

## СРЕДНЕМАСШТАБНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ ВНУТРИ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

© 2022 г. А. А. Хохлачев<sup>1</sup>, \*, М. О. Рязанцева<sup>1</sup>, Ю. И. Ермолаев<sup>1</sup>,  
Л. С. Рахманова<sup>1</sup>, И. Г. Лодкина<sup>1</sup>

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

\*aleks.xaa@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.03.2022 г.

После доработки 17.06.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

В работе исследуются изменения относительного содержания гелия, а также других параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на средних пространственных масштабах ( $10^5$ – $10^6$  км) внутри межпланетных проявлений корональных выбросов массы. Анализ проводился на основе долговременных измерений космического аппарата *WIND*. Показано, что на исследуемых масштабах отсутствует однозначная антикорреляция содержания гелия и плазменного параметра  $\beta$ , которая была выявлена на масштабах более  $10^6$  км. События со значимой положительной и отрицательной корреляцией регистрируются с одинаковой вероятностью. При этом могут наблюдаться как структуры с возрастанием содержания гелия одновременно с ростом модуля межпланетного магнитного поля, аналогичные наблюдаемым на больших масштабах, так и структуры, в которых содержание гелия растет со спадом величины межпланетного магнитного поля.

DOI: 10.31857/S002342062206005X

### ВВЕДЕНИЕ

Межпланетные проявления корональных выбросов массы (ICME – Interplanetary Coronal Mass Ejections) являются одним из наиболее геоэффективных крупномасштабных типов течений солнечного ветра (СВ) [1–4]. Последнее время эти явления вызывают острый интерес научной общественности [5–10]. Пространственный масштаб ICME на 1 а.е., как правило, составляет более  $10^7$  км. Скорость потока СВ заметно превышает собственную скорость космического аппарата, что позволяет оценить пространственный размер явления вдоль направления движения потока как произведение времени наблюдения явления на скорость потока. Измерения на околоземной орбите показывают, что средняя длительность наблюдения ICME составляет ~30 часов, а их скорость – около 400 км/с [11].

ICME включают в себя два типа событий: магнитные облака (MC – Magnetic Cloud), которые отличаются более высоким и регулярным межпланетным магнитным полем (ММП), и EJECTA, в которых ММП ниже по величине и сильнее варьирует. Селекция на MC и EJECTA в значительной мере определяется траекторией космического аппарата внутри ICME – для MC траектория лежит ближе к оси выброса массы, а в случае

EJECTA спутник пересекает периферийные области [7]. Более подробно методика классификации типов СВ описана в работе [11].

В работах [12–15] было показано, что для ICME в целом характерно повышенное содержание дважды ионизированных ионов гелия  $\text{He}^{++}$  (альфа-частиц) по сравнению с медленными типами течений. Однако природа этого феномена остается дискуссионной. При этом отношение плотности дважды ионизированных ионов гелия (далее по тексту кратко “гелия”) к плотности протонов – относительное содержание гелия  $N_{\alpha}/N_p$  – является одним из важных параметров состояния плазмы солнечного ветра [9, 12, 16].

В работе [17] двойным методом наложенных эпох были построены временные профили параметров для разных типов течений СВ. Сравнение профилей показало, что внутри ICME относительное содержание гелия  $N_{\alpha}/N_p$  возрастает с уменьшением протонного параметра  $\beta$  (отношения теплового давления протонов к магнитному давлению). Этот факт был интерпретирован как указание на существование внутри ICME обогащенного ионами гелия электрического тока. При этом была получена верхняя оценка размера сечения этого тока, которая равна ~10% от линейного размера сечения магнитного облака (~ $10^6$  км).

В работе [18] на основе среднечасовых данных более 40 лет измерений из базы данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) рассматривались зависимости содержания ионов гелия от параметров плазмы СВ и ММП внутри ICME. Была статистически подтверждена антикорреляция  $N_{\alpha}/N_p$  с параметром  $\beta$ , обнаруженная в работе [17]. Также было показано, что эта зависимость связана с положительной корреляцией содержания гелия с величиной межпланетного магнитного поля, тогда как четкой связи содержания гелия с тепловым давлением не было выявлено.

Вариации параметров солнечного ветра на пространственных масштабах более  $10^6$  км связаны с крупномасштабными проявлениями неоднородностей солнечной короны [19–21]. Внутри крупномасштабных структур наблюдаются среднemasштабные ( $10^5$ – $10^6$  км) структуры, на границах которых параметры (в том числе содержание гелия) могут значительно изменяться [22–25]. Вариации на этих масштабах являются отражением процессов в плазме, которые, как правило, могут быть описаны в рамках МГД подхода. Например, эти вариации могут быть связаны с альфвеновскими волнами [26, 27] или потоковыми трубками [28]. Большие по амплитуде изменения параметров плазмы и ММП часто происходят на границах потоковых трубок и могут наблюдаться за времена  $\sim 1$  мин, а в ряде случаев – нескольких секунд, и, как правило, могут быть описаны в приближении тангенциального разрыва [29]. При этом изменения величин теплового ( $NkT$ ) и магнитного ( $B^2/8\pi$ ) давлений в подобных структурах часто противоположны по знаку и обычно компенсируют друг друга, чтобы поддерживать магнитостатическое равновесие полного давления и обеспечить стационарность границ (диамагнитные структуры) [30, 31]. В большинстве случаев баланс давлений на границах структур сохраняется с точностью до 10% [29]. Обычно считается, что вклад гелиевой компоненты в тепловое давление не превышает 10% [32], но при этом не учитывается, что в ряде структур (в том числе ICME) относительное содержание гелия может увеличиваться в несколько раз по сравнению со спокойным течением СВ [12, 15], и вклад гелия в этих случаях может значительно возрастать.

