

ВАРИАЦИИ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА В РАЗЛИЧНОГО ТИПА ТЕЧЕНИЯХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

VARIATIONS OF FLOW DIRECTION IN SOLAR WIND STREAMS OF DIFFERENT TYPES

А.В. Москалева*Институт космических исследований ИКИ РАН,
Москва, Россия, mosanas6@yandex.ru***М.О. Рязанцева***Институт космических исследований ИКИ РАН,
Москва, Россия, oream@gmail.com***Ю.И. Ермолаев***Институт космических исследований ИКИ РАН,
Москва, Россия, yermol@iki.rssi.ru***И.Г. Лодкина***Институт космических исследований ИКИ РАН,
Москва, Россия, irina-priem@mail.ru***A.V. Moskaleva***Space Research Institute IKI RAS,
Moscow, Russia, mosanas6@yandex.ru***M.O. Riazantseva***Space Research Institute IKI RAS,
Moscow, Russia, oream@gmail.com***Yu.I. Yermolaev***Space Research Institute IKI RAS,
Moscow, Russia, yermol@iki.rssi.ru***I.G. Lodkina***Space Research Institute IKI RAS,
Moscow, Russia, irina-priem@mail.ru*

Аннотация. Исследование направления потока солнечного ветра (СВ) является актуальным для прогноза космической погоды. Ранее неоднократно было показано, что невозмущенный СВ распространяется, как правило, радиально, тогда как значительные изменения направления могут наблюдаться в областях взаимодействия потоков с различными скоростями, например, в областях сжатия плазмы Sheath и CIR (Corotating Interaction Region), предшествующих межпланетным проявлениям корональных выбросов массы (Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME) и высокоскоростным потокам из корональных дыр соответственно. В данной работе анализируются статистические распределения величин долготного (φ) и широтного (θ) углов направления потока в различного типа крупномасштабных течениях СВ, а также их вариаций на временных масштабах 30 и 3600 с по измерениям на космическом аппарате WIND. Рассмотрены также зависимости величины и флуктуаций углов направления от значений параметров плазмы СВ и межпланетного магнитного поля без учета типа СВ.

Выявлено, что для возмущенных типов течения Sheath, CIR и Rare наблюдаются максимальные значения модуля долготного и широтного углов и их вариаций, при этом вероятность наблюдения больших ($>5^\circ$) отклонений от радиального направления также значительно возрастает. Показано, что при уменьшении масштаба флуктуаций зависимость от типа СВ ослабевает. Определено также, что максимум распределения по долготному углу φ смещен в сторону отрицательных значений и вероятность появления больших значений выборочных стандартных отклонений $SD(\theta)$ и $SD(\varphi)$ возрастает при превышении температурой протонов T_p значений в интервале 5–10 эВ и скоростью протонов V_p значений в интервале 400–500 км/с.

Ключевые слова: солнечный ветер, углы направления потока, типы солнечного ветра.

Abstract. Studying the direction of the solar wind flow is a topical problem of space weather forecasting. As a rule, the quiet and uniform solar wind propagates radially, but significant changes in the solar wind flow direction can be observed, for example, in compression regions before the interplanetary coronal mass ejections (Sheath) and Corotating Interaction Regions (CIR) that precede high-speed streams from coronal holes. In this study, we perform a statistical analysis of the longitude (φ) and latitude (θ) flow direction angles and their variations on different time scales (30 s and 3600 s) in solar wind large-scale streams of different types, using WIND spacecraft data. We also examine the relationships of the value and standard deviations SD of the flow direction angles with various solar wind parameters, regardless of the solar wind type.

We have established that maximum values of longitude and latitude angle modulus, as well as their variations, are observed for Sheath, CIR, and Rare, with the probability of large deviations from the radial direction ($>5^\circ$) increasing. The dependence on the solar wind type is shown to decrease with scale. We have also found that the probability of large values of $SD(\theta)$ and $SD(\varphi)$ increases with increasing proton temperature (T_p) in the range 5–10 eV and with increasing proton velocity (V_p) in the range 400–500 km/s.

Keywords: solar wind, flow direction angles, types of solar wind.

ВВЕДЕНИЕ

Невозмущенный поток солнечного ветра (СВ) на расстоянии 1 а.е. направлен преимущественно радиально. При распространении в СВ возмущенных структур солнечной короны происходит взаимодействие потоков, которое приводит к отклонению потока ионов СВ от радиального направления. Подобная ситуация наблюдается, например, в областях сжатия плазмы CIR (Corotating Interaction Region) на границах быстрых потоков из корональных дыр и медленных потоков из корональных стримеров [Gosling, Pizzo, 1999]. Авторы [Gosling, Pizzo, 1999] показали, что вектор скорости СВ отклоняется от западного (отрицательный угол долготы φ) к восточному (положительный угол φ) направлению и такое поведение угла φ объясняется вращением Солнца и пространственным распределением областей солнечной короны, эмитирующих потоки СВ с разными скоростями.

В работах [Yermolaev et al., 2015, 2018a] проводилось исследование поведения долготного φ и широтного θ углов вектора скорости в различного типа крупномасштабных потоках СВ на основе часовых измерений из базы данных OMNI. Было подтверждено, что в потоках типа CIR φ в среднем растет от -2° до $+2^\circ$. Кроме того, было показано, что аналогичным образом долготный угол может изменяться и в областях сжатия типа Sheath перед обоими видами межпланетных проявлений корональных выбросов массы (Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME) — Ejecta или магнитными облаками (Magnetic Cloud, MC), при этом внутри Ejecta и MC угол φ меняется в противоположную сторону: от $+2^\circ$ до -2° .

Было показано также, что среднее изменение широтного угла θ почти постоянно и составляет около одного градуса для всех типов СВ. При этом количество событий, где наблюдается тенденция увеличения или уменьшения θ , не превышает 15 % [Yermolaev et al., 2018a]. Если подобное изменение имеет место в CIR и Sheath, то угол θ меняется аналогично углу φ : абсолютное значение угла увеличивается, достигает максимума, уменьшается и меняет знак на противоположный тому, который был в начале интервала.

