

## ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МАКСИМУМЕ ЦИКЛА

© 2022 г. С. А. Богачёв<sup>1\*</sup>, А. А. Рева<sup>1</sup>, А. С. Кириченко<sup>1</sup>, А. С. Ульянов<sup>1</sup>, И. П. Лобода<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 03.05.2022 г.

После доработки 24.05.2022 г.; принята к публикации 20.06.2022 г.

Активные области (АО) на Солнце обсуждаются как один из возможных источников медленного солнечного ветра (СВ), происхождение которого все еще является предметом споров. В настоящей работе представлены экспериментальные свидетельства возможного влияния АО на скорость и температуру СВ вблизи максимума 23-го солнечного цикла (2000–2002 гг). Изучены отдельно характеристики СВ, сформированного в периоды, когда АО находились на центральном меридиане (ЦМ) Солнца ( $\approx 40\%$  от всего времени наблюдения), и характеристики СВ, сформированного в отсутствие АО на ЦМ ( $\approx 60\%$  времени). Скорость СВ в первом случае (в присутствии АО) в среднем оказалась примерно на 1% ниже, чем скорость СВ, сформированного в отсутствие АО (434.06 км/с против 438.09 км/с при погрешности измерений  $\sigma \approx 0.37$  км/с). Для температуры СВ соответствующая разница составила около 6% (94 600 К против 100 500 К при погрешности  $\sigma \approx 340$  К). Этот результат подтверждает в среднем более низкую скорость и температуру СВ, формирующегося в АО, по сравнению с компонентой СВ, формирующейся в корональных дырах.

*Ключевые слова:* солнечный ветер, активные области.

DOI: 10.31857/S0320010822070038

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Характеристики солнечного ветра (СВ), измеряемые у Земли, являются существенно неоднородными, что позволяет разделить СВ на несколько компонент. Одним из частых способов является разделение СВ на быстрый, со скоростью на расстоянии 1 а.е. порядка и выше 600–700 км/с, и медленный, со скоростью порядка и ниже 400–500 км/с (см., например, Фелдман и др., 2005). Помимо различия в скорости, компоненты имеют другие различные характеристики, что наводит на мысль об их разном происхождении. Источником быстрого СВ считаются корональные дыры (КД) — области Солнца с открытыми линиями магнитного поля, наблюдаемые по пониженной мере эмиссии в вакуумной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях спектра. Одними из первых идею о связи КД и СВ, по-видимому, высказали Кригер и др (1977). Аргументом в пользу формирования быстрого СВ в КД является заметный рост скорости СВ на орбите Земли при появлении вблизи центрального меридиана (ЦМ) Солнца крупных КД (Накагава и др., 2019; Борисенко, Богачёв, 2020). Кроме того, так как степени

ионизации элементов СВ “замораживаются” на расстоянии нескольких радиусов от Солнца, из их анализа можно сделать выводы о температуре в области формирования СВ (см., например, Оуоки и др., 1983). Для быстрого СВ характерны пониженные степени ионизации (Хундхаузен, 1968), что согласуется с представлениями о его формировании в КД, хотя существуют и иные сообщения (Юань-Куэн и др., 1997).

Элементный состав медленного СВ имеет более высокие степени ионизации (Жао и др., 2009), что свидетельствует о его формировании в областях с более высокой температурой. Также в медленном СВ (см., например, Гейс и др., 1995) наблюдается так называемый FIP-эффект (FIP — first ionization potential), а именно, повышенное обилие элементов с низким (менее 10 эВ) первым ионизационным потенциалом. В быстром СВ этот эффект отсутствует или менее выражен (Фу и др., 2017). В короне Солнца FIP-эффект наблюдается в закрытых магнитных петлях, связанных с активными областями (АО). Скорость и структура медленного СВ показывают также значительные вариации со временем, не характерные для быстрого СВ (см., например, Бейм и др., 1997). Если следовать предположению о формировании медленного СВ в АО, то его ва-

\* Электронный адрес: bogachev.sergey@gmail.com

риации могут отражать более сложную структуру поля и плазмы в АО по сравнению со значительно более однородной структурой КД.

Основная сложность при формировании СВ в АО состоит в том, что для ухода плазмы в межпланетное пространство она должна распространяться вдоль открытых силовых линий магнитного поля. По этой причине для формирования медленного СВ в АО требуются достаточно специфические механизмы, когда плазма формируется в закрытых магнитных структурах, но затем уходит вдоль открытых линий поля. Такие условия, по видимости, могут формироваться на границах АО. Одним из механизмов формирования медленного СВ может быть “обменное” магнитное пересоединение (*interchange reconnection*; Крукер и др., 2002), при котором замкнутые магнитные линии на краях АО пересоединяются с открытыми силовыми линиями спокойной короны. Это может объяснить, каким образом плазма из замкнутых петель попадает в открытое пространство. Предположение о возможности формирования медленного СВ на границах АО согласуется с результатами спектральных наблюдений, в которых обнаружены направленные на наблюдателя потоки вещества со скоростями до 50 км/с на краях АО (см., например, Брукс, Уоррен, 2011).

Получить прямые подтверждения влияния АО на характеристики СВ достаточно трудно из-за сложной структуры солнечной короны. При измерениях СВ у Земли невозможно однозначно определить, в какой именно области солнечной короны (в КД или АО) был сформирован данный объем плазмы. Магнитная структура солнечной короны заметно упрощается в минимуме активности, однако в этот же период на Солнце снижается число АО (до их полного исчезновения), и выделить их влияние оказывается сложным уже по этой причине. Несмотря на это, существуют исследования, в которых делались попытки обнаружить влияние АО на СВ на основе наблюдений АО на диске Солнца. Нойгебауэр и др. (2002) предположили, что источник СВ на Солнце находится там же, где располагается основание соответствующей силовой линии межпланетного магнитного поля. Используя потенциальное приближение для магнитного поля Солнца (модель PFSS — *potential-field source-surface*), они определили источники СВ для четырех оборотов Солнца в период с 1998 по 2001 г. и показали, что в тех случаях, когда основание силовой линии замыкается на АО, СВ имеет более низкие скорости и более высокие степени ионизации. Макнейл и др. (2019) сравнили характеристики СВ, связанного с КД, с характеристиками СВ из той же КД, но спустя один керрингтоновский оборот Солнца, когда здесь сформировалась ранее

