

УДК 523.533.9

РОЛЬ УСРЕДНЕНИЯ ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА DISCOVER ЗА ПЕРВЫЙ ГОД РАБОТЫ

© 2019 г. И. С. Веселовский^{1, 2, *}, К. Б. Капорцева^{3, **}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

³Физический факультет Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*e-mail: veselov@dec1.sinp.msu.ru

**e-mail: kb.kaportceva@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 27.09.2017 г.

После доработки 22.10.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Обсуждаются результаты статистического анализа данных о солнечном ветре вблизи орбиты Земли с космического аппарата DISCOVER за годовой период, начиная с августа 2016 г. Распределение солнечного ветра по температуре T в этот период носило бимодальный характер с двумя максимумами в районе 15 и 190 тыс. К (и со стандартным отклонением того же порядка величины, соответственно). Оно представимо в качестве суммы двух логнормальных распределений. Первый пик распределения по T дается холодной и медленной компонентой ветра, имеющей также близкие к логнормальным распределения по скорости V и плотности n (варьирующей в широких пределах). Она занимает чуть более четверти по времени. Из остального ветра можно отдельно выделить быстрый и горячий (максимум распределения при 310 тыс. К) ветер, занимавший чуть менее четверти времени. Его распределения по V , T и n также близки к логнормальным. Оставшаяся доля ветра, около половины, имеет сложное и “изрезанное” распределение по скорости и двухпиковое по плотности. Сделан вывод, что усреднение данных о солнечном ветре играет ключевую роль при попытках его количественной классификации. Об этом свидетельствуют результаты, полученные с усреднением за 1 мин, 1 ч, 1 сутки и 1 неделю.

DOI: 10.1134/S0016794019030143

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель статистических исследований параметров солнечного ветра состоит в выявлении двух главных характеристик: максимума распределения (моды) и стандартного отклонения, которое характеризует степень изменчивости параметра. Неоднократно отмечалось, что статистическое распределение солнечного ветра по плотности n и температуре T хорошо аппроксимируется логнормальным законом [Burlaga and Lazarus, 2000]. Это может быть обусловлено мультипликативным характером процессов, ответственных за формирование солнечного ветра [Веселовский и др., 2010; Dmitriev et al., 2012].

Логнормальное распределение представляет собой двухпараметрическое (параметры μ и σ) распределение с плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}.$$

Математическое ожидание $\langle x \rangle$, мода x_0 и стандартное отклонение SD при этом выражаются по формулам

$$\langle x \rangle = \exp\left\{\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right\},$$

$$x_0 = \exp\{\mu - \sigma^2\},$$

$$SD = (\exp\{\sigma^2\} - 1) \exp\{2\mu + \sigma^2\}.$$

Статистическое распределение солнечного ветра по скорости далеко не всегда похоже на логнормальное [Dmitriev et al., 2012]. Однако оно может быть близко к нему в отдельные периоды вре-

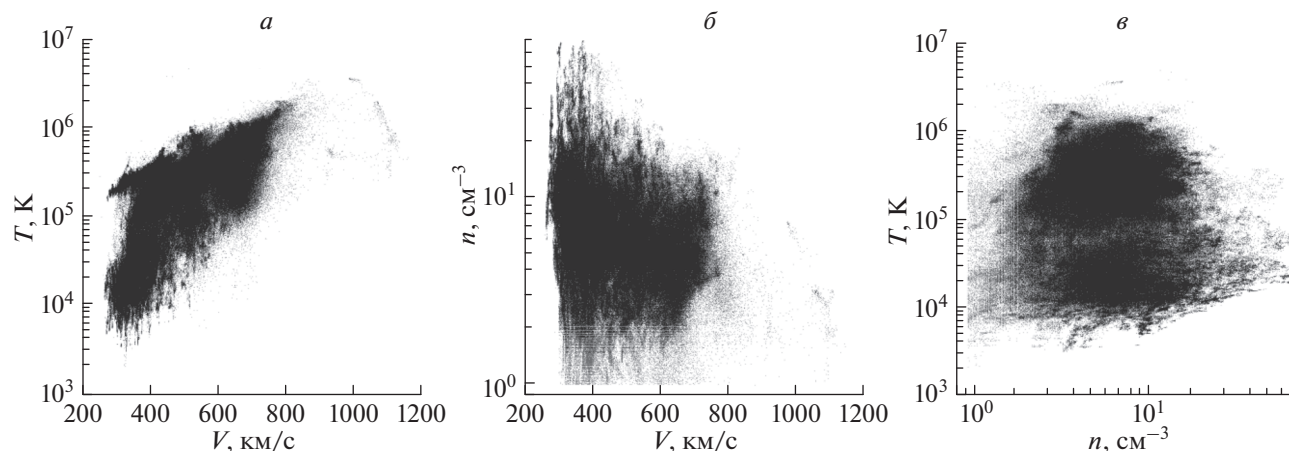


Рис. 1. Проекция множества точек, представляющих собой результаты измерений КА DSCOVR, на плоскости: (а) — (V, T) , (б) — (V, n) , (в) — (n, T) .

мени [Burlaga and Szabo, 1999; Burlaga and Lazarus, 2000].