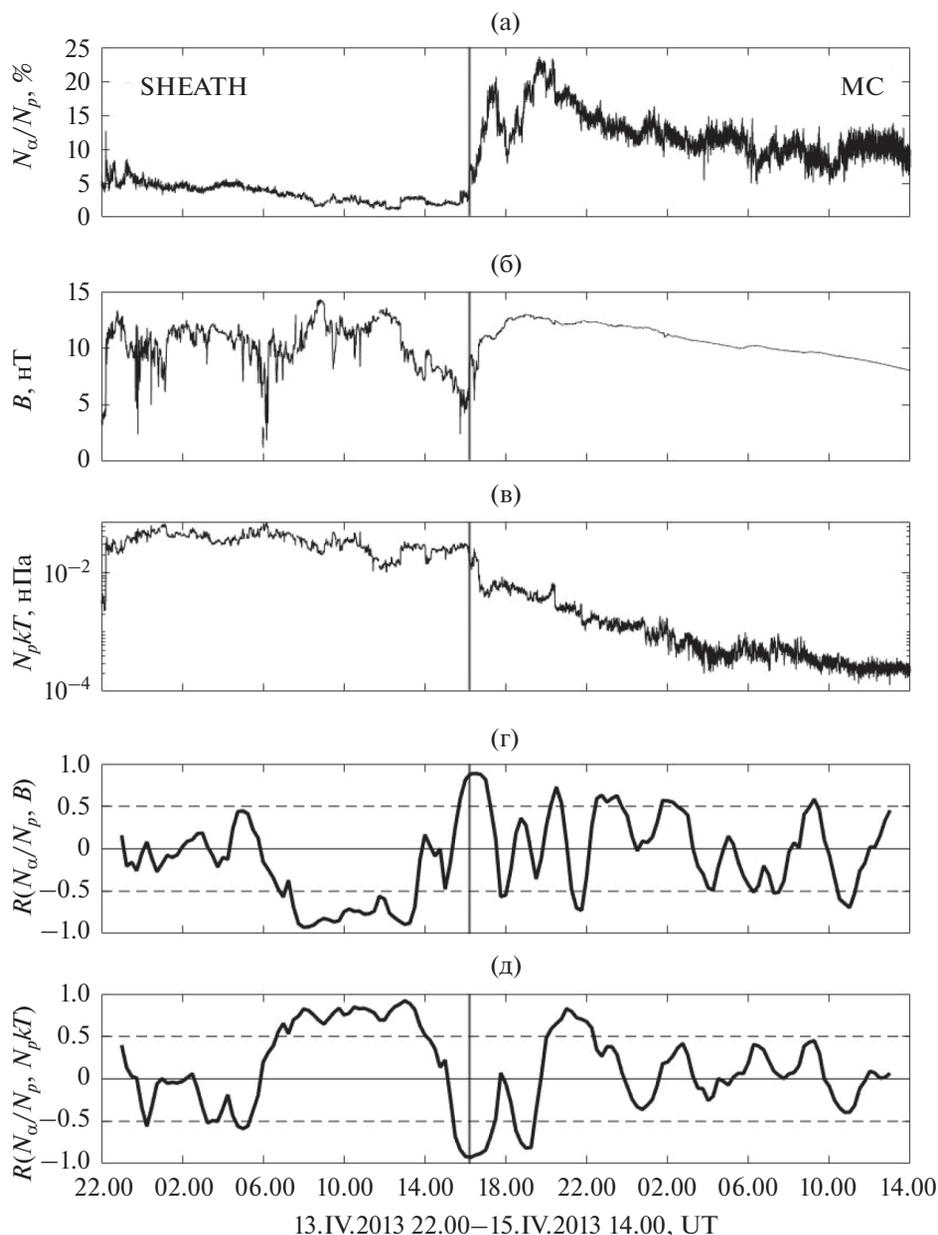
В данной статье рассматриваются изменения параметров плазмы солнечного ветра (в том числе относительного содержания гелия) и межпланетного магнитного поля внутри ICME на сравнительно редко анализируемых пространственных масштабах  $10^5$ – $10^6$  км на основе данных космического аппарата WIND. Основная цель работы – выяснить, сохраняются ли на средних масштабах тенденции, которые были ранее выявлены для поведения параметров на масштабах более  $10^6$  км [17, 18].

## 1. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

В работе использовались долговременные (с 1995 по 2020 г.) измерения параметров плазмы СВ и ММП на борту космического аппарата WIND. Анализировались данные прибора 3DP (Three-Dimensional Plasma Analyzer) [33] по плотности  $N_p$ , скорости  $V_p$ , температуре  $T$  протонов и плотности дважды ионизированных ионов гелия  $N_{\alpha}$ , а также данные прибора MFI (Magnetic Fields Investigation) [34] по величине модуля межпланетного магнитного поля  $B$ . Временное разрешение используемых данных составляло 3 с. База данных была дополнена параметрами, рассчитанными на основе измеренных: относительным содержанием гелия  $N_{\alpha}/N_p$ , тепловым давлением протонов  $N_p kT$  и плазменным протонным параметром  $\beta = N_p kT / (B^2 / 8\pi)$ . В данной работе не учитывалась зависимость теплового давления и плазменного параметра  $\beta$  от электронов и ионов гелия, так как измерения электронных и гелиевых параметров могут отсутствовать или содержать большую неопределенность. Похожим образом параметр  $\beta$  и  $N_p kT$  вычисляются в популярной базе данных измерений солнечного ветра OMNI (см. [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/bow\\_derivation.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/bow_derivation.html)) [35]. Вклад электронов и ионов гелия для отдельных событий будет рассмотрен в будущих исследованиях.