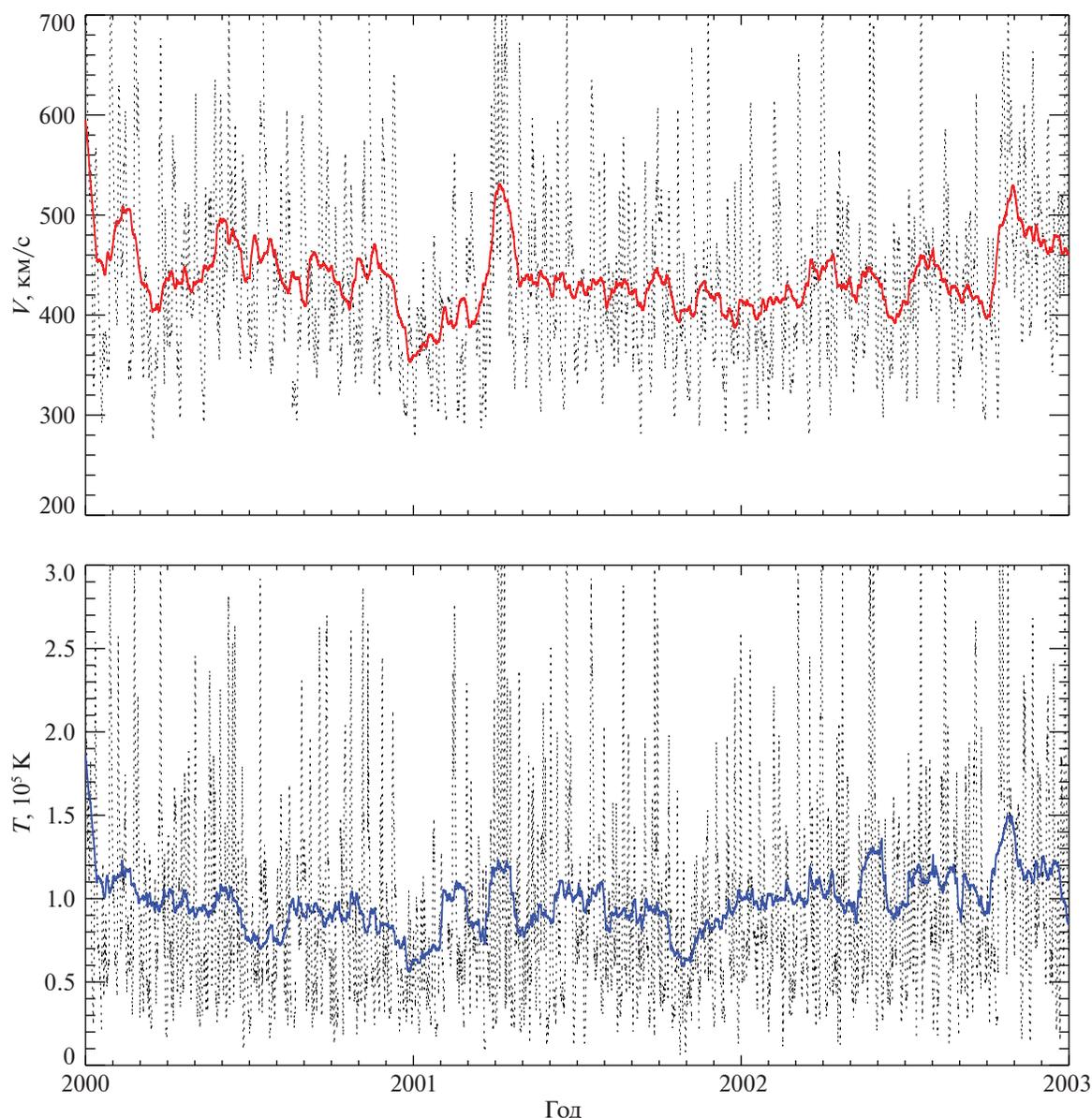
отсутствующая АО. Ими была обнаружена существенная разница в структуре СВ и в его элементном составе (в частности, обнаружен FIP-эффект), что они связали с влиянием АО. Стенсби и др. (2021) проанализировали карты магнитного поля для четырех циклов солнечной активности и показали, что в максимуме солнечного цикла от 30 до 80% магнитного потока, связанного с открытыми линиями поля, может формироваться в АО. Исходя из этого, ими было высказано предположение о значительном влиянии АО на характеристики СВ в максимуме солнечной активности. В минимуме солнечного цикла они оценили это влияние как пренебрежимое.

В настоящей работе мы предлагаем иной способ исследования влияния АО на СВ, основанный на статистическом анализе большого объема данных. Всего мы обработали данные за три года (с 2000 по 2002 г.), полученные вблизи максимума 23-го солнечного цикла. Несмотря на сложность структуры солнечной короны и межпланетного магнитного поля в максимуме активности, мы полагаем, что нам удалось обнаружить экспериментальные свидетельства влияния АО на СВ. В разделе 2 подробно описаны наш метод и использованные экспериментальные данные. Полученные нами результаты приводятся в разделе 3. В разделе 4 обсуждаются эти результаты и сделаны выводы.

## 2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ

Источником данных по СВ, использованных в работе, является прибор SWEPAM (*Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor*; Мак Комас и др., 1998), работающий на космическом аппарате ACE (*Advanced Composition Explorer*; Стоун и др., 1998). Прибор работает в точке либрации L1 системы Солнце–Земля, расположенной приблизительно на линии между Землей и Солнцем на расстоянии около 1.5 млн км от Земли. Мы использовали в работе данные по объемной скорости протонов  $v_p$  (далее  $v$  — скорость СВ), и данные по температуре протонов  $T_p$  (далее  $T$  — температура СВ). Для исследования был выбран период с 1 января 2000 г. по 31 декабря 2002 г. Температура электронов в СВ меняется очень незначительно и на расстоянии 1 а.е. часто рассматривается как постоянная величина (Ньюбури, 1996).