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

С конца июля 2016 г. начали поступать данные с нового космического аппарата DSCOVR. КА DSCOVR был создан в США по заказу Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) и запущен Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) 11 февраля 2015 г. С начала июня 2015 г. КА находится на орбите Лиссажу в точке Лагранжа L1. При подготовке миссии DSCOVR были заложены требования к установленному на нем цилиндру Фарадея, согласно которым плотность n , скорость V и температура T протонной компоненты солнечного ветра должны измеряться с точностью 20%. Планировалось получение данных с частотой одно измерение в секунду. Однако из-за обнаруженных в конце 2015 г. неполадок с прибором, которые оказались в итоге трудно устранимыми [Biesecker and Johnson, 2018], частота была снижена в двадцать раз. Начиная с 27 октября 2016 г., n измеряется в диапазоне $1\text{--}100\text{ см}^{-3}$, V — в диапазоне $189\text{--}1111\text{ км/с}$, T — в диапазоне $2\text{--}2000 \times 10^3\text{ К}$.

В настоящей статье рассмотрен годовой период, начиная с августа 2016 г. по июль 2017 г. Были взяты f3s-файлы [NOAA, 2016], которые включают в себя данные по трем основным гидродинамическим параметрам: n , V и T для протонов, — с частотой три измерения в минуту (т.е., 4320 измерений в сутки).

Пропуски в данных составляли около 3% от общего времени измерений, включая двое суток 26 марта и 23 мая 2017 г. Суммарное количество измерений — точек в пространстве (n, V, T) — за

рассматриваемый период составило 1576800. Из этой общей их совокупности нами на первом этапе были отобраны 1527656 точки, для которых одновременно имелись данные по плотности, скорости и температуре.

На рисунке 1 представлены результаты измерений в проекциях на плоскости (V, T) , (V, n) и (n, T) . Данные по плотности фактически обрезаны около 1 см^{-3} , а данные по температуре — при $T = 2000\text{ К}$ (рис. 1в). Неточности в отношении низких плотностей и температур в ряде случаев не позволяют судить о минимальных значениях этих параметров. Полоса из точек с $T = 2000\text{ К}$ была нами удалена как артефакт измерений. После этого суммарное число точек составило 1527379. Заметим, что это число в несколько раз превышает общее количество точек почасовых данных базы OMNI за период 1963–2007 гг. [Dmitriev et al., 2012]. На рисунке 1а прослеживается известная из литературы [Freeman and Lopez, 1985] сильная положительная корреляция между температурой и скоростью солнечного ветра (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.7$) с изменением характера взаимозависимости в районе 500 км/с . Скорость и плотность (рис. 1б) антикоррелировали ($r = -0.3$). Плотность и температура (рис. 1в) практически не коррелировали ($r = -0.1$).

3. ВЛИЯНИЕ УСРЕДНЕНИЯ

Нами был выполнен анализ данных при их усреднении за интервалы в 1 мин, 1 ч, 1 сут и 1 нед. Усреднение производилось без весовых коэффициентов путем вычисления средних арифметических значений. Результаты показаны на рис. 2–4 для плотности протонов, их скорости и температуры соответственно. Результаты усреднения за месяц представлены на рис. 5. В совокупности они наглядно свидетельствуют о том,

