revs.* — 1975. — **17**. — P. 327—352.
4. *Cid C., Hidalgo M. A., Nieves-Chinchilla T., et al.* Plasma and magnetic field inside magnetic clouds: A global study // *Solar Phys.* — 2002. — **207**, N 1. — P. 187—198.
5. *Gold R. E., Krimigis S. M., Hawkins S. E., et al.* Electron, proton, and alpha monitor on the advanced composition Explorer spacecraft // *Space Sci. Revs.* — 1998. — **86**, N 1/4. — P. 541—562.
6. *Khrabrov A. V., Sonnerup B. U. Ö.* Error estimates for minimum variance analysis // *J. Geophys. Res.* — 1998. — **103A**, N 4. — P. 6641—6652.
7. *Lepping R. P., McClearnan Wu C. C.* Two-dimensional curvature of large angle interplanetary MHD discontinuity surfaces: IMP-8 and WIND observations // *J. Geophys. Res.* — 2003. — **108A**, N 7. — P. 1279—1292.
8. *Lin R. P., Anderson K. A., Ashford S., et al.* A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the Wind

- spacecraft // Space Sci. Revs. — 1995. — **71**, N 1/4. — P. 125—153.
9. *Luhmann J. G., Curtis D. W., Schroeder P., et al.* STEREO IMPACT investigation goals, measurements, and data products overview // Space Sci. Revs. — 2008. — **136**, N 1/4. — P. 117—184.
  10. *McKenna-Lawlor S. M. P., Dryer M., Smith Z., et al.* Arrival times of Flare/Halo CME associated shocks at the Earth: comparison of the predictions of three numerical models with these observations // Ann. Geophys. — 2002. — **20**, N 7. — P. 917—935.
  11. *Mulligan T., Russell C. T.* Multispacecraft modeling of the flux rope structure of interplanetary coronal mass ejections: Cylindrically symmetric versus nonsymmetric topologies // J. Geophys. Res. — 2001. — **106A**, N 6. — P. 10581—10596.
  12. *Prech L., Nemecek Z., Safrankova J.* Response of magnetospheric boundaries to the interplanetary shock: Themis contribution // J. Geophys. Res. — 2008. — **35**, N 17. — CiteID L17S02.
  13. *Russell C. T., Gosling J. T., Zwickl R. D., Smith E. J.* Multiple spacecraft observations of interplanetary shocks: ISEE three-dimensional plasma measurements // J. Geophys. Res. — 1983. — **88**. — P. 9941—9947.
  14. *Shastun V. V., Agapitov O.* Propagation of the fast MHD wave // Earth Magnetosphere Generated by Sudden Impulses in the Solar Wind: Proc. of the 17<sup>th</sup> Annual Conference of Doctoral Students — WDS 2008/ f-2, P. 133—137.
  15. *Smith C. W., L'Heureux J., Ness N. F., et al.* The ACE magnetic field experiment // Space Sci. Revs. — 1998. — **86**, N 1/4. — P. 613—632.
  16. *Sonnerup B. U. O., Cahill L. J.* Magnetopause structure and attitude from Explorer 12 observations // J. Geophys. Res. — 1967. — **72**. — P. 171—186.

Надійшла до редакції 01.10.09

V. N. Reshetnyk, A. V. Agapitov

#### GEOMETRIC PROPERTIES OF SOLAR WIND DISCONTINUITIES ON THE EARTH'S ORBIT

We analysed the solar wind discontinuity geometry near the Earth's orbit on the basis of measurements from the Wind, ACE, STEREO A, and STEREO B spacecrafts during 2007. A case study of discontinuity events based on the STEREO A, STEREO B, ACE and Wind measurements is presented. The dependence of the normal direction obtained by different spacecrafts on the cross spacecraft distance was analysed. It is found that the estimated curvature radii of discontinuity front is independent on spatial scale in the range of STEREO A and STEREO B observations. The curvature radii of processed events are found to be of the order of a thousand of  $R_E$ .