Чтобы упростить вычисления, мы усреднили данные SWEPAM с шагом 10 мин (исходное временное разрешение наблюдений составляло 1 мин). Также были исключены точки, для которых среднее значение  $v$  или  $T$  определить не удалось (отсутствовали все 10 измерений в соответствующем 10-мин интервале). Полное число измерений за



**Рис. 1.** Усредненная динамика скорости (верхняя панель) и температуры (нижняя панель) СВ на уровне орбиты Земли за 2000–2002 гг. Тонкая пунктирная линия — усреднение с шагом 1 сут; толстая сплошная линия — усреднение с шагом 4 недели.

три года после этого составило  $N_v = 155\,155$  для скорости и  $N_T = 136\,258$  для температуры.

На рис. 1 представлена общая динамика скорости и температуры СВ за исследованный 3-летний период: пунктирная линия — данные, усредненные с шагом 1 сут; сплошная линия — с шагом 4 нед. Статистическая информация по характеристикам СВ (средние, максимальные и медианные значения для 10-мин разрешения) приведена в табл. 1. Доля медленного ветра ( $v < 400$  км/с) в исследованный период составляла 40%; доля быстрого ветра ( $v > 600$  км/с) — 6.5%. Средняя температура медлен-

ной компоненты составила  $0.55 \times 10^5$  К; быстрой —  $2.12 \times 10^5$  К.

Метод исследования влияния АО на СВ, использованный нами, проиллюстрирован на рис. 2 (вид сверху на плоскость эклиптики из северного полюса, при котором Солнце вращается против часовой стрелки). Структура межпланетного магнитного поля показана без спирали Паркера, что не существенно для объяснения. Слева приведен упрощенный случай. СВ формируется у поверхности Солнца на центральном меридиане (ЦМ) в некоторый момент  $t_S$  (S — Sun), затем распространяется в радиальном направлении и достигает

**Таблица 1.** Характеристики СВ с 01.01.2000 г. по 31.12.2002 г.

| Параметры      | Число измерений | Среднее значение | Медианное значение | Максимальное значение | Минимальное значение |
|----------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| $V$ , км/с     | 155 155         | 436.48           | 420.00             | 972.33                | 255.44               |
| $T$ , $10^5$ К | 136 258         | 0.981            | 0.790              | 12.071                | 0.031                |

орбиты Земли (пунктирная линия) в момент времени  $t_E$  (E — Earth). Времена  $t_S$  и  $t_E$  связаны приближительной формулой:

$$t_S = t_E - \frac{a(t_E)}{v(t_E)}, \quad (1)$$

где  $a$  — расстояние от Солнца до Земли, для которого мы учитывали изменение со временем, а  $v$  — скорость СВ, измеренная около Земли в момент времени  $t_E$ . Формула является приближительной, так как предполагает, что СВ распространяется радиально с постоянной скоростью, равной скорости, измеренной у орбиты Земли. Такое предположение, безусловно, не вполне корректно, однако часто используется при оценке времени транзита СВ до Земли (см., например, Макнейл и др., 2019).

Соответственно, если на Солнце присутствует АО, которая в момент времени  $t_{S0}$  выходит на ЦМ (пересекает его ведущим правым краем), а в момент  $t_{S1}$  уходит с ЦМ (пересекает его левым краем), то в упрощенном случае СВ, зарегистрированный у Земли в интервале времени  $[t_{E0}, t_{E1}]$ , рассчитанном по формуле (1), будет сформирован в данной АО.

В действительности, реальная структура магнитного поля существенно отличается от представленной на левой панели идеализированной структуры. В сектор межпланетного пространства, связанный с АО, будут проникать силовые линии магнитного поля из других АО, а также из расположенных рядом КД (правая панель рис. 2). Также следует учитывать смещение АО по широте относительно солнечного экватора.

**Таблица 2.** Характеристики АО на ЦМ с 01.01.2000 по 31.12.2002 г.

| Характеристика АО               | Максимальное значение | Среднее значение |
|---------------------------------|-----------------------|------------------|
| Площадь, м.д.с.п.               | 2240                  | 134              |
| Протяженность по долготе, град. | 27                    | 6                |
| Число пятен                     | 90                    | 11               |

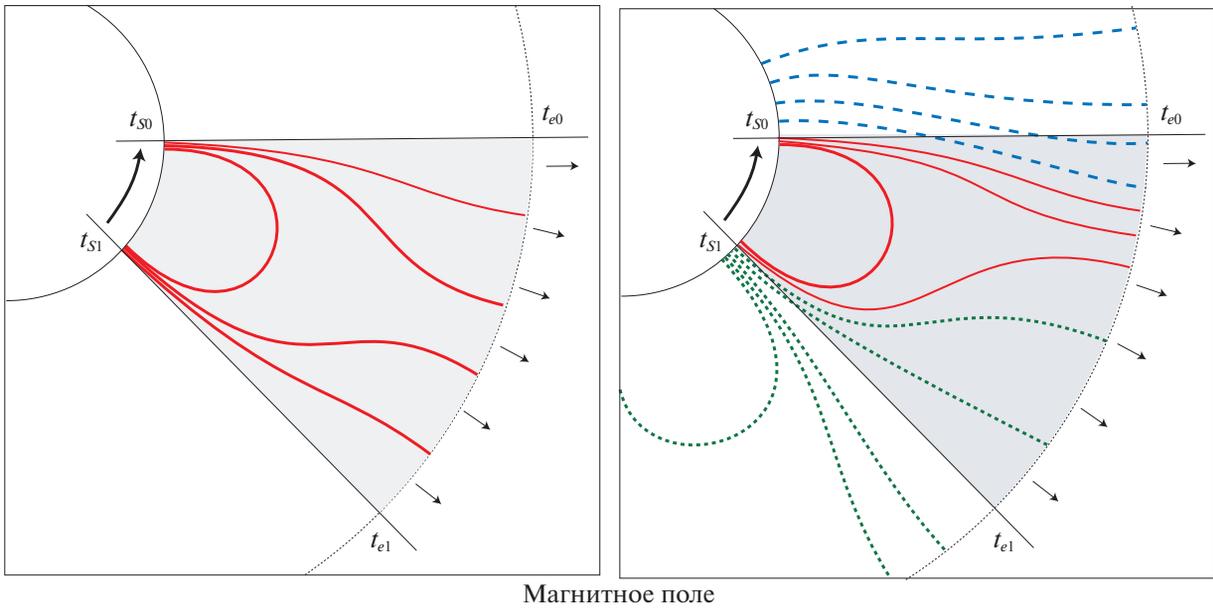
Мы, однако, полагаем, что даже в этом случае часть силовых линий АО будет проникать в соответствующий сектор межпланетного пространства. Соответственно, при прохождении АО через ЦМ она будет влиять на характеристики СВ, хотя и гораздо слабее, чем в идеализированном случае. Вопрос, таким образом, состоит в реальной величине этого влияния и возможности его выделить на достаточно достоверном уровне.