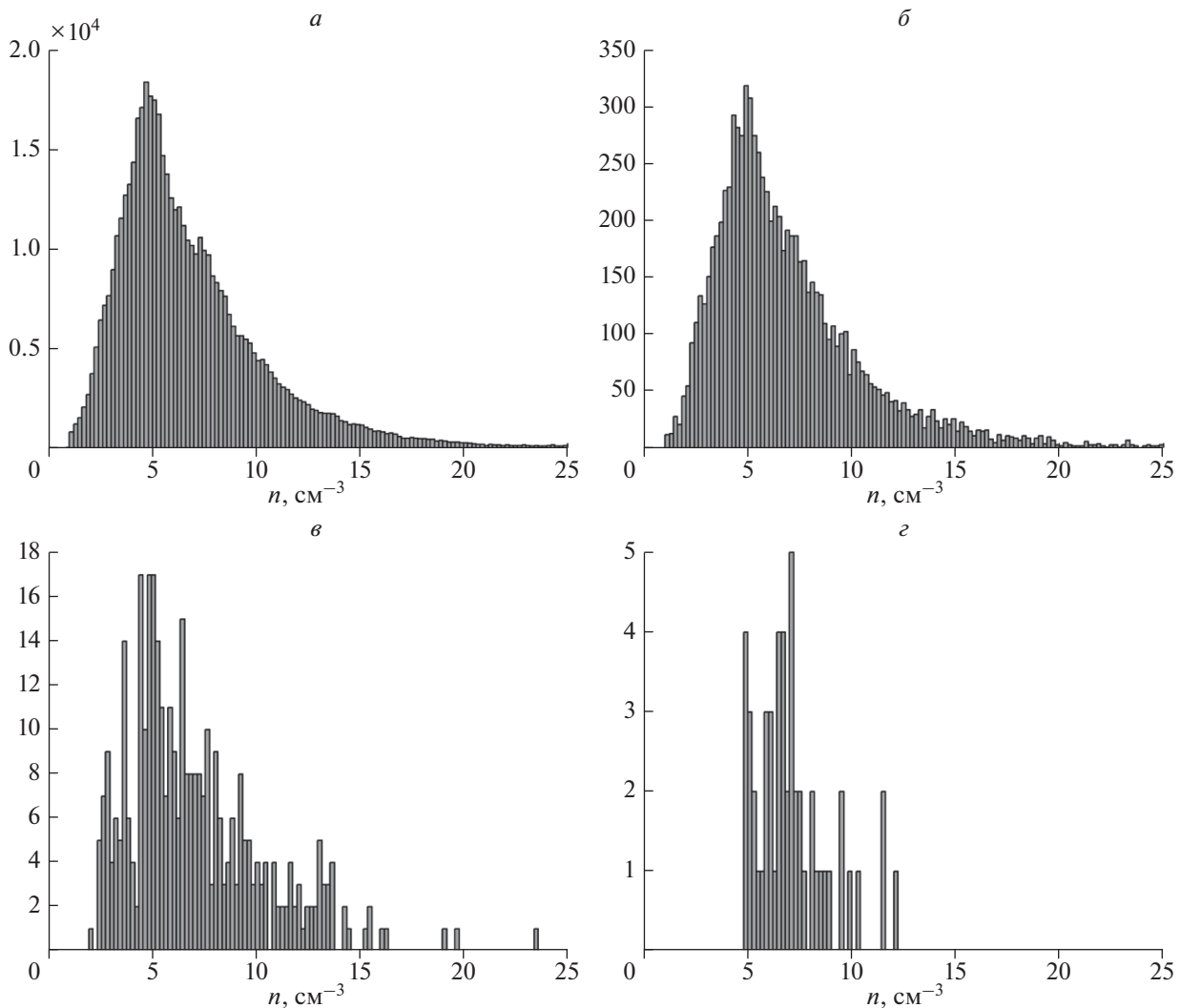


Рис. 2. Распределение солнечного ветра по плотности n при усреднении за различные интервалы времени: (а) — за мин, (б) — за ч, (в) — за сут, (з) — за нед. По вертикальной оси показано число отсчетов.

что усреднение данных о солнечном ветре наряду с качеством информации играет ключевую роль при попытках любой количественной классификации, свободной от априорных субъективных оценок и предположений.

Почасовое усреднение, приводя к небольшому огрублению гистограмм, еще не нарушает общую структуру распределения. При усреднении же за интервал порядка нескольких суток картина фактически “ломается”.

3. ОБЩИЙ ХАРАКТЕР СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Оценка параметров распределений производилась в пакете MATLAB с помощью функции `nlinfit`, осуществляющей нелинейную регрессию.

Распределение по плотности (рис. 6) может быть аппроксимировано логнормальным законом с максимумом при 4.8 см^{-3} и стандартным отклонением $SD = 3.3 \text{ см}^{-3}$. Однако нужно отметить, что данная аппроксимация является лишь приблизительной. По сравнению с логнормальным наблюдаемое распределение имеет более острый пик. Также на нем помимо основного максимума виден небольшой побочный максимум в районе 7.5 см^{-3} .

Распределение по скорости V носит весьма сложный характер (рис. 7). Ранее в [de Toma, 2011] отмечалось, что в 2007–2008 гг. распределение по V было практически бимодальным, что характерно для спада активности, при этом первичный пик располагался при 330–350 км/с, а вторичный — при скорости чуть выше 600 км/с (он, например, также виден на рис. 2 в [Farrugia et al., 2012]). При-