Так как объектом исследования были среднemasштабные структуры СВ, то отобранные продолжительные ряды данных были разделены на интервалы длительностью в один час (далее по тексту часовые интервалы), которые позволили анализировать структуры масштабов менее  $10^6$  км. Поскольку пространственный масштаб ICME заметно превышает  $10^6$  км (см. Введение), выбранная длительность интервалов позволяет исследовать структуры, масштаб которых заведомо меньше крупномасштабных структур СВ. Чтобы исключить потери информации вблизи границ часовых интервалов, каждый последующий интервал сдвигался относительно предыдущего на 15 мин.

Для отбора интервалов, соответствующих MC и EJESTA, использовался каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра ИКИ РАН (<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni>) [11]. Было выделено 149 событий MC и 969 событий EJESTA, длительность которых составляла от нескольких часов до нескольких суток. Количество отобранных часовых интервалов составило 14 100 для MC и 77 150 для EJESTA. При этом были исключены интервалы, которые содержали границы между крупномасштабными структурами СВ. Таким образом, вариации параметров на часовых интервалах связаны исключительно с изменениями на мелко- и среднemasштабных структурах.

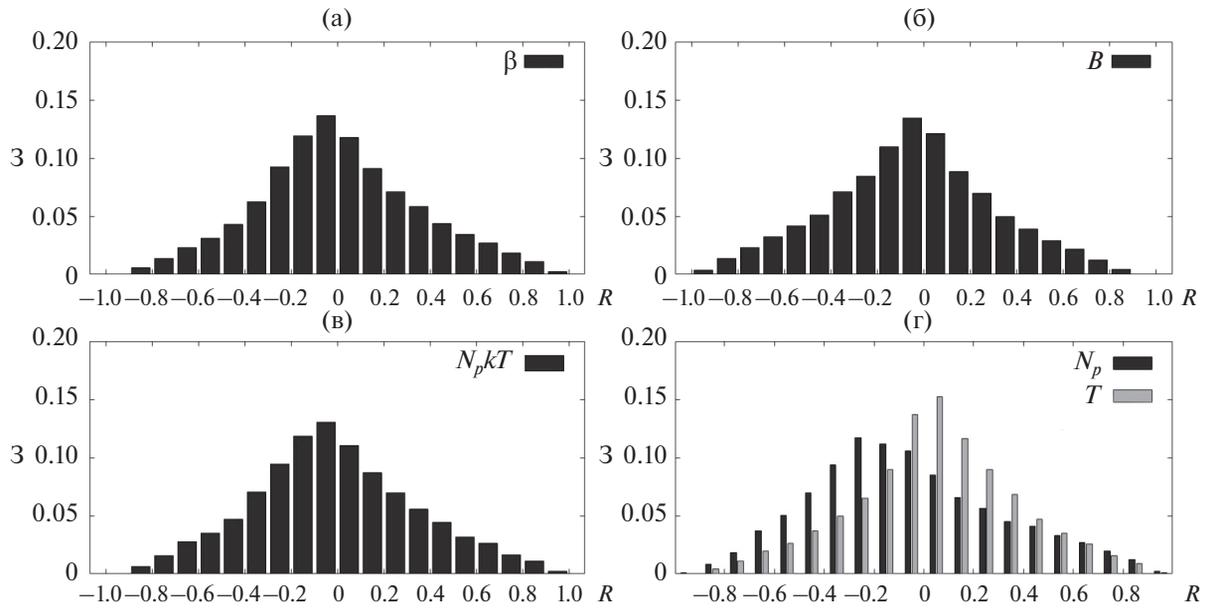


**Рис. 1.** Временной ход относительного содержания гелия  $N_{\alpha}/N_p$  (а), модуля межпланетного магнитного поля  $B$  (б) и теплового давления  $N_p kT$  (в). Панели (г) и (д) показывают динамику значений коэффициентов корреляции  $R(N_{\alpha}/N_p, B)$ ,  $R(N_{\alpha}/N_p, N_p kT)$  на двухчасовых интервалах (см. раздел 1). Вертикальная линия обозначает границу между событиями SHEATH и MC.

Для каждого из рассмотренных часовых интервалов анализировались медианные значения параметров на интервале, а также коэффициенты корреляции  $R$ , которые рассчитывались между временными рядами измерений относительного содержания гелия  $N_{\alpha}/N_p$  и одного из параметров: плазменного параметра  $\beta$ , величины магнитного поля  $B$ , теплового давления  $N_p kT$ , плотности  $N_p$  или температуры  $T$  протонов. Коэффициент корреляции между временными рядами двух параметров ниже в тексте и на рисунках обозначается

как  $R(x_1, x_2)$ , где  $x_1$  и  $x_2$  — соответствующие параметры. Например,  $R(N_{\alpha}/N_p, B)$  — коэффициент корреляции между содержанием гелия и величиной ММП. На основе полученной информации проводился статистический анализ связи относительного содержания гелия с параметрами плазмы СВ и ММП.

Рассчитанные коэффициенты корреляции могут значительно отличаться от аналогичных коэффициентов корреляции, вычисленных для крупномасштабной структуры в целом. На рис. 1



**Рис. 2.** Распределения коэффициентов корреляции  $R$  между содержанием гелия  $N_{\alpha}/N_p$  и плазменным параметром  $\beta$  (а), величиной ММП  $B$  (б), тепловым давлением  $N_p kT$  (в), плотностью  $N_p$  (г, черные бины) и температурой  $T$  (г, серые бины) протонов для МС. По оси ординат отложена вероятность  $\omega$ .

для примера приведен временной интервал с 22.00 13.IV.2013 по 14.00 15.IV.2013, который включает в себя два крупномасштабных явления солнечного ветра – магнитное облако МС и область сжатой плазмы перед ним SHEATH (область SHEATH отображена для примера и не рассматривается подробно в данной работе). На трех верхних панелях (рис. 1а–1в) показан временной ход относительного содержания гелия, величины ММП и теплового давления на этом интервале. Хорошо видна граница МС в  $\sim 16.00$ , после которой наблюдается значительное возрастание содержания гелия (с 5 до 20%) одновременно с резким ростом величины магнитного поля, при этом внутри МС  $B$  меняется плавно, тогда как  $N_{\alpha}/N_p$  значительно варьирует.