Вышеописанные сильные изменения направления вектора потока при столкновении крупномасштабных течений СВ происходят на временных масштабах ≥ 1 ч ($\geq 10^6$ км). Значительные изменения направления потока могут также происходить в плазме СВ на границах потоковых трубок, имеющих масштабы $\sim (4-5) \cdot 10^5$ км [Borovsky, 2008].

Подобные процессы могут быть описаны в рамках МГД-приближения. В то же время на пространственных масштабах 10^3-10^5 км возможны кратковременные и значительные отклонения вектора потока за счет локальных процессов в плазме СВ. Например, в работе [Застенкер и др., 2015] было показано, что большую часть времени наблюдений быстрые вариации полярного угла находятся в пределах $0.2^\circ-0.5^\circ$, однако иногда (в среднем несколько раз в сутки) встречаются быстрые скачки полярного

угла на $5^\circ-10^\circ$ и более. Подобные скачки неравномерно распределены во времени и могут быть связаны со «струйным» характером течения СВ.

Изучение направления вектора потока и его вариаций является актуальной задачей для более точного понимания процессов формирования СВ и его динамики. Отклонение вектора потока от радиального направления может быть также использовано в целях прогнозирования космической погоды, поскольку позволяет выделить области взаимодействия потоков CIR и Sheath, обладающих высокой геоэффективностью [Yermolaev et al., 2018b].

В данной работе представлен статистический анализ углов направления вектора потока СВ и их вариаций для различных крупномасштабных типов СВ по данным космического аппарата WIND. Рассмотрены интервалы усреднения 30 и 3600 с. Большая часть предшествующих работ (например, [Yermolaev et al., 2015, 2018a; Gosling, Pizzo, 1999; Borovsky, 2008]) описывала крупномасштабные или среднемасштабные вариации углов направления потока, а работы, рассматривающие мелкомасштабные вариации (например, [Застенкер и др., 2015]), были проведены на ограниченном статистическом материале. Таким образом, в данной работе впервые проводится систематический статистический анализ вариаций углов потока на масштабах $\sim 10^3-10^5$ км по многолетним измерениям. В работе анализируются также зависимости величин и стандартных отклонений углов направления потока от различных параметров СВ независимо от его типа.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Исследования величины и вариаций углов направления потока в данной работе проводились на основе измерений параметров СВ на космическом аппарате WIND за период 1995–2019 гг., представленных в базе данных [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov]. Были использованы данные по скорости, температуре и плотности протонов СВ из набора измерений PM прибора 3DP [Lin et al., 1995], а также данные по модулю и компонентам межпланетного магнитного поля (ММП) из набора измерений H0 прибора MFI [Lepping et al., 1995]. Временное разрешение анализируемых параметров составило ~ 3 с.

Все используемые данные представлены в системе координат GSE (геоцентрическая солнечно-эклиптическая система координат): ось X направлена от Земли на Солнце, Y расположена в плоскости эклиптики и направлена противоположно вращению планет, Z — нормаль к плоскости эклиптики и дополняет правую тройку (направление на север). В используемых наборах данных не были отдельно представлены углы направления потока, и их величины вычислялись из компонент скорости протонов по следующим формулам:

$$V_x = -V \cos(\theta) \cos(\varphi); V_y = V \cos(\theta) \sin(\varphi); V_z = V \sin(\theta),$$

где V_x , V_y , V_z — компоненты скорости протонов СВ; V — модуль скорости протонов СВ; θ — широтный и φ — долготный углы.

Для рассмотрения вариаций углов на различных масштабах использовалось разбиение временных рядов на интервалы длительностями 30 и 3600 с. Длительности интервалов выбирались таким образом, чтобы охватить широкий диапазон масштабов вариаций. При этом в работе не ставилась цель исследования крупномасштабных вариаций, многократно описанных в работах предшественников (см. «Введение»), что определило выбор максимальной длительности интервала. Минимальная длительность интервала определялась репрезентативностью выборки с учетом временного разрешения используемых данных. Каждый последующий интервал перекрывал предыдущий на половину длины, и в случае если какое-либо резкое изменение величины углов на границе потоков приходилось на стык интервалов и не попадало в статистику, то при рассмотрении следующего интервала это резкое изменение оказывалось в его центре и могло быть надежно учтено. Для каждого интервала данных были вычислены усредненные значения долготного и широтного углов и средние значения остальных параметров СВ и ММП. Для анализа вариаций углов направления потока на каждом интервале вычислялись величины их выборочного стандартного отклонения SD . Кроме того, осуществлялась привязка каждого интервала к определенному типу СВ по каталогу крупномасштабных явлений СВ [Ермолаев и др., 2009; <http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog>]. В рассмотренной выборке были выделены следующие типы СВ:

1. Ejecta — межпланетные проявления корональных выбросов массы (КВМ). Длительность в среднем составляет около 30 ч.

2. MC (Magnetic Cloud) — магнитные облака, которые, так же как и Ejecta, порождаются КВМ, но, в отличие от Ejecta, имеют более высокое и более регулярное (вращающееся в большинстве случаев) ММП. В среднем MC длится 28 ч.

3. CIR (Corotating Interaction Region) — области сжатия перед набегающим быстрым течением из корональных дыр. Длительность течения СВ данного типа составляет в среднем 20 ч.

4. Sheath — области сжатия перед быстрыми Ejecta /MC. Продолжительность по времени СВ типа Sheath в среднем составляет 16 ч. CIR и Sheath схожи по параметрам и различаются только видом поршня, сжимающего плазму.

5. Rare — разреженный ветер, плазма между быстрым потоком СВ, который удаляется от медленного. Длительность разреженной области составляет в среднем 10–20 ч.

6. HCS (Heliospheric Current Sheet) — гелиосферный токовый слой. Данный тип связан с секторной структурой СВ. Наблюдаемая продолжительность HCS составляет примерно 5 ч.

7. Fast — быстрый квазистационарный СВ, связанный с корональными дырами.

8. Slow — медленный квазистационарный СВ, связанный с корональными стримерами.

В каталоге крупномасштабных явлений СВ [Ермолаев и др., 2009] подробно описаны критерии и методы идентификации типов течения СВ.