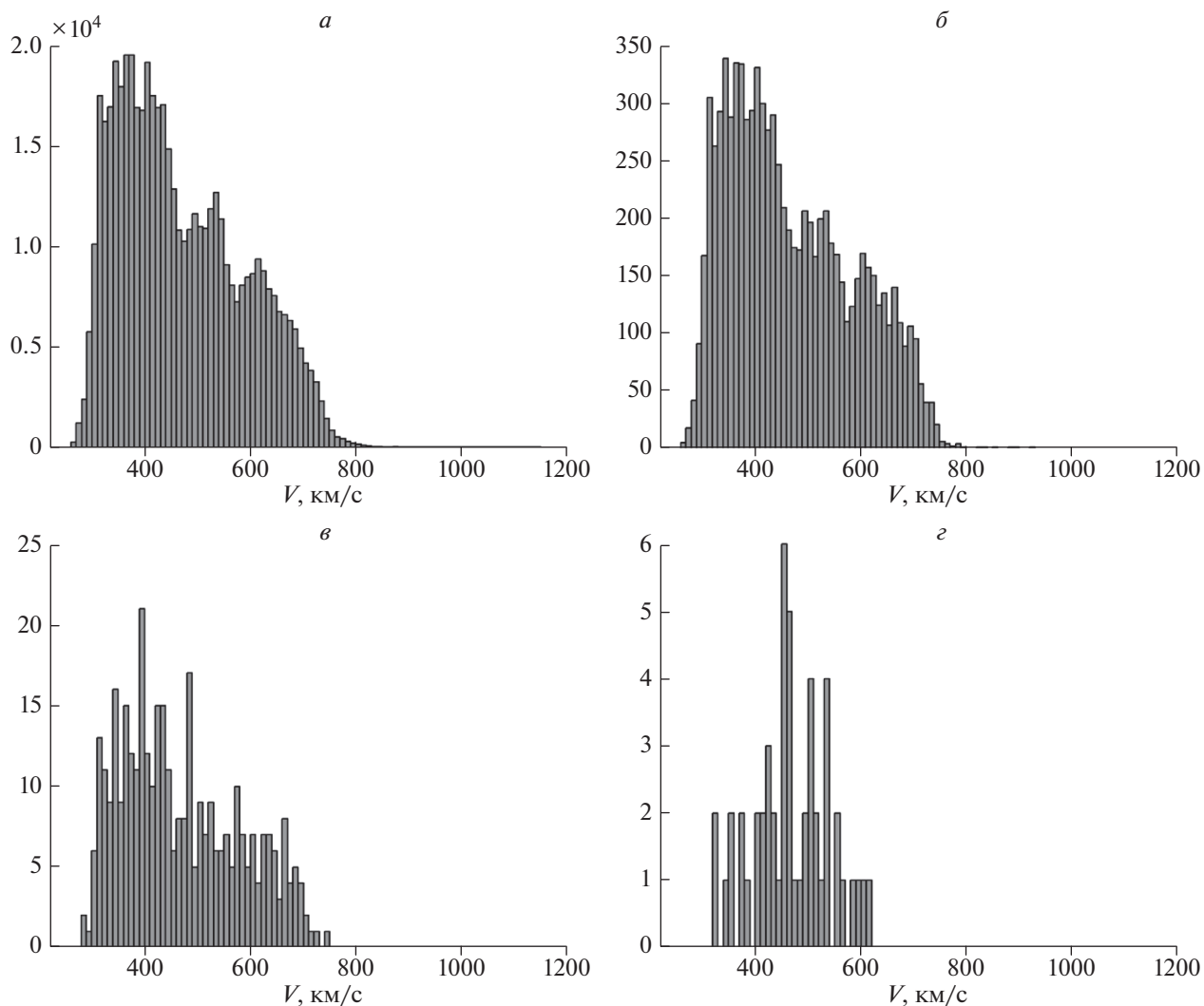


Рис. 3. Распределение солнечного ветра по скорости V при усреднении за различные интервалы времени: (а) — за мин, (б) — за ч, (в) — за сут, (г) — за нед. По вертикальной оси показано число отсчетов.

чиной появления вторичного пика был ветер из больших низкоширотных корональных дыр. В рассматриваемый нами интервал времени на спаде 24-го цикла активности картина явилась даже более сложной. В распределении по скорости можно выделить по меньшей мере три максимума: в районе 320–440 км/с, около 540 км/с и вблизи 620 км/с.

Распределение по температуре T за рассматриваемый период носит ярко выраженный бимодальный характер с двумя максимумами: при 15 и 170–250 тыс. К (рис. 8). Таким образом, результат для исследуемого года существенно отличается от полученного ранее для периода с 1963–2007 гг., охватывающего четыре солнечных цикла [Веселовский и др., 2010; Dmitriev et al., 2012], согласно которому распределение по T было логнормальным с максимумом в районе 72–94 тыс. К.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

При разбиении на кластеры использовался метод k -средних, число кластеров бралось от 3–8-ми. Предварительно был произведен переход к логарифмической шкале для температуры и плотности. Далее был осуществлен переход к нормированным величинам. Для скорости при этом применялась одна из стандартных формул [Мандель, 1988]:

$$V_{\text{norm}} = \frac{V - \langle V \rangle}{\sigma_V},$$

где σ_V — среднеквадратичное отклонение, и аналогично для логарифмов температуры и плотности.

Уже при разбиении на три кластера произошло отделение медленной и холодной компоненты солнечного ветра, дающей первый, узкий и высокий, пик на гистограмме для температуры