Если рассматривать отдельно интервал 14.IV.2013 16.00–15.IV.2013 14.00, который соответствует магнитному облаку, с точки зрения больших масштабов, на рис. 1а и рис. 1б можно заметить тенденцию к положительной корреляции содержания гелия  $N_{\alpha}/N_p$  и величины магнитного поля  $B$ . При этом коэффициенты корреляции между временным ходом параметров для данной крупномасштабной структуры принимают следующие значения:  $R_{\text{МС}}(N_{\alpha}/N_p, B) = 0.8$ ,  $R_{\text{МС}}(N_{\alpha}/N_p, N_p kT) = -0.4$ , что хорошо согласуется с результатами работы [18]. Однако на интервалах меньшего масштаба значения коэффициентов корреляции между этими параметрами сильно варьируют и могут принимать как значимые положительные, так и отрицательные значения. Это хорошо видно на рис. 1г и рис. 1д, где отображены изменения коэффициен-

тов корреляции  $R(N_{\alpha}/N_p, B)$ ,  $R(N_{\alpha}/N_p, N_p kT)$  с течением времени. В данном примере корреляция  $R$  между параметрами для наглядности рассчитывалась на отдельных двухчасовых интервалах с временным сдвигом относительно друг друга на 15 мин.

Таким образом, в магнитном облаке корреляция относительного содержания гелия с величиной межпланетного магнитного поля наблюдается лишь в среднем на больших масштабах, а локально на масштабах  $10^5$ – $10^6$  км существует множество тонких структур, в которых  $N_{\alpha}/N_p$  может как коррелировать, так и антикоррелировать с  $B$ . Более подробный анализ подобных структур рассмотрен ниже. Идентификация структур проводилась на основе измерений плотности протонов и ионов гелия.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа связи относительного содержания гелия с другими параметрами на отобранных часовых интервалах исследовались коэффициенты корреляции  $R$  следующих пар параметров:  $N_{\alpha}/N_p$  и  $\beta$ ;  $N_{\alpha}/N_p$  и  $B$ ;  $N_{\alpha}/N_p$  и  $N_p kT$ ;  $N_{\alpha}/N_p$  и  $N_p$ , а также  $N_{\alpha}/N_p$  и  $T$ . Распределения соответствующих коэффициентов корреляции для интервалов внутри МС показаны на рис. 2, для интервалов внутри ЕЈЕСТА – на рис. 3. Видно, что на интервалах в обоих типах ICME распределения коэффициентов корреляции между содержанием гелия и параметром  $\beta$ , величиной магнитного поля, тепло-

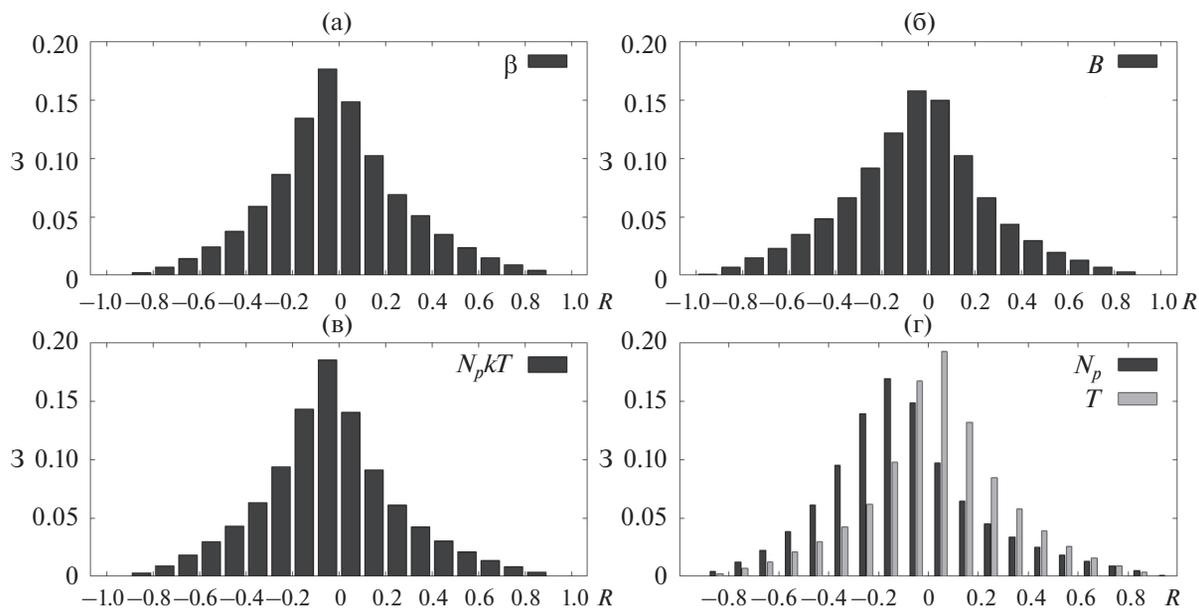


Рис. 3. Те же распределения, что и на рис. 2, но для ЕЈЕСТА.