Для исследования характеристик АО мы использовали данные NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), размещенные на сайте SWPC (Space Weather Prediction Center). Соответствующие данные предоставляются раз в сутки (обычно по состоянию на 24:00 UT каждого дня) и содержат номер АО по каталогу, время измерения, а также дополнительную информацию, из которой мы использовали долготу  $L$  центра АО и протяженность АО по долготе в градусах (ее мы обозначаем как  $H$ ). Всего с 01.01.2000 г. по 31.12.2002 г. на видимой стороне Солнца, согласно каталогу NOAA, присутствовали 1427 АО с номерами от NOAA 8815 до NOAA 10239. Из них только 946 областей пересекали ЦМ; остальные либо разрушались до пересечения, либо формировались к западу от ЦМ. Некоторая статистическая информация о характеристиках АО, наблюдавшихся в этот период, приведена в табл. 2 (измерения проводились вблизи ЦМ).

Для всех 946 АО мы определили интервал времени, в течение которого они находились на ЦМ. Соответствующая процедура состояла в следующем. Для каждой АО выбиралось одно измерение слева непосредственно перед прохождением центра АО через ЦМ (обозначим соответствующий момент времени и параметры АО в этот момент как  $t_1$ ,  $L_1$  и  $H_1$ ) и первое измерение справа, т.е. сразу после пересечения ЦМ (обозначения —  $t_2$ ,  $L_2$  и  $H_2$ ). На основе этих данных определялась угловая скорость перемещения АО:

$$\Omega = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

где учтено, что  $L_1 < 0$ . Фактическая угловая скорость АО может незначительно отличаться от скорости дифференциального вращения Солнца на



**Рис. 2.** Идеализированная (левая панель) и реалистичная (правая панель) структура межпланетного магнитного поля. Сплошные линии на обеих панелях — магнитное исследуемой АО. На правой панели: пунктирные линии — магнитное поле соседней АО; штриховые линии — магнитное поле расположенной рядом КД. Демонстрируется эффект проникновения магнитного поля от соседних корональных структур в сектор межпланетного пространства, связанный с изучаемой АО. Времена  $t_S$  и  $t_e$  объясняются в тексте.

соответствующей широте из-за собственного движения АО.

Далее определялся момент прохождения центра АО через ЦМ (обозначим его  $t_S$ ):

$$t_S = t_1 - L_1 \Omega. \quad (3)$$

Затем рассчитывалась средняя протяженность АО по долготе (обозначим ее  $H_S$ ), так как в течение суток между двумя измерениями это значение могло измениться:

$$H_S = H_1 - (H_2 - H_1) \frac{L_1}{L_2 - L_1}. \quad (4)$$

Если при обоих измерениях АО находится на одинаковом расстоянии от ЦМ ( $L_2 = -L_1$ ), то значение  $H_S$  по формуле (4) равно среднему арифметическому. В противном случае с большим весом учитывается значение, измеренное ближе к ЦМ.

Отсюда следует, что АО находится на ЦМ в течение времени  $[t_{S0}, t_{S1}]$ , где

$$\begin{aligned} t_{S0} &= t_S - \Omega \frac{H_S}{2}, \\ t_{S1} &= t_S + \Omega \frac{H_S}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Этот интервал времени затем сопоставляется с интервалом наблюдения СВ у Земли,  $[t_{E0}, t_{E1}]$ , определенным по формуле (1).

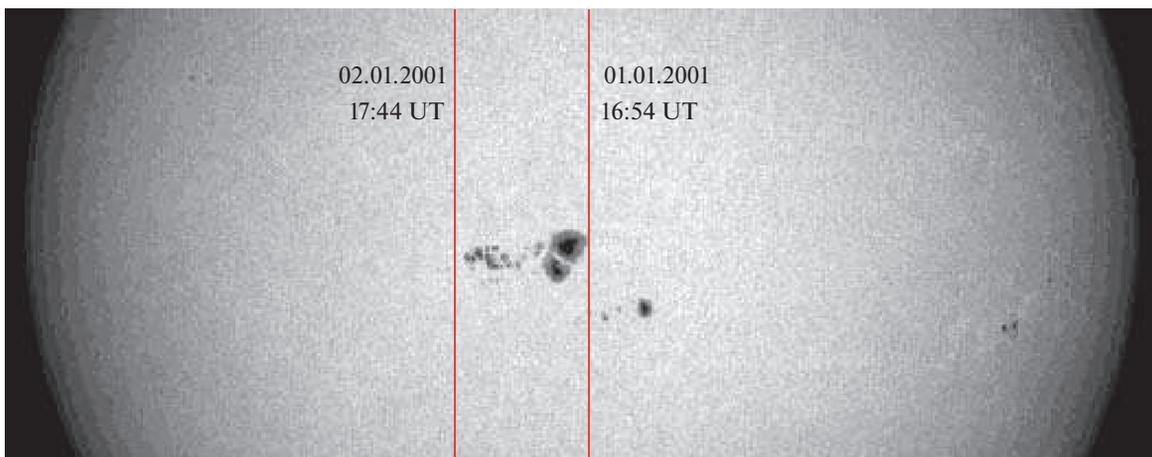
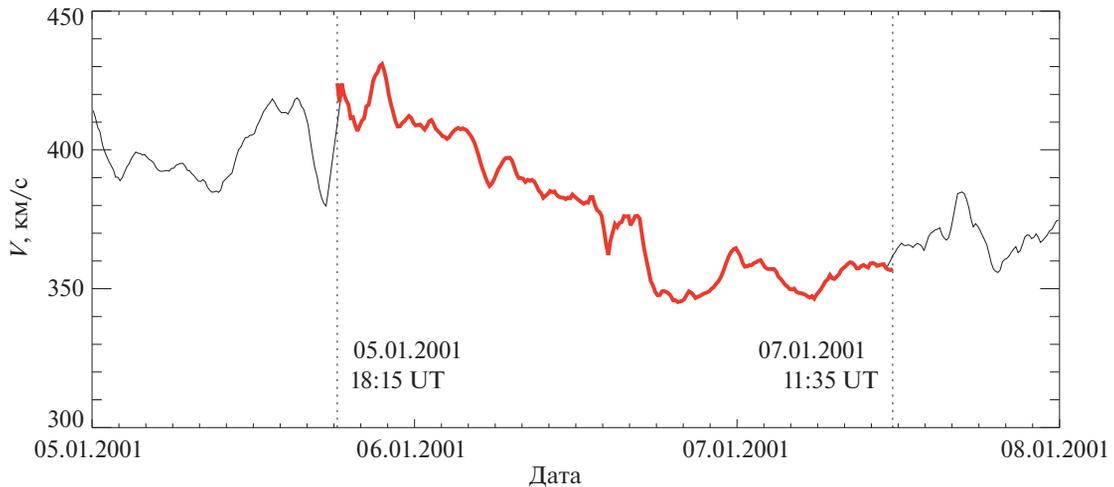
На рис. 3 мы иллюстрируем данный метод на примере одной из активных областей, NOAA 9289,