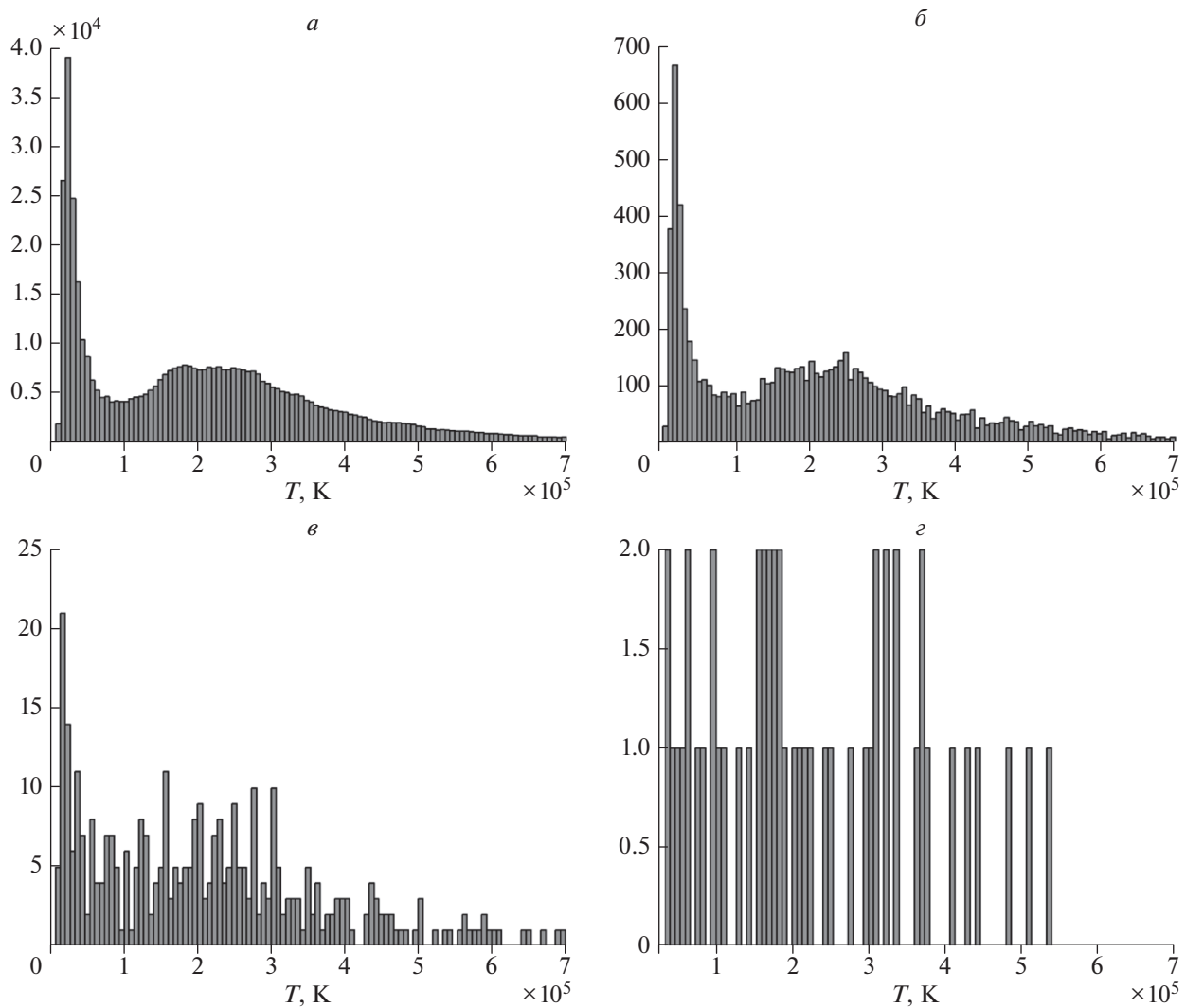


Рис. 4. Распределение солнечного ветра по температуре T при усреднении за различные интервалы времени: (а) — за мин, (б) — за ч, (в) — за сут, (з) — за нед. По вертикальной оси показано число отсчетов.

(назовем его для краткости SC-ветром от англ. “slow-cold”). Он занимал 26–28% по времени. Очень холодный ветер, с $T < 15$ тыс. К [Freeman and Lopez, 1985], приблизительно до вершины пика, занимал ~8% от суммарного времени. Ветер, который дает второй горб распределения по T , являющийся гораздо более низким и широким, мы назовем nonSC-ветром.

При увеличении числа кластеров до пяти SC-ветер подразделяется по плотности на два кластера — медленного-холодного-плотного ветра и медленного-холодного-разреженного. Данное разделение формально. В nonSC-ветер теперь входят два кластера с температурой и скоростью, близкими к среднестатистическим значениям, но с различной средней плотностью. Назовем их в совокупности mid-ветром. На его долю по времени приходилась приблизительно половина всего

ветра. Последний кластер из пяти составляет быстрый и горячий ветер из корональных дыр и КВМ, назовем его FH-ветром (от англ. “fast-hot”). Он занимал чуть менее четверти суммарного времени.

В случае восьми кластеров на долю SC-ветра приходится три из них, а nonSC занимает пять кластеров. Из них два приходятся на долю mid-ветра, два — на долю FH-ветра и один, наименьший по объему (6%), кластер дается сильно разреженным ветром (средняя плотность $\langle n \rangle = 2.7 \text{ см}^{-3}$) со средней скоростью, превышающей таковую для ветра в целом, и максимумом распределения по температуре в районе перемены между двумя горбами суммарного распределения (~70–90 тыс. К). Назовем его для краткости R-кластером (от слова “rarefied”).

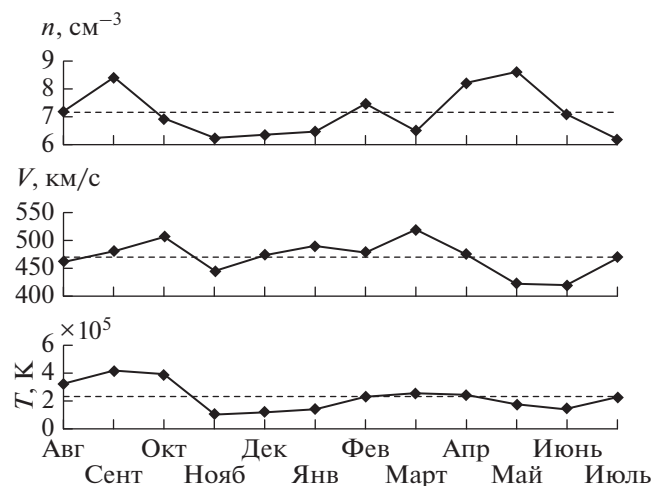


Рис. 5. Средние значения за месяц для параметров солнечного ветра: (а) — плотности n , (б) — скорости V , (в) — температуры T . Горизонтальными штриховыми линиями показаны соответствующие средние значения за год.