вым давлением, а также температурой протонов близки к симметричным, при этом средние и медианные значения  $R$  близки к нулю. К примеру, медиана  $R(N_{\alpha}/N_p, B)$  равна  $-0.05$  для обоих типов ICME, а медиана  $R(N_{\alpha}/N_p, N_p kT)$  составляет  $-0.01$  для событий MC и  $-0.04$  для событий ЕЈЕСТА. Распределение  $R(N_{\alpha}/N_p, N_p)$  смещено в сторону отрицательных значений, что ожидаемо, поскольку по определению величина относительного содержания гелия является отношением плотности гелия к плотности протонов. Следует отметить, что коэффициенты корреляции для всех пар параметров имеют широкие распределения — наблюдаются случаи со значимой положительной или отрицательной корреляцией между параметрами. Например, если рассматривать корреляцию содержания гелия и величины магнитного поля, число случаев с  $R(N_{\alpha}/N_p, B) \leq -0.6$  равно 1024 для MC и 3589 для ЕЈЕСТА, что составляет  $\sim 7$  и  $\sim 5\%$  соответственно, а с  $R(N_{\alpha}/N_p, B) \geq 0.6$  — 544 для MC и 1744 для ЕЈЕСТА ( $\sim 4$  и  $\sim 2\%$ ).

В качестве примеров интервалов с высокими положительными или отрицательными значениями коэффициентов корреляции в работе рассматриваются два интервала, для которых на рис. 4 и 5 показан временной ход параметров: относительного содержания гелия  $N_{\alpha}/N_p$ , параметра  $\beta$ , величины ММП  $B$ , теплового давления  $N_p kT$ , плотности протонов  $N_p$  и гелия  $N_{\alpha}$ , а также температуры протонов  $T$ .

На рис. 4 приведен пример структуры на интервале с 08.15 до 09.15 28.II.2012 внутри магнитного облака, которое наблюдалось с 19.00 27.II.2012 по 11.00 28.II.2012. Коэффициенты корреляции между содержанием гелия и параметром  $\beta$ , величиной

ММП, тепловым давлением на данном часовом интервале принимают следующие значения:  $R(N_{\alpha}/N_p, \beta) = 0.82$ ,  $R(N_{\alpha}/N_p, B) = -0.82$ ,  $R(N_{\alpha}/N_p, N_p kT) = 0.87$ . То есть наблюдается высокая антикорреляция содержания гелия с величиной магнитного поля, а также положительная корреляция с тепловым давлением и плазменным параметром  $\beta$ . При этом коэффициент корреляции между величиной магнитного поля и тепловым давлением составляет  $R(B, N_p kT) = -0.97$ . Таким образом, на анализируемом интервале отсутствует тенденция к корреляции содержания гелия и магнитного поля, характерная для крупномасштабной структуры ICME [18], и при этом явно наблюдается тенденция к сохранению баланса давлений в рассматриваемой структуре (см. Введение). В выделенной цветом области на рисунке видно, что содержание гелия растет одновременно с уменьшением величины магнитного поля. Длительность структуры составляет приблизительно 25 мин ( $\sim 6 \cdot 10^5$  км), при этом толщина ее границ не превышает 1–2 мин ( $2\text{--}5 \cdot 10^4$  км). Известно, что подобные структуры часто встречаются в солнечном ветре [23, 29].

На рис. 5 приведен пример структуры на интервале 08.X.2011 с 12.15 до 13.15 внутри события типа ЕЈЕСТА 08.X.2011 05.00–08.X.2011 14.00. Значения коэффициентов корреляции между соответствующими параметрами составляют:  $R(N_{\alpha}/N_p, \beta) = -0.74$ ,  $R(N_{\alpha}/N_p, B) = 0.82$ ,  $R(N_{\alpha}/N_p, N_p kT) = -0.43$ . В данном случае видна высокая положительная корреляция относительного содержания гелия с величиной магнитного поля и высокая антикорреляция с плазменным параметром  $\beta$ . В области, выделенной на рисунке цветом, хоро-