В табл. 1 показано количество интервалов, полученных для каждого типа крупномасштабного течения СВ, для интервале усреднения 30 с в процентном соотношении ко всем рассмотренным интервалам. Можно увидеть, что тип Rare является самым редким из рассматриваемых типов течения СВ. Следует отметить, что длительность рассмотренных в работе интервалов значительно меньше средней продолжительности наблюдения приведенных выше типов крупномасштабного течения СВ и во всех интервалах наблюдается только один тип СВ. Интервалы, в которых наблюдались два и более типа течения СВ одновременно, были исключены при отборе.

Космический аппарат WIND располагается в точке либрации L1, находящейся ~1.5 млн км от Земли, поэтому для привязки к каталогу крупномасштабных явлений СВ учитывалось время распространения СВ до орбиты Земли.

Для интервалов усреднения 30 и 3600 с проводился статистический анализ абсолютных величин долготного и широтного углов направления потока, а также их вариаций. Кроме того, были исследованы зависимости величины и стандартных отклонений углов направления потока от различных параметров СВ и ММП.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Статистический анализ величин и вариаций углов направления потока СВ

Ниже представлены результаты статистического анализа абсолютных значений долготного и широтного углов (соответственно $|\phi|$ и $|\theta|$) и их стандартных отклонений для различных крупномасштабных типов течения СВ. Проводится также сравнение результатов, полученных для быстрых, на интервалах длительностью 30 с, и медленных, на интервалах длительностью 3600 с, вариаций.

На рис. 1 показаны распределения средних величин широтного угла $|\theta|$ и долготного угла $|\phi|$, вычисленных на 30-секундных интервалах. На рис. 1, а и в представлены распределения для интервалов, отобранных для HCS, MC, Ejecta и Slow, а на рис. 1, б и г — для Slow, Fast, Rare, Sheath, CIR. Положения максимумов распределений одинаковы для всех типов СВ, за исключением распределения долготного угла для MC, однако ширина распределений и средние значения явным образом зависят от типа крупномасштабного течения. Средние абсолютные значения углов и положения максимумов их распределений приведены в табл. 4. Для CIR, Sheath, MC и Rare распределения шире, чем для HCS, Slow, Fast, Ejecta. Аналогичные гистограммы абсолютных величин углов были построены также для интервалов длительностью 3600 с, но они не показали значимых отличий от гистограмм для 30-секундных интервалов.

Следует отметить, что на гистограммах на рис. 1 наблюдается заметное число интервалов с широтными и долготными углами, превышающими по модулю 5° . В табл. 2 приведены вероятности наблюдений абсолютных значений углов $>5^\circ$ для разных типов СВ. Для типов CIR, Sheath, MC и Rare отклонения $>5^\circ$ наблюдаются чаще, чем для остальных типов

Таблица 1

Количество интервалов, полученных для каждого типа крупномасштабного течения СВ при интервале усреднения 30 с, в процентном соотношении ко всем рассмотренным интервалам

HCS	MC	Ejecta	Slow	Fast	Rare	Sheath	CIR
6.9 %	1.6 %	10.5 %	43.8 %	26.1 %	0.6 %	3.2 %	7.3 %

Интервал 30 с

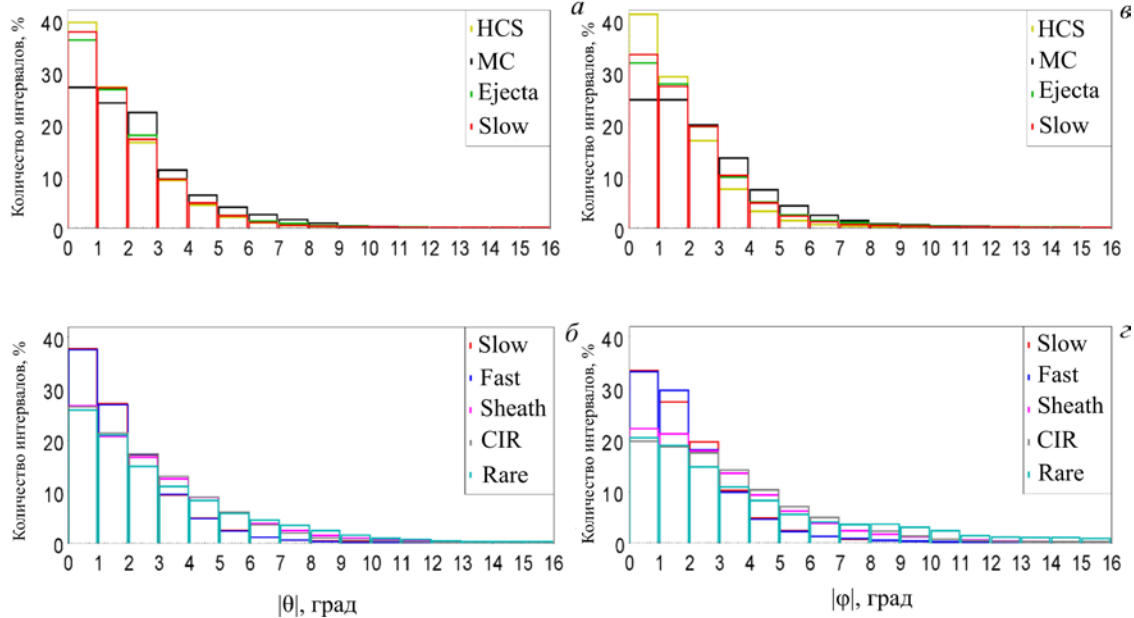


Рис. 1. Распределения средних величин широтного $|\theta|$ и долготного углов $|\varphi|$ на интервалах длиной 30 с

Таблица 2

Вероятность наблюдения абсолютных значений широтного θ и долготного φ углов $>5^\circ$ для разных типов СВ

	HCS	MC	Ejecta	Slow	Fast	Rare	Sheath	CIR
$ \theta $	4 %	9 %	5 %	4 %	4 %	20 %	15 %	13 %
$ \varphi $	2 %	11 %	6 %	5 %	5 %	27 %	16 %	20 %

течения СВ, при этом максимальное число подобных интервалов наблюдаются для типа Rare.