наблюдавшейся вблизи ЦМ 1–2 января 2001 г. Для этой АО были получены: время входа на ЦМ,  $t_{S0}$ , 16:54 UT 01.01.2001 г.; время ухода с ЦМ,  $t_{S1}$ , 17:44 UT 02.01.2001 г. Вертикальные линии на нижней панели рис. 3 показывают соответствующие долготы, которые хорошо согласуются с видимыми границами АО. По формуле (1) были определены соответствующие времена наблюдения СВ у Земли:  $t_{E0}$  — 18:15 UT 05.01.2001 г.;  $t_{E1}$  — 11:35 UT 07.01.2001 г. Этот интервал приведен на верхней панели рис. 3.

Интересно, что время выхода АО на ЦМ, согласно рис. 3, примерно совпадало со снижением скорости СВ, которое прекратилось в момент ухода АО с ЦМ. Мы, впрочем, не проводили в работе системный визуальный анализ данных, а основывали исследование только на статистических методах, результаты которых представлены в следующем разделе.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы использовали метод, описанный в разделе 2, чтобы разделить весь набор данных на две группы: СВ, сформированный в период нахождения АО на ЦМ, и СВ, в момент формирования которого АО на ЦМ отсутствовали. Мы полагаем, что если АО влияют на СВ, то характеристики СВ для первой группы будут отличаться от характеристик СВ для второй группы. Статистическая информация (число измерений в каждой группе и соответствующие



**Рис. 3.** Иллюстрация к методу обработки данных. Снизу — оптическое изображение АО 9289 (изображение SOHO MDI 9289) и ее правая и левая границы, определенные методом, описанным в статье. Рядом с границами — времена их пересечения с ЦМ. На верхней панели — интервал времени и фрагмент для скорости СВ, соответствующие прохождению АО 9269 по ЦМ.

средние параметры  $v$  и  $T$  для каждой группы) приведена в табл. 3.

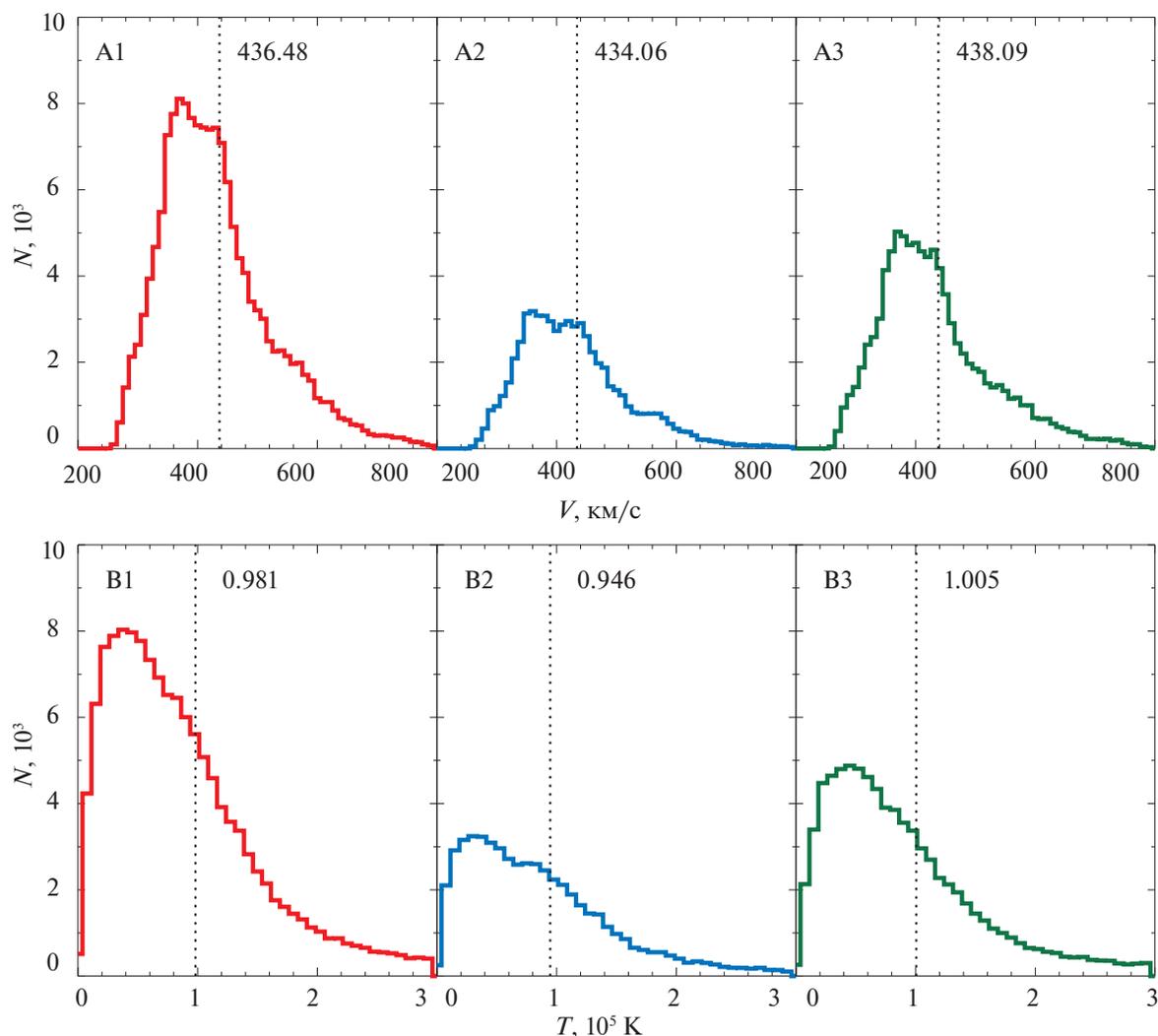
С активными областями оказались, таким образом, сопоставлены 40% наблюдений. Поскольку