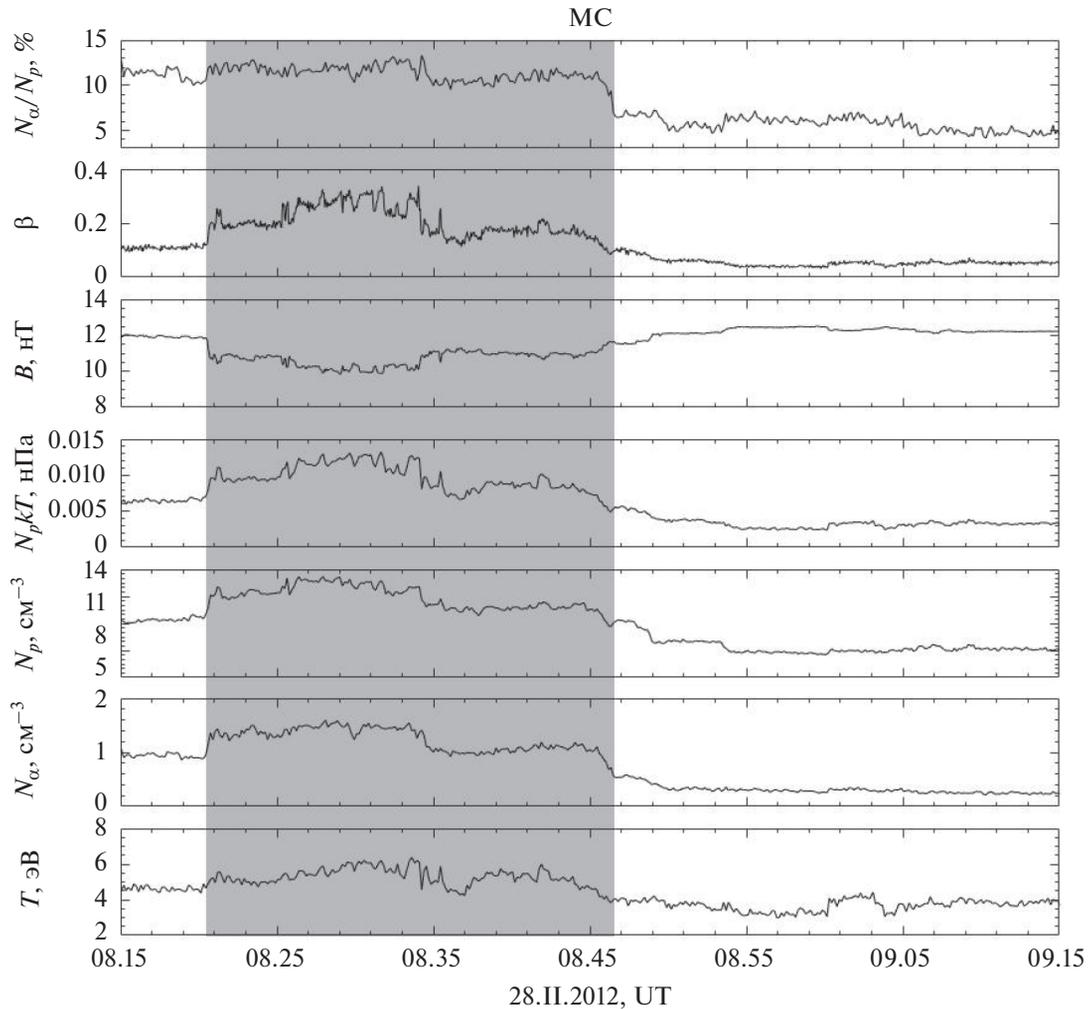


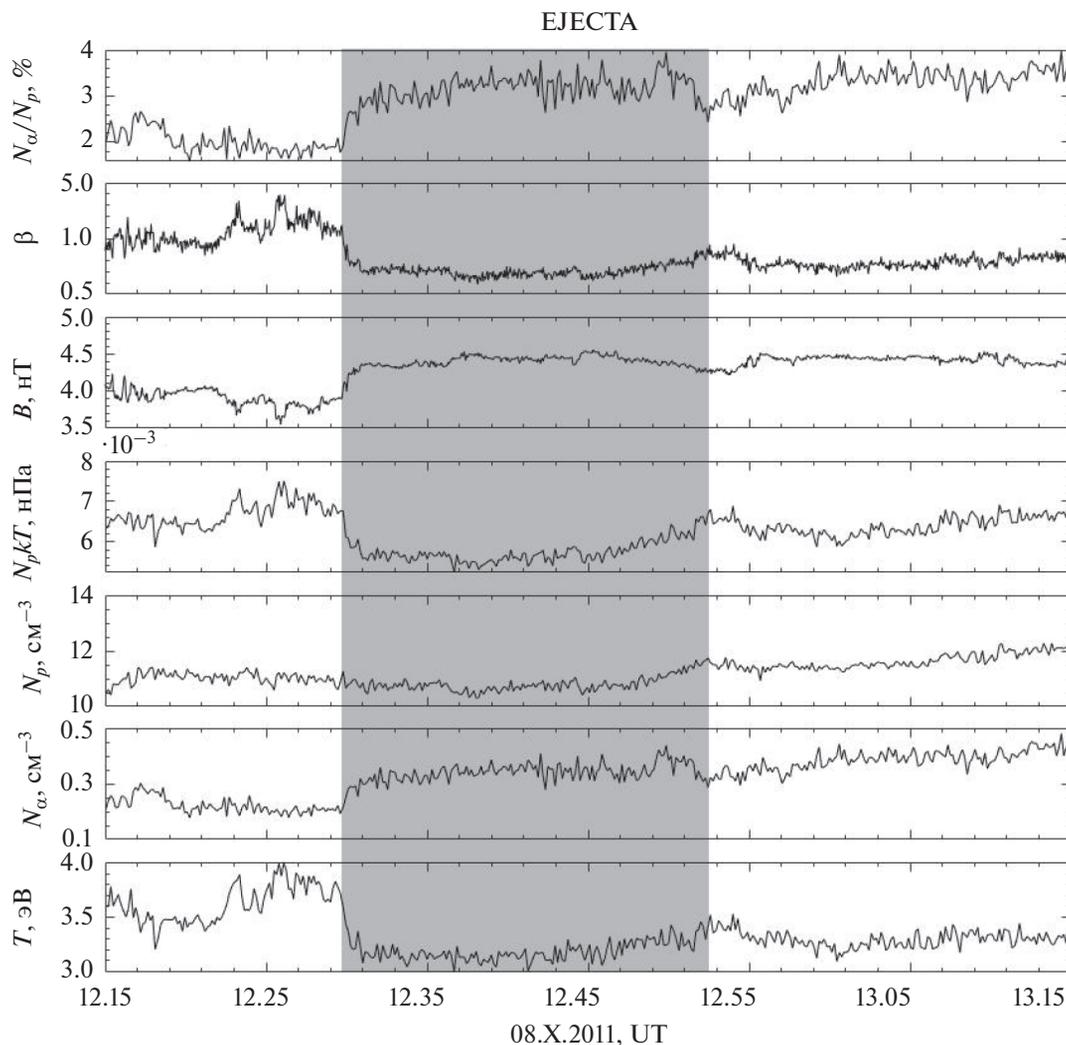
Рис. 4. Временной ход параметров на интервале 28.11.2012 08.15–09.15, который находится внутри МС (см. раздел 2). Цветом выделена область со среднемасштабной структурой  $\sim 6 \cdot 10^5$  км.

шо виден рост содержания гелия на фоне увеличения модуля межпланетного магнитного поля — причем относительное содержание гелия растет за счет увеличения плотности гелия, а не за счет падения плотности протонов. Таким образом, в данной структуре, продолжительность которой составляет около 22 мин ( $\sim 5 \cdot 10^5$  км), наблюдается ситуация, аналогичная крупномасштабным изменениям в ICME [18]. При этом содержание гелия на интервале антикоррелирует с тепловым давлением, однако величина коэффициента корреляции по модулю сравнительно невелика. Коэффициент корреляции между величиной магнитного поля и тепловым давлением составляет  $R(B, N_p kT) = -0.59$ , т.е. для этого интервала также характерна антикорреляция теплового и магнитного давлений, указывающая на сохранение баланса давлений на границах исследуемой среднемасштабной структуры.