Доли различных составляющих солнечного ветра для разбиений на 3, 5 и 8 кластеров, а также средние значения скорости и плотности для них приведены в табл. 1. Номера кластерам присвоены по порядку возрастания координаты V для их центроидов.

Параметры распределения по температуре SC-, nonSC-, mid- и FH-компонент при различном

числе кластеров представлены в табл. 2. Причиной некоторых различий при изменении числа кластеров является переход части точек от одной их совокупности к другой. Общее распределение по температуре может быть с хорошей точностью представлено как сумма двух логнормальных распределений — для ветров SC и nonSC. Параметры этих распределений приведены в двух крайних справа столбцах табл. 2.

Распределения вышеперечисленных компонент по плотности и скорости рассмотрим более подробно на примере пяти кластеров. Так, распределение SC-ветра по скорости, если взять за начало отсчета минимальное значение скорости за рассматриваемый период, близко к логнормальному с максимумом 330 km/s и $SD = 50 \text{ km/s}$ (т.е., является довольно узким). Этот ветер частично ответственен за первый из трех пиков на общем графике распределения по скорости. Плотность его варьируется в широких пределах, от самых низких значений до максимального за исследуемый период, достигшего 69 cm^{-3} . Заметим также, что распределение по плотности компоненты SC аппроксимируется логнормальным распределением лучше, чем для ветра в целом. Мода аппроксимирующего распределения лежит при 4.9 cm^{-3} , а $SD = 5.2 \text{ cm}^{-3}$.

Ветер nonSC был существенно менее однородным по своим характеристикам. Его распределение по плотности аппроксимируется логнормальным законом (с модой 4.7 cm^{-3} и $SD = 3.0 \text{ cm}^{-3}$)

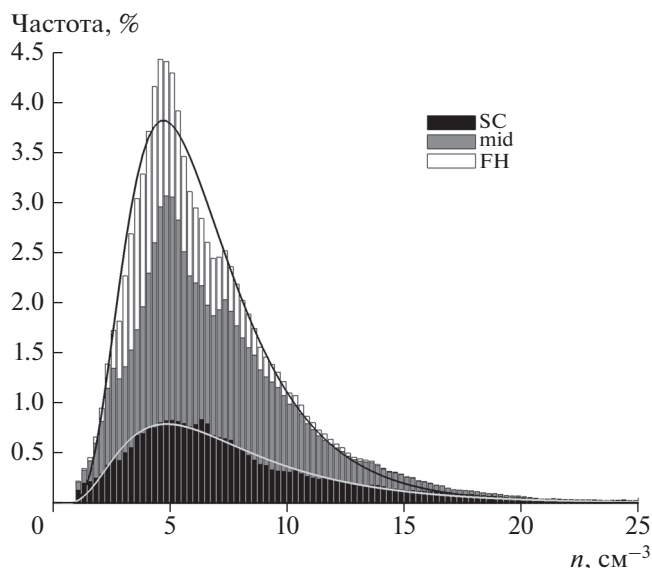


Рис. 6. Распределение солнечного ветра по плотности n по данным КА DSCOVR в случае разбиения на пять кластеров. Показан вклад компонент солнечного ветра: SC (черный цвет), mid (серый) и FH (белый). Обозначены аппроксимации логнормальным распределением для SC-компоненты (светлая кривая) и ветра в целом (черная кривая). Размер бина 0.25 cm^{-3} .

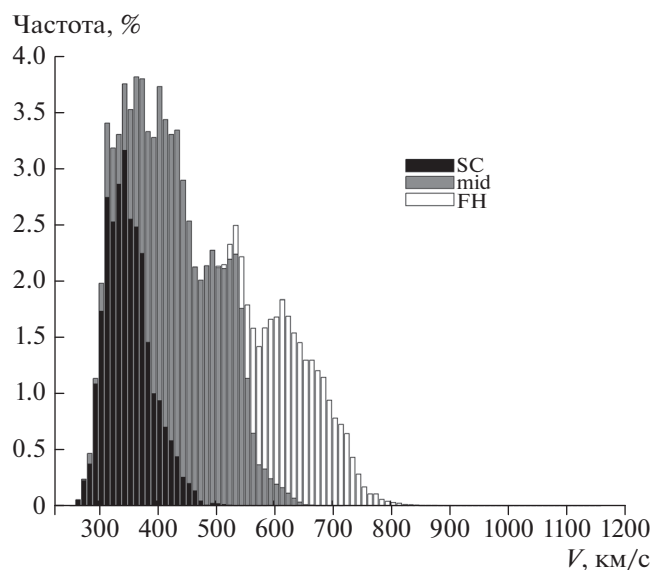


Рис. 7. Распределение солнечного ветра по скорости V по данным КА DSCOVR в случае разбиения на пять кластеров. Показан вклад компонент солнечного ветра: SC (черный цвет), mid (серый) и FH (белый). Размер бина 10 km/s .