**Таблица 3.** Параметры СВ в зависимости от наличия АО на ЦМ

| Скорость СВ, км/с        | Число измерений | Среднее значение |
|--------------------------|-----------------|------------------|
| Всего                    | 155 155         | 436.48           |
| Группа 1 (есть АО на ЦМ) | 61 950          | 434.06           |
| Группа 2 (нет АО на ЦМ)  | 93 205          | 438.09           |
| Температура СВ, $10^5$ К | Число измерений | Среднее значение |
| Всего                    | 136 258         | 0.981            |
| Группа 1 (есть АО на ЦМ) | 54 648          | 0.946            |
| Группа 2 (нет АО на ЦМ)  | 81 610          | 1.005            |

мы исследовали период высокой солнечной активности, когда количество АО на диске Солнца максимально, соответствующая оценка, по-видимому, является верхним пределом. Отметим, что, согласно разделу 1, доля медленного СВ в исследованный период также составляла 40%. Мы рассматриваем это, однако, как случайное совпадение.

Соответствующие распределения температуры и скорости СВ приведены на рис. 4. На левых панелях (A1 для скорости и B1 для температуры) приведены распределения для СВ без разделения на группы. На средней панели (A2 для скорости и B2 для температуры) показаны распределения для группы 1 (есть АО на ЦМ). На правой панели (A3 для скорости и B3 для температуры) показаны распределения для группы 2 (нет АО на ЦМ). Вертикальная штриховая линия на всех панелях показывает среднее значение; эти значения также приведены в числовом виде (см. также табл. 3).



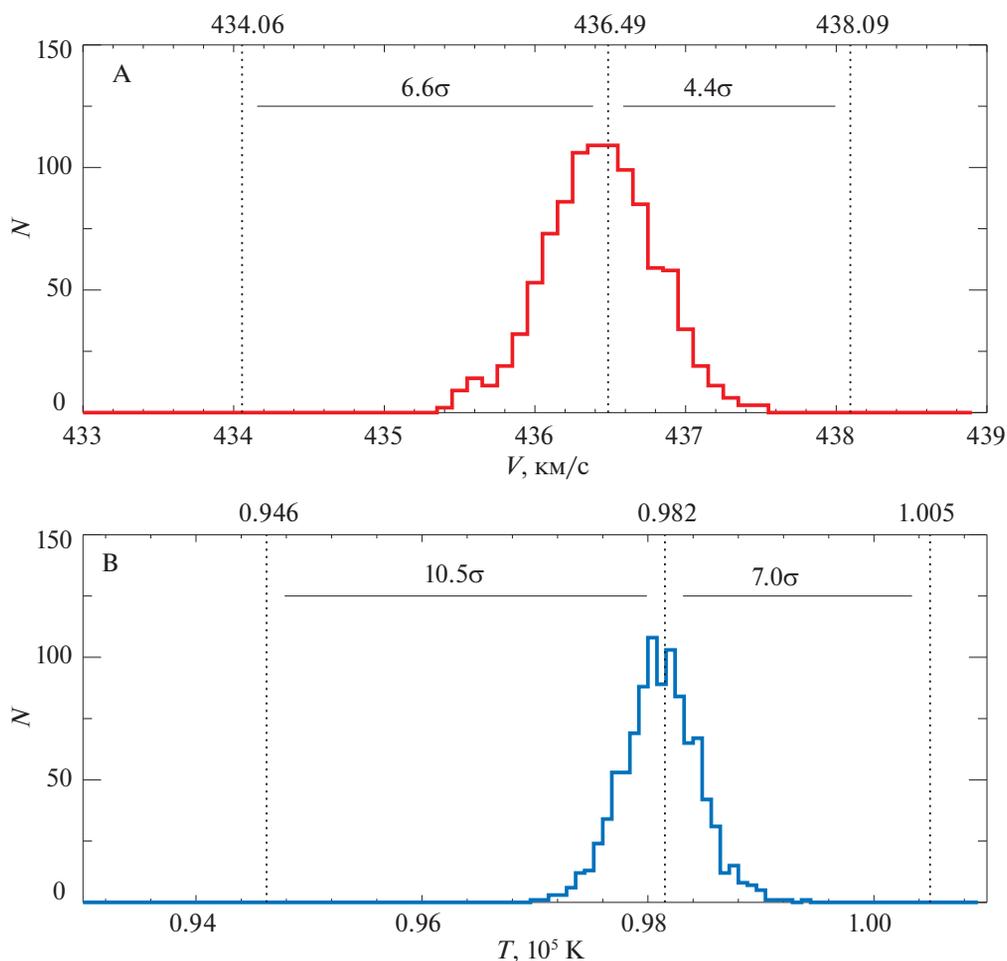
**Рис. 4.** Распределения скорости (верхний ряд) и температуры (нижний ряд) СВ с 2000 по 2002 г. для полной выборки данных (левые панели), а также отдельно для СВ, сформированного в моменты нахождения АО на ЦМ (центральные панели) и сформированного в отсутствие АО на ЦМ (правые панели). Смори также объяснения в тексте.

Температура и скорость СВ в группе 1 оказались ниже, чем средние значения за весь период 2000–2002 гг., а в группе 2 — выше средних за период. Соответствующая разница, однако, невелика — около  $\pm 0.5\%$  для скорости СВ и около  $\pm 3\%$  для температуры СВ. По этой причине важным является вопрос о статистической достоверности полученного результата.