Рассмотренные примеры свидетельствуют о том, что в локальных областях внутри ICME рост

содержания гелия может наблюдаться как при увеличении, так и при уменьшении величины магнитного поля. При этом среднемасштабные структуры, на которых содержание гелия растет одновременно с величиной магнитного поля, что характерно для больших масштабов в ICME в целом, встречаются сравнительно редко. Примерно в два раза чаще наблюдаются интервалы с ростом содержания гелия при спаде величины магнитного поля внутри ICME. В то же время как в случаях положительной, так и отрицательной корреляции содержания гелия с величиной магнитного поля встречаются структуры с антикорреляцией магнитного поля и теплового давления, т.е. имеется тенденция к сохранению баланса давлений.

Также важным вопросом является то, при каких условиях в солнечном ветре наблюдаются подобные структуры со значимой положительной или отрицательной корреляцией. В данной работе была рассмотрена связь значений коэффициентов корреляции между парами параметров СВ с



**Рис. 5.** Временной ход параметров на интервале 8.X.2011 12.15–13.15, который находится внутри ЕЈЕСТА (см. раздел 2). Цветом выделена область со среднемасштабной структурой  $\sim 5 \cdot 10^5$  км.

медианными величинами исследуемых параметров. Для этого отобранные для анализа интервалы были разделены на группы по величине коэффициента корреляции и для каждой группы вычислялись медианные значения параметров плазмы и магнитного поля.

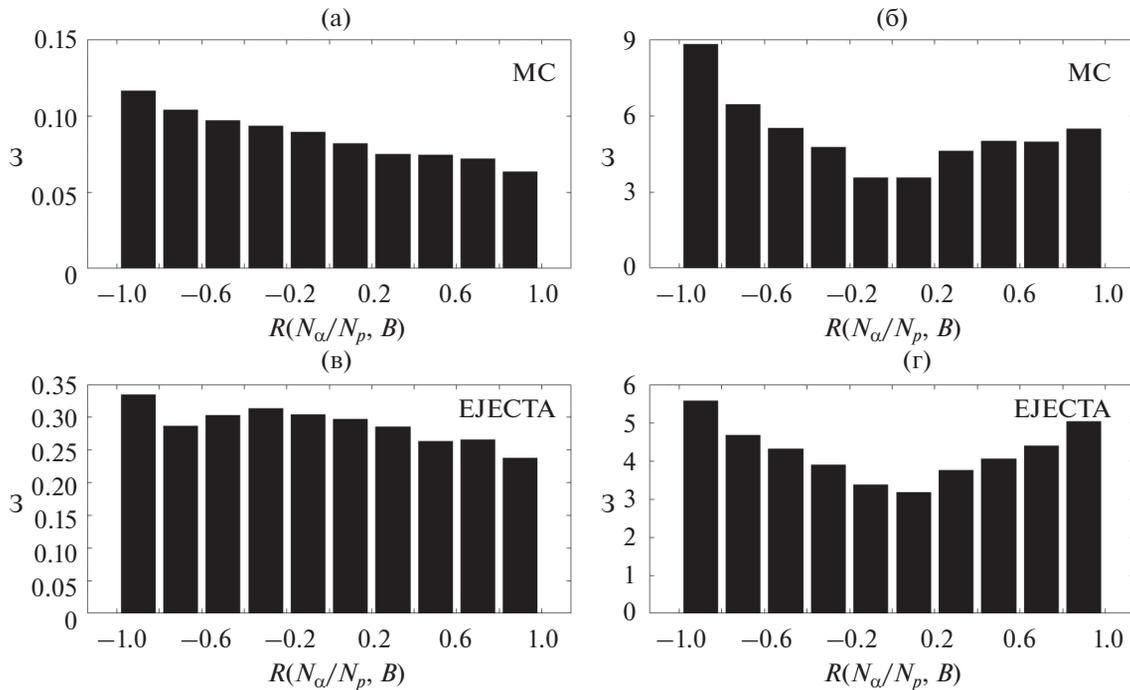
На рис. 6 представлены медианные значения параметра  $\beta$  и теплового давления для групп интервалов с разными значениями коэффициента корреляции  $R(N_\alpha/N_p, B)$  в МС и в ЕЈЕСТА. По оси абсцисс на этих гистограммах отложены диапазоны коэффициента корреляции от  $-1$  до  $1$  с шагом  $0.2$ . По оси ординат – медианные значения параметров, рассчитанные для групп интервалов, в которых величина  $R(N_\alpha/N_p, B)$  попадала в соответствующий диапазон значений коэффициента корреляции. Аналогичные гистограммы для медианных значений других параметров от  $R(N_\alpha/N_p, B)$ , а также от значений корреляции  $R$  между другими

парами параметров не приводятся, так как на них не было обнаружено значимых зависимостей. На гистограммах можно выделить следующие особенности:

1. Положительная корреляция  $R(N_\alpha/N_p, B) > 0.6$  соответствует более низким медианным значениям параметра  $\beta$ , чем высокая отрицательная корреляция. Особенно четко это видно для событий типа МС.

2. Модуль коэффициента корреляции между содержанием гелия и величиной магнитного поля повышается с ростом медианного значения теплового давления на интервале, причем при наиболее высоких значениях медианы  $N_p kT$  наблюдается высокая степень антикорреляции  $R(N_\alpha/N_p, B) < -0.8$ .

Первая особенность согласуется с результатами, которые были получены для масштабов  $\sim 10^7$  км, и может указывать на существование на масштабах



**Рис. 6.** Медианные значения параметра  $\beta$  и теплового давления  $N_p kT$  для разных значений коэффициента корреляции  $R(N_\alpha/N_p, B)$  между содержанием гелия и величиной ММП в МС (а, б) и в ЕЈЕСТА (в, г). Каждый бин обозначает группу интервалов с соответствующими значениями коэффициента корреляции.