лишь приблизительно, из-за более узкого и острого пика, а распределение по скорости имеет три пика около 430, 530 и 620 км/с. FH-компонента при этом имела логнормальные распределения по плотности с модой $n_0 = 4.3 \text{ см}^{-3}$ и $SD = 1.9 \text{ см}^{-3}$, скорости с $V_0 = 630 \text{ км/с}$ и $SD = 60 \text{ км/с}$ и температуре с $T_0 = 310 \text{ тыс. К}$ и $SD = 260 \text{ тыс. К}$. Распределение mid-компоненты по T было логнормальным, а по n и V двухпиковым.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Первая разновидность солнечного ветра — холодная и медленная — занимала около четверти всего времени в течение года. Ее происхождение в короне Солнца требует дополнительного исследования. Согласно нашей гипотезе, это могут быть остатки мелкомасштабных струй, выбрасываемых в корону и далее в межпланетную среду в кинетическом режиме. Мелкие пространственные и временные масштабы — их предполагаемая характерная черта. Идентификация источников вещества в короне для таких струй в лучшем случае затруднительна, а в худшем просто невозможна, что свидетельствует об условном характере представлений об источниках солнечного ветра. Мгновенным источником солнечного ветра, если бы мы могли проследить все траектории составляющих его частиц, служит лишь некоторая относительно небольшая часть его поверхности. Мы это предполагаем, но до сих пор остается неизвестной форма поверхности вокруг Солнца, которая образована “точками невозврата к Солнцу”. Одна из важных задач, что могла бы быть поставлена для миссии “Паркер” при полете ближе к Солнцу, которая стартовала 12 августа 2018 г., могла бы состоять в выяснении структуры и динамики этой топологической границы, важнейшей для правильного понимания астрофизического явления потери массы Солнца в виде ядер и лептонов. К сожалению, такая задача американскими авторами проекта не ставится.

Вторая разновидность ветра, более высокотемпературная и занимающая, соответственно, приблизительно три четверти времени, существенно разнороднее по свойствам. В случае ее FH-компоненты мы имеем дело в основном с потоками из корональных дыр и корональными выбросами массы. Во избежание возможных недоразумений отметим, что корональным выбросом массы называется вещество, видимое в поле зрения коронографа и движущееся в целом преимущественно в сторону от Солнца. Время распространения таких потоков из короны до орбиты Земли достаточно велико для установления в них приблизительного распределения Максвелла. Надо при этом иметь в виду важную роль квазистационарных и волновых электромагнитных по-

Таблица 1. Доля различных компонент солнечного ветра при разбиении на разное число N кластеров, а также соответствующие средние значения скорости V и плотности n

N	Кластеры	Характеристика	Доля	$\langle V \rangle$, км/с	$\langle n \rangle$, см^{-3}
3	1	SC	26%	350	8.0
5	1–2	SC	28%	350	8.7
8	1–3	SC	28%	350	8.8
5	3–4	mid	49%	450	7.0
8	4–5	mid	41%	440	7.3
5	5	FH	23%	640	5.4
8	7–8	FH	25%	630	6.0
8	6	R	6%	520	2.7

лей, делающих поведение плазмы крайне сложным и разнообразным особенно в режиме умеренной и сильной МГД-турбулентности. Остальная часть ветра, занявшая порядка половины времени, имеет более сложное и “изрезанное” распределение, как по скорости, так и, в меньшей степени, по плотности.

Аппаратурные проблемы цилиндра Фарадея КА DSCOVR создают ощутимые помехи извлечению информации о гидродинамических парамет-

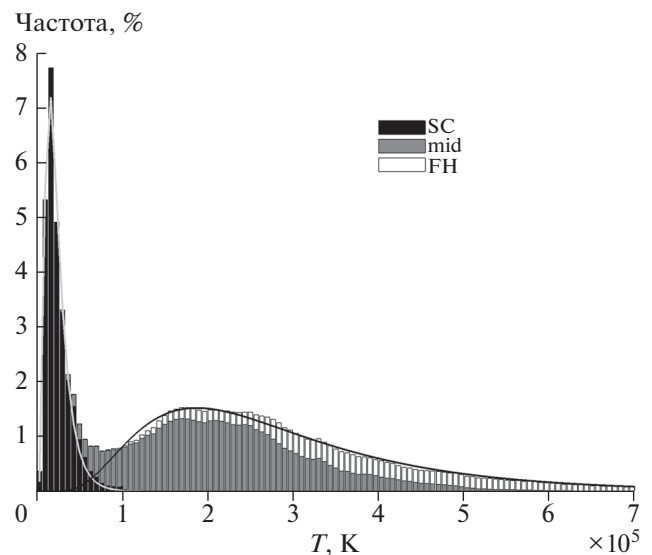


Рис. 8. Распределение солнечного ветра по температуре T по данным КА DSCOVR в случае разбиения на пять кластеров. Показан вклад компонент солнечного ветра: SC (черный цвет), mid (серый) и FH (белый). Обозначены аппроксимации логнормальным распределением для компонент SC (светлая кривая) и nonSC (черная кривая). Размер бина $2/3 \times 10^4 \text{ К}$.