Для исследования уровня вариаций углов направления потока в различного типа течениях СВ были построены аналогичные распределения для стандартных отклонений широтного $SD(\theta)$ и долготного $SD(\varphi)$ углов. На рис. 2 представлены распределения стандартных отклонений обоих углов для интервалов длительностью 30 с, а на рис. 3 для интервалов длительностью 3600 с. На рис. 2, а, в и 3, а, в приведены распределения для HCS, MC, Ejecta и Slow, а на рис. 2, б, г и 3, б, г — для Slow, Fast, Rare, Sheath, CIR. Максимумы распределений для 30-секундных интервалов одинаковы для всех типов СВ, кроме Rare, а ширина распределений и средние значения явным образом зависят от типа крупномасштабного течения. Для 3600-секундных интервалов существенные различия наблюдаются в том числе для положений максимумов на распределениях. Положения максимумов и средние значения распределений SD для обоих интервалов усреднения представлены в табл. 4. Для CIR, Sheath, Fast и Rare распределения SD шире, чем для HCS, Slow, Ejecta и MC.

Следует отметить, что величина SD , характеризующая уровень вариаций широтного и долготного углов, сильно зависит от длины интервала: с уменьшением временного масштаба уменьшается и амплитуда вариаций, и вероятность появления больших значений SD . Это связано с тем, что сильные изменения углов направления происходят, как правило, сравнительно медленно — за время порядка десятков минут. Резкие и большие по величине изменения направления потока за время порядка секунд происходят сравнительно редко. Таким образом, распределения SD на длинных временных интервалах (3600 с) отражают в основном вариации, связанные со средне-масштабными изменениями направления потока СВ, например, между потоковыми трубками [Bogovsky, 2008; 2018], тогда как распределения SD на коротких интервалах (30 с) отражают уровень локальных флуктуаций направления потока, связанных с мелко-масштабной структурой течения СВ.

На гистограммах стандартных отклонений углов для медленных вариаций на масштабе 3600 с наблюдается заметное число интервалов со стандартными отклонениями широтного и долготного углов, превы-

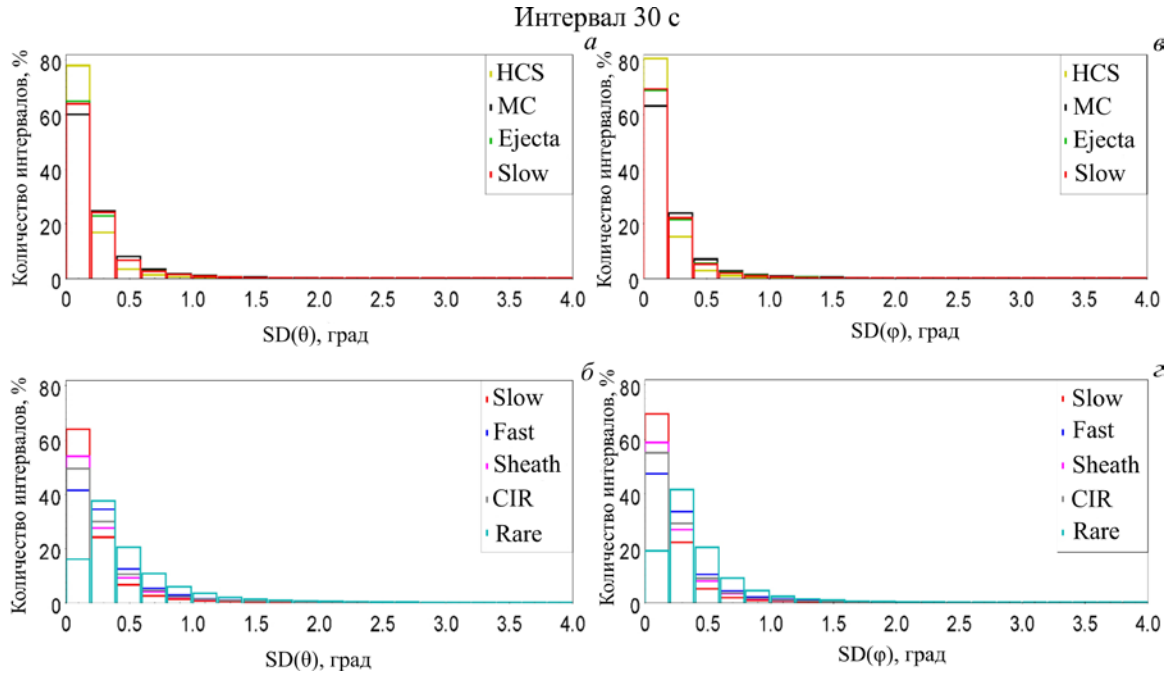


Рис. 2. Распределения стандартных отклонений широтного SD(θ) и долготного SD(ϕ) углов на интервалах длиной 30 с