Чтобы оценить статистическую значимость результата, мы использовали следующий метод. В качестве примера рассмотрим среднюю скорость СВ для группы 1. Для нее было получено значение  $v = 434.06$  км/с, которое определено на основе 61 950 измерений, выбранных из полного ансамбля, содержащего 155 155 точек. Теперь выберем из этого же ансамбля такое же количество точек, 61 950, но не по признаку наличия АО на ЦМ, а случайным образом, и определим среднее значение

$v$  для данной случайной выборки. Если повторить эту операцию много раз, то можно оценить, чему равна вероятность получить значение  $v = 434.06$  км/с случайным образом для имеющегося фактического набора данных.

На рис. 5 представлены результаты такого анализа на основе 1000 случайных выборок для каждой группы. Так как значение  $v$  и  $T$  при каждой случайной выборке отличается от других, то они образуют распределение, показанное на рис. 5: верхняя панель — распределение случайных скоростей, нижняя панель — распределение случайных температур. На каждой из панелей вертикальными линиями показаны математическое ожидание (центральная линия; значение очень близко к среднему за период), а также положение фактически измеренных  $v$  и  $T$  для группы 1 (левая линия) и группы 2 (правая линия). Для каждой из факти-



**Рис. 5.** Распределения скорости (верхняя панель) и температуры (нижняя панель) СВ, полученные для 1000 случайных выборок из ряда наблюдений за 2000—2002 г. Показаны также фактически измеренные значения средней температуры и скорости для СВ, ассоциированного с АО (левые значения) и не ассоциированного с АО (правые значения). Указаны отклонения. См. также объяснения в тексте.

чески измеренных величин показано отклонение в стандартных девиациях,  $\sigma$ .

Таким образом, получено, что вероятность случайного получения фактического значения  $v$  для группы 1 (с АО на ЦМ) отстоит от математического ожидания на  $6.6\sigma$ ; для группы 2 — на  $4.4\sigma$ . Для температуры (нижняя панель на рис. 5) соответствующие отклонения еще выше:  $10.5\sigma$  для группы 1 и  $7.0\sigma$  для группы 2. Иными словами, несмотря на относительно незначительную разницу в параметрах СВ для групп 1 и 2, оказывается почти невозможно получить такую же разницу случайным образом при произвольной выборке точек из фактического набора измерений.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Солнечный ветер является существенно неоднородным по температуре и скорости. Причиной этой неоднородности является сложная структура

короны, которая состоит из двух основных типов объектов — корональных дыр, представляющих собой области с открытым магнитным полем, и закрытых магнитных структур (петель), присутствующих, в частности, в активных областях.

Хотя источником СВ традиционно считаются КД, широко обсуждается возможность формирования СВ также в закрытых магнитных структурах, в особенности в АО. Предполагается, что с АО может быть связана медленная компонента СВ.

С целью получить дополнительные аргументы за или против такого предположения, мы изучили 3-летний период высокой активности Солнца с 2000 по 2002 г. Так как СВ с наибольшей вероятностью достигает Земли при формировании вблизи центрального солнечного меридиана, мы отдельно изучили периоды, когда при формировании СВ на ЦМ присутствовали АО (около 40% времени), и периоды, когда АО отсутствовали (60% времени).

По нашим результатам скорость СВ, формирующегося в присутствии АО на ЦМ, в среднем, на 1% ниже, чем скорость СВ, сформированного в отсутствие АО (434.06 км/с против 438.09 км/с при погрешности измерений  $\sigma \approx 0.37$  км/с). Для температуры СВ соответствующая разница составила около 6% (94600 К против 100500 К при погрешности  $\sigma \approx 340$  К).

Так как существует сходство между параметрами плазмы (ионный состав и степень ионизации) в медленной компоненте СВ и в магнитных петлях на Солнце, мы считаем весьма вероятным, что как минимум часть медленного СВ формируется в АО. По этой причине полученный результат мы оцениваем как достоверный, подтверждающий такую возможность. Вопрос о том, являются ли АО единственным типом закрытых магнитных структур, оказывающим влияние на СВ, остается однако открытым. В частности, Фу и др. (2017) сообщали, что 42.9% медленного СВ связано с АО. Не исключено, что недостающая часть плазмы может также попадать в медленную компоненту СВ во время микро- и нановспышек (см., например, обзор Богачёв и др., 2020), а также из мелкомасштабных магнитных петель, наблюдающихся в виде горячих рентгеновских точек (Голуб и др., 1976; Рева и др., 2012). Кириченко и Богачев (2013), в частности, сообщали о наблюдательных признаках ухода плазмы с Солнца во время микровспышек. Еще одним кандидатом на вклад в СВ являются макроспикулы — плазменные джеты, наблюдающиеся на краю Солнца в спектральных линиях вакуумного УФ-диапазона, для которых также обнаружены признаки потери вещества (Лоусиф, 1994; Лобода, Богачёв, 2017, 2019).

Оцененная нами разница в параметрах СВ в присутствии и в отсутствие АО невелика (1% для скорости и 6% для температуры). Несмотря на это, данная оценка, по нашему мнению, может рассматриваться как указание на влияние АО на параметры СВ (см. рис. 2). Дополнительную погрешность вносит неопределенность времени транзита СВ до Земли (формула (1)). Хотя основное ускорение СВ происходит на близких расстояниях от Солнца, после чего его скорость меняется незначительно, представление о СВ как о радиальном течении с постоянной скоростью может исказить времена транзита на несколько часов. Это вносит искажения и в результаты сравнения параметров СВ с расположением солнечных АО. При исследовании связи СВ с КД иногда используют время пересечения ЦМ с "центром тяжести" КД (см., например, Ахтемов, Цап, 2018). Возможно, некоторое повышение точности можно получить таким способом и для АО.

Вопрос о том, понижают или повышают АО скорость и температуру СВ, в целом, не вполне тривиален. В частности, над АО часто наблюдаются долгоживущие области высокотемпературной плазмы с  $T$  порядка и более 4–5 млн К (см., например, Гречнев и др., 2006). Согласно некоторым наблюдениям, помимо обменного пересоединения, при котором плазма уходит преимущественно на краях АО, возможен уход плазмы под действием иного механизма — в результате пересоединения на больших высотах (Кулхейн и др., 2014). Если над АО присутствует высокотемпературная плазма, она таким способом может попадать в межпланетное пространство и увеличивать температуру СВ. Плазма более высокой температуры присутствует и над мелкомасштабными магнитными петлями, образуясь, в частности, во время микровспышек (Бенз, Григиз, 2002; Кириченко, Богачёв, 2013). Кроме того, так как АО являются источниками корональных выбросов массы (КВМ), с АО может быть связана не только повышенная температура, но и повышенная скорость СВ.