Таблица 2. Среднее, медиана, минимум и максимум распределений групп кластеров по температуре (10^3 К) при разбиении на различное число N кластеров, а также положение максимума (мода) и стандартное отклонение SD аппроксимирующих их логнормальных распределений

N	Кластеры	Характеристика	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Мода	SD
3	1	SC	23	20	—	130	15	12
5	1–2	SC	26	21	—	280	15	13
8	1–3	SC	26	21	—	370	15	13
3	2–3	nonSC	300	250	8	4.7×10^3	180	200
5	3–5	nonSC	310	260	12	4.7×10^3	190	180
8	4–8	nonSC	310	260	8	4.7×10^3	190	180
5	3–4	mid	230	210	12	4.5×10^3	170	130
8	4–5	mid	230	220	17	910	180	110
5	5	FH	470	410	30	4.7×10^3	310	260
8	7–8	FH	470	410	32	4.7×10^3	330	240
8	6	R	140	120	8	870	80	110

рах ионов солнечного ветра. Из сопоставления с данными других КА мы делаем осторожный вывод, что эти помехи относительно малы для скорости, весьма заметны для плотности и особенно велики для температуры. Командой, работающей с КА DSCOVR, предпринимаются несколько противоречивые попытки оценить их и тем самым устранить плохо контролируруемую погрешность в данных [Biesecker and Johnson, 2018].

До сих пор нет ясности в вопросе о замене данных устаревшего ионного спектрометра прибора SWEPAM, установленного на КА ACE, соответствующими данными КА DSCOVR для непрерывного мониторинга солнечного ветра в точке Лагранжа L1. Именно такова была основная цель запуска КА DSCOVR в плане исследования и предсказания космической погоды. Она пока не достигнута. Поэтому данные КА DSCOVR публикуются отдельной строкой на известном сайте OMNIWeb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Противоречие данных портала DSCOVR Space Weather Data Portal (<https://www.ngdc.noaa.gov/dscovr/portal/>) с другими источниками данных по солнечному ветру очевидно. Для устранения этого противоречия предстоит сделать очень многое. Нужны отсутствующие у нас сведения о конструкции цилиндра Фарадея и условиях его функционирования на КА DSCOVR. Вовсе не очевидно, что проблема будет решена. Замечание относится также к поступающим сейчас данным КА “Parker” при полете к Солнцу.

6. ВЫВОДЫ

Усреднение данных о солнечном ветре по времени играет важную роль при попытках его количественной классификации вблизи орбиты Земли. Об этом наглядно свидетельствуют результаты, полученные на КА DSCOVR с августа 2016 г. по июль 2017 г.

Кластеризация данных позволила выделить несколько характерных типов солнечного ветра в этот период времени. Изучение их свойств, вклада на разных фазах цикла солнечной активности и происхождения будет продолжено.

Высказана гипотеза о происхождении различных типов солнечного ветра в макроскопическом и кинетическом режиме.

7. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа ИСВ частично поддержана грантом Российского научного фонда, проект № 16-12-10062.

Авторы выражают благодарность М.С. Блохиной за помощь, оказанную в процессе подготовки рукописи, и рецензенту за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Алгебра и статистика солнечного ветра // Космич. исслед. Т. 48. № 2. С. 115–130. 2010.
- Мандель И.Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и статистика. 176 с. 1988.

- *Biesecker D., Johnson J.* DSCOVR – Status update and comparing data from L1 // 2018 Space Weather Workshop. April 16–20, 2018. Westminster, Colorado, USA (https://cpaess.ucar.edu/sites/default/files/documents/sww-2018-presentations/Biesecker_Doug_03.pdf).
- *Burlaga L.F., Szabo A.* Fast and slow flows in the solar wind near the ecliptic at 1 AU? // *Space Sci. Rev.* V. 87. № 1–2. P. 137–140. 1999.
- *Burlaga L.F., Lazarus A.J.* Lognormal distributions and spectra of solar wind plasma fluctuations: Wind 1995–1998 // *J. Geophys. Res.* V. 105. № A2. P. 2357–2364. 2000.
- *de Toma G.* Evolution of coronal holes and implications for high-speed solar wind during the minimum between cycles 23 and 24 // *Solar Phys.* V. 274. P. 195–217. 2011.
- *Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Veselovsky I.S.* Statistical characteristics of the heliospheric plasma and magnetic field at the Earth's orbit during four solar cycles 20–23 / *Handbook on solar wind: effects, dynamics and interactions*. Ed. H.E. Johannson. NOVA Science Publishers, Inc., N.Y., 434 p. 2009 (arXiv:1301.2929v1 [physics.space-ph]).
- *Farrugia C.J., Harris B., Leitner M., et al.* Deep solar activity minimum 2007–2009: solar wind properties and major effects on the terrestrial magnetosphere // *Solar Phys.* V. 281. P. 461–489. 2012.
- *Freeman J.W., Lopez R.E.* The cold solar wind // *J. Geophys. Res.* V. 90. № A10. P. 9885–9887. 1985.
- NOAA Space Weather Prediction Center (2016): Deep Space Climate Observatory (DSCOVR). NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. <http://doi.org/10.7289/V51Z42F7>