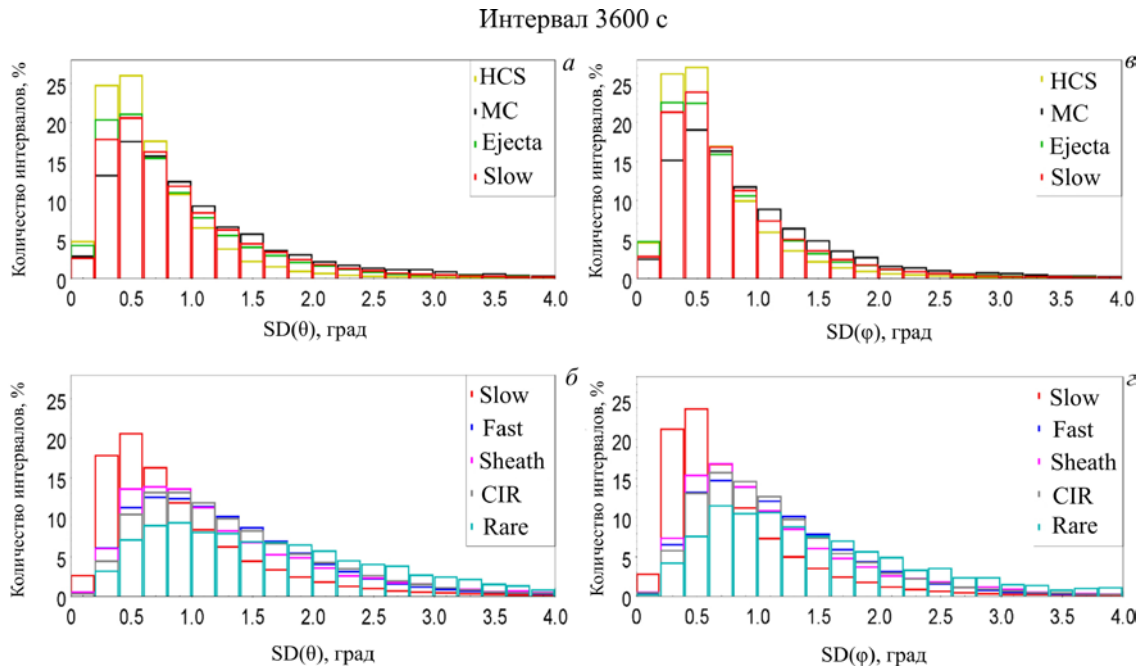


Рис. 3. Распределения стандартных отклонений широтного SD(θ) и долготного SD(ϕ) углов на интервалах длиной 3600 с

шающими 2° . В табл. 3 приведены вероятности наблюдения вариаций $>2^\circ$ для разных типов ветра на интервалах 3600 с. Вероятность больших отклонений по обоим углам возрастает для типов CIR, Sheath, Fast, MC и Rare, заметно превышая аналогичную вероятность для других типов течения СВ.

Сводная характеристика для всех ранее представленных распределений приведена в табл. 4, в ней указаны средние значения ($\langle|\theta|\rangle$, $\langle|\phi|\rangle$, $\langle SD(\theta) \rangle_{30\text{ с}}$, $\langle SD(\phi) \rangle_{30\text{ с}}$, $\langle SD(\theta) \rangle_{3600\text{ с}}$, $\langle SD(\phi) \rangle_{3600\text{ с}}$) и максимумы ($\max(|\theta|)$, $\max(|\phi|)$, $\max(SD(\theta))_{30\text{ с}}$, $\max(SD(\phi))_{30\text{ с}}$, $\max(SD(\theta))_{3600\text{ с}}$, $\max(SD(\phi))_{3600\text{ с}}$) абсолютных значений углов и стандартных отклоне-

ний (для обоих интервалов усреднения) для всех типов течения СВ.

2.2. Исследование зависимостей углов направления потока и их вариаций от параметров СВ

Кроме статистического анализа величин и вариаций углов направления потока для различных временных масштабов мы провели исследование зависимости значений углов и их стандартных отклонений от величин различных параметров плазмы СВ и ММП. Заметим, что в данном разделе рассматривается вся

Таблица 3

Вероятность наблюдения значений вариаций широтного SD(θ) и долготного SD(φ) углов $>2^\circ$ для разных типов СВ (интервал 3600 с)

	HCS	MC	Ejecta	Slow	Fast	Rare	Sheath	CIR
SD(θ)	2 %	11 %	6 %	7 %	16 %	36 %	17 %	17 %
SD(φ)	2 %	10 %	5 %	4 %	11 %	27 %	12 %	11 %

Таблица 4

Максимумы и средние значения распределений абсолютных значений долготного и широтного углов и их стандартных отклонений (для интервалов усреднения 30 и 3600 с)

	$\langle \theta \rangle, \langle \varphi \rangle$	$\langle\text{SD}(\theta)\rangle_{30\text{ с}}, \langle\text{SD}(\varphi)\rangle_{30\text{ с}}$	$\langle\text{SD}(\theta)\rangle_{3600\text{ с}}, \langle\text{SD}(\varphi)\rangle_{3600\text{ с}}$	$\max(\theta), \max(\varphi)$	$\max(\text{SD}(\theta))_{30\text{ с}}, \max(\text{SD}(\varphi))_{30\text{ с}}$	$\max(\text{SD}(\theta))_{3600\text{ с}}, \max(\text{SD}(\varphi))_{3600\text{ с}}$
HCS	1.71°, 1.59°	0.15°, 0.15°	0.66°, 0.65°	0°–1°, 0°–1°	0°–0.2°, 0°–0.2°	0.4°–0.6°, 0.4°–0.6°
MC	2.32°, 2.50°	0.24°, 0.23°	1.00°, 0.92°	0°–1°, 1°–2°	0°–0.2°, 0°–0.2°	0.4°–0.6°, 0.4°–0.6°
Ejecta	1.89°, 2.07°	0.22°, 0.20°	0.82°, 0.76°	0°–1°, 0°–1°	0°–0.2°, 0°–0.2°	0.4°–0.6°, 0.2°–0.4°
Slow	1.79°, 1.96°	0.22°, 0.20°	0.88°, 0.77°	0°–1°, 0°–1°	0°–0.2°, 0°–0.2°	0.4°–0.6°, 0.4°–0.6°
Fast	1.80°, 1.94°	0.33°, 0.29°	1.26°, 1.14°	0°–1°, 0°–1°	0°–0.2°, 0°–0.2°	0.6°–0.8°, 0.6°–0.8°
Rare	3.01°, 3.91°	0.50°, 0.44°	1.61°, 1.45°	0°–1°, 0°–1°	0.2°–0.4°, 0.2°–0.4°	0.8°–1.0°, 0.6°–0.8°
Sheath	2.70°, 2.94°	0.28°, 0.24°	1.23°, 1.11°	0°–1°, 0°–1°	0°–0.2°, 0°–0.2°	0.6°–0.8°, 0.6°–0.8°
CIR	2.59°, 3.19°	0.29°, 0.26°	1.30°, 1.14°	0°–1°, 0°–1°	0°–0.2°, 0°–0.2°	0.6°–1.0°, 0.6°–0.8°