Несмотря на вышесказанное, мы все же делаем вывод, что при усреднении на значительных интервалах времени доминирующим воздействием АО на СВ является понижение температуры и скорости СВ. Мы ожидаем, что этот эффект окажется еще более выраженным, если впоследствии исключить из исследования интервалы времени, связанные с КВМ (всего, согласно каталогу LASCO, с 2000 по 2002 г. было зарегистрировано 171 КВМ типа "гало"), но сами мы не проводили такого исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 21-72-10157).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахтемов, Цап (Z.S. Akhtemov and Yu.T. Tsap), *Geomagnetism and Aeronomy* **58** (8), 1187 (2018).
2. Бейм и др. (S.J. Bame, J.R. Asbridge, W.C. Feldman, and J.T. Gosling), *J. Geophys. Res.* **82**, 10 (1977).
3. Бенз, Григис (Arnold O. Benz and Paolo C. Grigis), *Solar Phys.* **210**, 1 (2002)
4. Богачёв и др. (S.A. Bogachev, A.S. Ulyanov, A.S. Kirichenko, I.P. Loboda, and A.A. Reva), *Phys. Uspekhi* **63**, 8 (2020).
5. Борисенко А.В., Богачёв С.А., Письма в Астрон. журн. **46**, 802 (2020) [A.V. Borisenko and S.A. Bogachev, *Astron. Lett.* **46**, 751 (2020)].
6. Брукс, Уоррен (D.H. Brooks and H.P. Warren), *Astrophys. J. Lett.* **727**, 1 (2011).
7. Гейс и др. (J. Geiss, G. Gloeckler, and R. von Steiger), *Space Sci. Rev.* **72**, 49 (1995).

8. Голуб и др. (L. Golub, A.S. Krieger, and G.S. Vaiana), *Solar Phys.* **50**, 2 (1976).
9. Гречнев и др. (V.V. Grechnev, S.V. Kuzin, A.M. Urnov, I.A. Zhitnik, A.M. Uralov, S.A. Bogachev, M.A. Livshits, O.I. Bugaenko, et al.), *Solar System Res.* **40**, 4 (2006).
10. Жао и др. (L. Zhao, T.H. Zurbuchen, and L.A. Fisk), *Geophys. Res. Lett.* **36**, 14 (2009).
11. Кириченко А.С., Богачев С.А., Письма в Астрон. журн. **39**, 884 (2013) [A.S. Kirichenko and S.A. Bogachev, *Astron. Lett.* **39**, 797 (2013)].
12. Кириченко, Богачев (A.S. Kirichenko and S.A. Bogachev), *Astrophys. J.* **840**, 45 (2017).
13. Кригер и др. (A.S. Krieger, A.F. Timothy, and E.C. Roelof), *Solar Phys.* **29**, 2 (1973).
14. Крукер и др. (N.U. Crooker, J.T. Gosling, and S.W. Kahler), *J. Geophys. Res. (Space Phys.)* **107**, 1028 (2002).
15. Кулхейн и др. (J.L. Culhane, D.H. Brooks, L. van Driel-Gesztelyi, D. Baker, M.L. DeRosa, C.H. Mandrini, L. Zhao, et al.), *Solar Phys.* **289**, 10 (2014).
16. Лобода, Богачёв (I.P. Loboda and S.A. Bogachev), *Astron. Astrophys.* **597**, A78 (2017).
17. Лобода, Богачёв (I.P. Loboda and S.A. Bogachev), *Astrophys. J.* **871**, 2 (2019).
18. Лоусиф (M.L. Loucif), *Astron. Astrophys.* **281**, 1 (1994).
19. Мак Комас и др. (D.J. McComas, S.J. Bame, P. Barker, W.C. Feldman, J.L. Phillips, P. Riley, and J.W. Griffee), *Space Sci. Rev.* **86**, 563 (1998).
20. Макнейл и др. (A.R. Macneil, Ch.J. Owen, D. Baker, D.H. Brooks, L.K. Harra, D.M. Long, and R.T. Wicks), *Astrophys. J.* **887**, 2 (2019).
21. Накагава и др. (Y. Nakagawa, S. Nozawa, and A. Shinbori), *Earth, Planets and Space* **71**, 1 (2019).
22. Нойгебауэр и др. (M. Neugebauer, P.C. Liewer, E.J. Smith, R.M. Skoug, and T.H. Zurbuchen), *J. Geophys. Res. (Space Phys.)* **107**, 1488 (2002).
23. Ньюбури (J.A. Newbury), *EOS Transact.* **77**, 47 (1996).
24. Оуоки и др. (S.P. Owocki, T.E. Holzer, and A.J. Hundhausen), *Astrophys. J.* **275**, 354 (1983).
25. Рева и др. (A. Reva, S. Shestov, S. Bogachev, and S. Kuzin), *Solar Phys.* **276**, 97 (2012).
26. Стенсби и др. (D. Stansby, L.M. Green, L. van Driel-Gesztelyi, and T.S. Horbury), *Solar Phys.* **296**, 8 (2021).
27. Стоун и др. (E.C. Stone, A.M. Frandsen, R.A. Mewaldt, E.R. Christian, D. Margolies, J.F. Ormes, and F. Snow), *Space Sci. Rev.* **86**, 1 (1998).
28. Фелдман и др. (U. Feldman, E. Landi, and N.S. Schwadron), *J. Geophys. Res. (Space Phys.)* **110**, A7 (2005).
29. Фу и др. (H. Fu, M.S. Madjarska, L. Xia, B. Li, Zh. Huang, and Zh. Wangguan), *Astrophys. J.* **836**, 2 (2017).
30. Хундхаузен и др. (A.J. Hundhausen, H.E. Gilbert, and S.J. Bame), *Astrophys. J. Lett.* **152**, L3 (1968).
31. Юань-Куэн и др. (Ko. Yuan-Kuen, L.A. Fisk, J. Geiss, G. Gloeckler, and M. Guhathakurta), *Solar Phys.* **171**, 2 (1997).