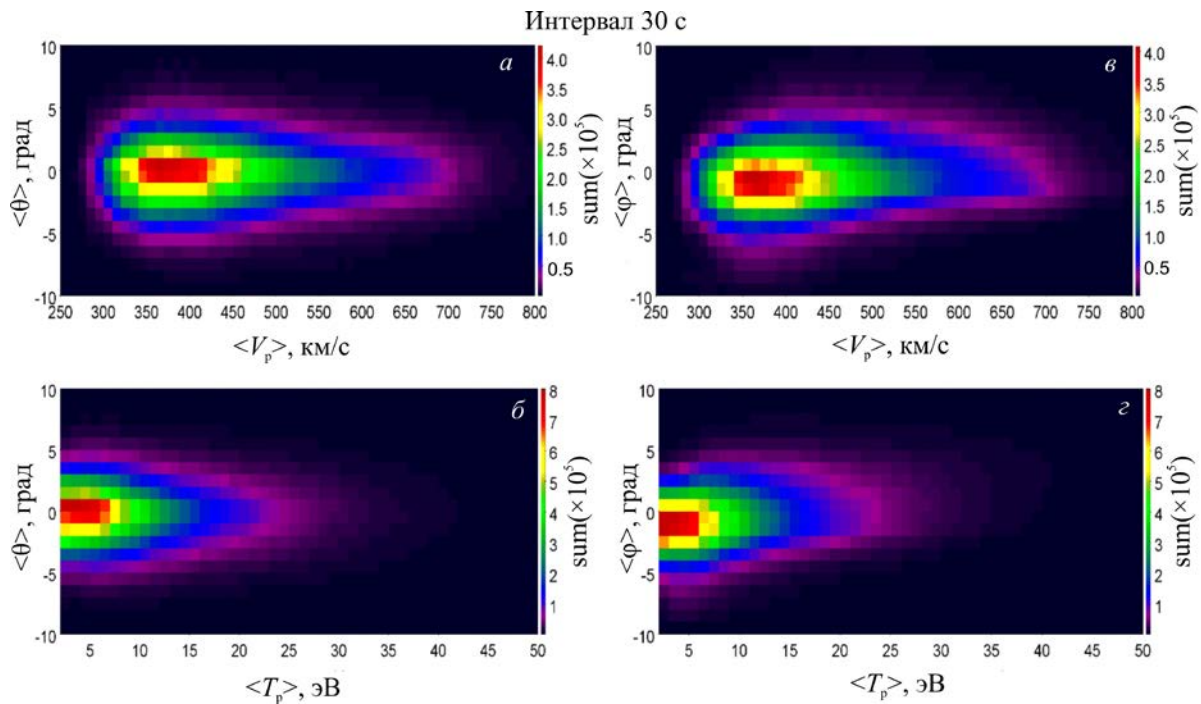


Рис. 4. Зависимости значений широтного θ и долготного φ углов от скорости V_p и температуры T_p протонов

совокупность измерений без разделения на крупномасштабные типы СВ. Ниже приведены подобные зависимости для тех параметров СВ, для которых наблюдается четкая связь величин углов и их стандартных отклонений с величиной соответствующего параметра СВ.

На рис. 4 представлены зависимости значений широтного угла θ (рис. 4, а) и долготного угла φ (рис. 4, в) от величины скорости протонов V_p . Цветом показано количество интервалов в выделенном диапазоне значений параметров. Значения скорости от 250 до 800 км/с отложены по оси X и разделены на диапазоны с шагом 10 км/с, значения углов θ и φ

от -10° до $+10^\circ$ отложены по оси Y и разделены на диапазоны с шагом 1° . На цветовой шкале справа от графика показано соответствие цвета количеству точек в каждой ячейке. Для широтного угла θ (рис. 4, а) наблюдается симметричное распределение вне зависимости от величины скорости, при этом максимум распределения немного смещен в сторону положительных значений ($\sim +1^\circ$).

Для долготного угла φ (рис. 4, в) наблюдается явная зависимость формы распределения от скорости. Для малых скоростей 250–450 км/с наблюдается симметричное распределение с максимумом, смещенным в сторону отрицательных значений ($\sim -2^\circ$).

Доля интервалов с $\varphi \geq 0^\circ$ и $\varphi < 0^\circ$ составляет 36.5 и 63.5 % соответственно. При скоростях >450 км/с распределение становится асимметричным, вероятность положительных значений φ возрастает с ростом скорости: доля интервалов с $\varphi \geq 0^\circ$ составляет 47.7 %, а с $\varphi < 0^\circ$ — 52.3 %, т. е. количество интервалов с отрицательными и положительными значениями долготного угла становится почти одинаковым, тогда как при малых скоростях заметно больше доля интервалов с отрицательными значениями долготного угла.

На рис. 4, б и г представлены аналогичные зависимости θ и φ от температуры протонов T_p . Отложенные по оси X значения T_p от 2 до 50 эВ разделены на диапазоны с шагом 1 эВ.

Необходимо отметить, что усредненные за длительные промежутки времени значения скорости V_p и температуры T_p протонов СВ демонстрируют положительную корреляцию [Lopez, 1987]. Однако соотношения скорости и температуры различаются для разных типов потоков СВ, а потому используются при их идентификации [Ермолаев и др., 2009]. Несмотря на схожесть изображений для скорости и температуры, рис. 4, б и г дает дополнительную информацию о связи широтного и долготного углов с параметрами СВ. Более подробные данные о связи углов θ и φ с межпланетными параметрами в различных типах СВ планируется представить в последующих публикациях.

Для угла θ (рис. 4, б) также наблюдается симметричное распределение вне зависимости от температуры протонов, а для угла φ (рис. 4, г) распределение носит асимметричный характер и меняется в зависимости от T_p . Для малых температур от 2 до 5 эВ распределение по углу φ смещено в сторону отрицательных значений: доли интервалов с $\varphi \geq 0^\circ$ и $\varphi < 0^\circ$ составляют 28.4 и 71.6 % соответственно. Как и в случае со скоростью, вероятность положительных значений φ возрастает с ростом T_p . В случае высоких температур (более 10 эВ) распределение по углу φ смещается в сторону положительных значений, доли интервалов с $\varphi \geq 0^\circ$ и $\varphi < 0^\circ$ приблизительно равны и составляют соответственно 51.7 и 48.3 %.

На рис. 4 приведены зависимости усредненных значений углов θ и φ от средних величин скорости и температуры, вычисленных для интервалов длительностью 30 с. Для интервалов длительностью 3600 с наблюдаются аналогичные зависимости, и потому здесь они не приведены.

На рис. 5 представлены зависимости стандартных отклонений широтного $SD(\theta)$ (рис. 5, а) и долготного $SD(\varphi)$ (рис. 5, в) углов от скорости V_p для интервалов длительностью 30 с. Цветом показано количество интервалов в выделенном диапазоне значений параметров. Значения скорости от 250 до 800 км/с отложены по оси X и разделены на диапазоны с шагом 10 км/с, значения вариаций $SD(\theta)$ и $SD(\varphi)$ от 0° до 1° отложены по оси Y и разделены на диапазоны с шагом 0.05° . На цветовой шкале справа от графика показано соответствие цвета количеству точек в каждой ячейке. Обе зависимости имеют схожий вид. Вероятность появления больших значений возрастает при повышении скорости от значе-

ний 400–500 км/с, имеется также слабая зависимость положения максимума от значения скорости в интервале 320–420 км/с.

Аналогичные зависимости $SD(\theta)$ и $SD(\varphi)$ от температуры протонов T_p представлены на рис. 5, б и г. Значения T_p от 2 до 50 эВ отложены по оси X и разделены на диапазоны с шагом 1 эВ. Как и в случае зависимостей от скорости, зависимости стандартных отклонений широтного и долготного углов от температуры протонов выглядят схожими. Вероятность появления больших значений $SD(\theta)$ и $SD(\varphi)$ возрастает при превышении T_p значений 5–10 эВ. Наблюдается слабая зависимость положения максимума от значения температуры в интервале 2–7 эВ.

Выше приведены зависимости усредненных значений стандартных отклонений углов θ и φ от средних величин скорости и температуры для интервалов длительностью 30 с. Для интервалов длительностью 3600 с наблюдаются аналогичные зависимости (здесь не приведены), но амплитуды величин $SD(\theta)$ и $SD(\varphi)$ больше в ~4 раза.

Были построены также зависимости значений широтного и долготного углов и их стандартных отклонений от плотности протонов и модуля ММП (здесь не приводятся), но не было обнаружено каких-либо особенностей, как в случае с зависимостями от скорости и температуры.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведен статистический анализ абсолютных значений долготного φ и широтного θ углов направления потока СВ и их вариаций на временных масштабах 30 и 3600 с для различного типа крупномасштабных течений СВ по данным космического аппарата WIND за период 1995–2019 гг. Кроме того, построены и проанализированы зависимости этих величин от различных параметров СВ без разделения на типы течения.

В результате анализа:

1. Подтверждено, что долготный угол $|\varphi|$, связанный с вращением Солнца, всегда больше, чем широтный угол $|\theta|$, а абсолютные значения обоих углов зависят от типа крупномасштабного течения СВ [Yermolaev et al, 2018a]. Абсолютные значения углов принимают минимальные значения для типов СВ HCS, Slow, Fast, Ejecta ($|\theta| \approx 1.7^\circ - 1.9^\circ$ и $|\varphi| \approx 1.6^\circ - 2.1^\circ$) и возрастают для типов CIR, Sheath, MC ($|\theta| \approx 2.3^\circ - 2.7^\circ$ и $|\varphi| \approx 2.5^\circ - 3.2^\circ$). Максимальные значения наблюдаются для типа Rare: $|\theta| \approx 3^\circ$ и $|\varphi| \approx 3.9^\circ$, но количество таких событий мало.

2. Выявлено, что для возмущенных типов СВ CIR, Sheath и Rare, возникающих в результате взаимодействия потоков с различными скоростями, а также для типа MC в 2–5 раз больше вероятность наблюдения больших ($>5^\circ$) отклонений от радиального направления для широтного угла и в 2–13 раз для долготного угла по сравнению с HCS, Slow, Fast и Ejecta.

3. Показано, что величины стандартных отклонений $SD(\theta)$ и $SD(\varphi)$, отражающие уровень вариаций широтного и долготного углов соответственно, имеют схожие распределения. Определено, что $SD(\theta)$ и $SD(\varphi)$ для типов СВ CIR, Sheath и Fast в среднем больше в ~1.5 раза, а для Rare в ~2.5 раз по сравнению с HCS, Slow, MC и Ejecta. Вероятность больших ($>2^\circ$) откло-

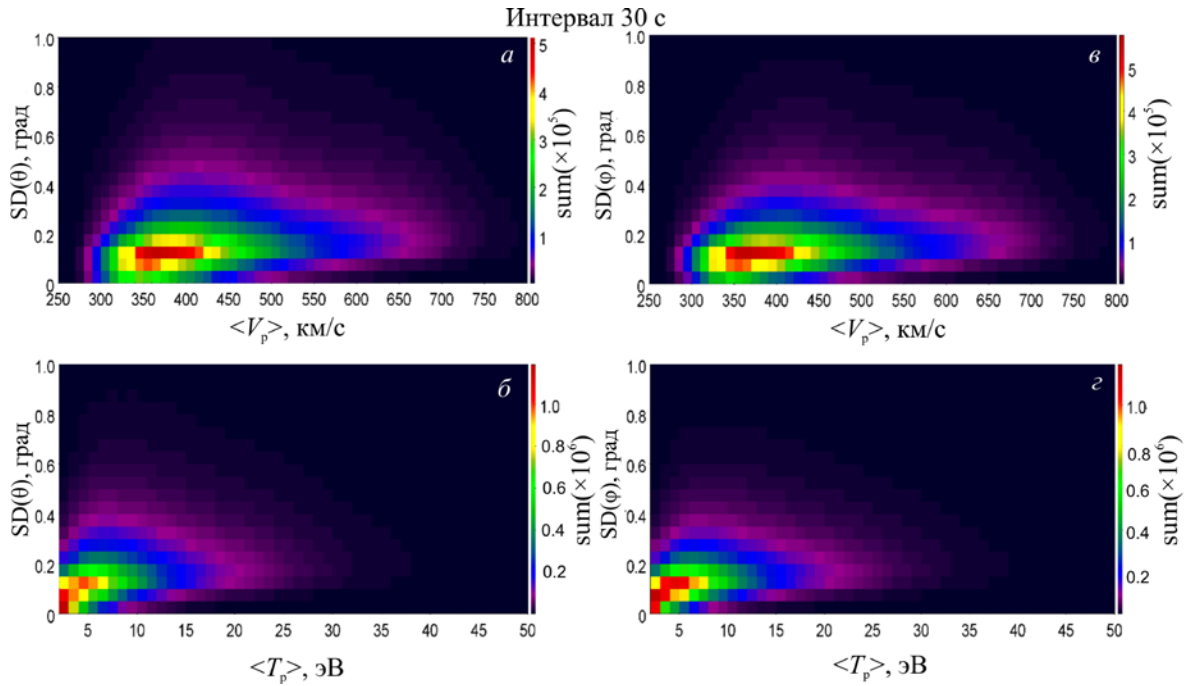


Рис. 5. Зависимости стандартных отклонений широтного $SD(\theta)$ и долготного $SD(\phi)$ углов от скорости V_p и температуры T_p

нений от радиального направления тоже значительно возрастает для типов СВ CIR, Sheath, Fast (в 2–8 раз) и Rare (в 5–18 раз). Показано, что при уменьшении рассматриваемого масштаба величины отклонений снижаются (в ~4 раза), а зависимость от типа СВ ослабевает (кроме типа Rare), таким образом, уровень локальных вариаций направления потока слабее зависит от типа крупномасштабного течения.

4. Выявлено, что тип Rare явным образом выделяется на фоне других крупномасштабных типов течения СВ. Rare имеет наибольшие средние значения углов и стандартные отклонения, всегда показывает широкие распределения и гораздо чаще других типов СВ отклоняется от радиального направления.

5. Максимум распределения по долготному углу ϕ смещен в сторону отрицательных значений $\sim -2^\circ$. При возрастании температуры T_p и скорости V_p протонов максимум распределения сдвигается к 0° , распределение становится асимметричным и вероятность $\phi \geq 0^\circ$ возрастает. Не выявлены зависимости в распределениях ϕ от модуля магнитного поля $|B|$ и плотности протонов N_p .

6. Распределение по широтному углу θ не зависит от значений параметров СВ, и его максимум смещен в сторону положительных значений $\sim 1^\circ$.

7. Максимумы распределений $SD(\theta)$ и $SD(\phi)$ составляют 0.2° – 1.0° для медленных вариаций на интервалах 3600 с и 0° – 0.4° для быстрых вариаций на интервалах 30 с. При этом распределения достаточно широкие, а вероятность появления больших значений $SD(\theta)$ и $SD(\phi)$ (на интервалах 30 с $> 0.05^\circ$) возрастает при повышении T_p от значений в интервале 5–10 эВ и V_p от значений в интервале 400–500 км/с. Имеется также слабая зависимость положения максимума от значения скорости в интер-

вале 320–420 км/с и от значения температуры в интервале 2–7 эВ.

Авторы благодарны разработчикам баз данных КА WIND [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>] и каталога крупномасштабных типов солнечного ветра [<http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog>] за возможность использования данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000. *Космические исследования*. 2009. Т. 47, № 2. С. 81–94.
- Застенкер Г.Н., Храпченков В.В., Колоскова И.В. и др. Быстрые вариации величины и направления потока ионов солнечного ветра. *Космические исследования*. 2015. Т. 53, № 1. С. 63–74. DOI: [10.1134/S0010952515010098](https://doi.org/10.1134/S0010952515010098).
- Borovsky J.E. The flux-tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU? *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. A08110. DOI: [10.1029/2007JA012684](https://doi.org/10.1029/2007JA012684).
- Borovsky J.E. The spatial structure of the oncoming solar wind at Earth and the shortcomings of a solar-wind monitor at L1. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 177. P. 2–11. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.03.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.014).
- Gosling J.T., Pizzo V.J. Formation and evolution of corotating interaction regions and their three dimensional structure. *Corotating Interaction Regions*. Dordrecht: Springer, 1999. P. 21–52. DOI: [10.1007/978-94-017-1179-1_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1179-1_3).
- Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F., et al. The WIND magnetic field investigation. *Space Sci. Rev.* 1995. Vol. 71. P. 207. DOI: [10.1007/BF00751330](https://doi.org/10.1007/BF00751330).
- Lin R.P., Anderson K.A., Ashford S., et al. A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the wind spacecraft. *Space Sci. Rev.* 1995. Vol. 71. P. 125–153. DOI: [10.1007/BF00751328](https://doi.org/10.1007/BF00751328).
- Lopez R.E. Solar cycle invariance in solar wind proton temperature relationships. *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 11189.

Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., et al. Dynamics of large-scale solar wind streams obtained by the double superposed epoch analysis. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. DOI: [10.1002/2015JA021274](https://doi.org/10.1002/2015JA021274).

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis: 3. Deflection of the velocity vector. *Solar Phys.* 2018a. Vol. 293, 91. DOI: [10.1007/s11207-018-1310-9](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1310-9).

Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., et al. Statistical study of the geoeffectiveness of compression regions CIRs and Sheaths. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018b. Vol. 180, P. 52–59. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.01.027](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.027).

URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 15 октября 2021 г.).

URL: <http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog> (дата обращения 15 октября 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Москалева А.В., Рязанцева М.О., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Вариации направления потока в различного типа течениях солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 10–18. DOI: [10.12737/szf-74202102](https://doi.org/10.12737/szf-74202102).