$10^5$ – $10^6$  км токовых структур, обогащенных ионами гелия, схожих с электрическим током внутри ICME, гипотеза о существовании которого на масштабах  $\sim 10^6$  км выдвигалась ранее [17]. Вторая свидетельствует о том, что для интервалов, на которых содержание гелия антикоррелирует с магнитным полем, характерен более высокий уровень теплового давления. При этом на подобных интервалах может наблюдаться тенденция к балансу давлений – пример такого события приведен на рис. 4. По-видимому, в этом случае условия в меньшей степени способствуют формированию электрического тока.

Отметим, что на масштабах  $10^7$  км корреляция содержания гелия и величины ММП наблюдается, как правило, в МС – т.е. приблизительно в 10% всех наблюдаемых ICME [36]. Этот факт был объяснен тем, что электрический ток занимает область размером  $\sim 10^6$  км, т.е. лишь 10% от размера ICME. Поэтому и на масштабах меньше  $10^6$  км электрический ток может иметь достаточно малые размеры и занимать небольшую часть всей области. Таким образом, полученные на масштабах  $10^5$ – $10^6$  км результаты не противоречат выдвинутой ранее гипотезе об универсальном законе природы, заключающемся в многослойном характере токовых слоев в плазме разного происхождения, обогащенной малыми тяжелыми ионными компонентами [37].

## ВЫВОДЫ

В данной работе на основе данных 26-летних измерений космического аппарата *WIND* исследовалась связь относительного содержания ионов гелия  $N_\alpha/N_p$  с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля внутри ICME на средних пространственных масштабах  $10^5$ – $10^6$  км. Анализ полученных результатов показал следующее:

1. В отличие от больших масштабов ( $\sim 10^7$  км) [17, 18], на средних масштабах  $10^5$ – $10^6$  км отсутствует однозначная антикорреляция содержания гелия и параметра  $\beta$  как в МС, так и в ЕЈЕСТА.
2. На средних масштабах также отсутствует однозначная корреляция содержания гелия с величиной магнитного поля, т.е. рост содержания гелия в ICME может наблюдаться как при увеличении, так и при уменьшении величины магнитного поля.
3. Выявлено существование внутри ICME среднemasштабных структур с высокой корреляцией содержания гелия и величины магнитного поля, а также структур с четкой антикорреляцией этих двух параметров. Подобные структуры, как правило, встречаются на фоне антикорреляции магнитного поля и теплового давления, т.е. наблюдается тенденция к сохранению баланса давлений на структурах.

Таким образом, характер связи содержания гелия с другими параметрами солнечного ветра для структур среднего масштаба может отличаться в среднем от аналогичной зависимости в крупномасштабных структурах. На исследуемых масштабах выявлены структуры с тенденцией к балансу давлений. В некоторых из этих структур вместе с ростом модуля ММП может возникать локальная корреляция относительного содержания гелия с величиной магнитного поля — иными словами, можно предположить, что существуют более мелкие нити электрического тока, в которых поведение параметров аналогично обогащенному ионами гелия крупномасштабному току внутри ICME [17].

Авторы выражают благодарность создателям базы данных CDAWeb (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html>) за возможность использования ее в работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gopalswamy N., Yashiro S., Xie H.* Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds during solar cycles 23 and 24 // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. P. 9221–9245. <https://doi.org/10.1002/2015JA021446>
2. *Temmer M.* Space weather: the solar perspective // *Living Rev. Sol. Phys.* 2021. V. 18. Article number 4. <https://doi.org/10.1007/s41116-021-00030-3>
3. *Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G. et al.* Large-scale solar wind structures: occurrence rate and geoeffectiveness // *AIP Conference Proceedings*. 2010. V. 1216. P. 648–651. <https://doi.org/10.1063/1.3395949>
4. *Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G. et al.* Geoeffectiveness and efficiency of CIR, Sheath, and ICME in generation of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. A00L07. <https://doi.org/10.1029/2011JA017139>
5. *Jian L.K., Russell C.T., Luhmann J.G. et al.* Properties of interplanetary coronal mass ejections at one AU during 1995–2004 // *Solar Physics*. 2006. V. 239. P. 393–436. <https://doi.org/10.1007/s11207-006-0133-2>
6. *Wu C.-C., Lepping R.P.* Comparisons of characteristics of magnetic clouds and cloud-like structures during 1995–2012 // *Solar Physics*. 2015. V. 290. P. 1243–1269. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0656-5>
7. *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: 2. Comparisons of CIRs vs. Sheaths and MCs vs. Ejecta // *Solar Physics*. 2017. V. 292. P. 193. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1205-1>
8. *Zhang J., Temmer M., Gopalswamy N. et al.* Earth-affecting solar transients: a review of progresses in solar cycle 24 // *Prog. Earth Planet. Sci.* 2021. V. 8. 56. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00426-7>
9. *Zurbuchen T.H., Richardson I.G.* In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 123. P. 31–43. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9010-4>
10. *Zurbuchen T.H., Weberg M., Von Steiger R. et al.* Composition of coronal mass ejections // *Astrophysical J.* 2016. V. 826. № 1. P. 10. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/10>
11. *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г. и др.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* 2009. Т. 47. № 2. С. 99–113. (*Cosmic Research*. P. 81–94.) <https://doi.org/10.1134/S0010952509020014>
12. *Ермолаев Ю.И.* Наблюдение ионов He<sup>++</sup> в солнечном ветре // *Космич. исслед.* 1994. Т. 32. № 1. С. 93–125. (*Cosmic Research*. P. 71.)
13. *Feldman W.C., Asbrige J.R., Bame S.J. et al.* Longterm variations of selected solar wind properties: IMP 6, 7 and 8 results // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. № 5. P. 2177–2189. <https://doi.org/10.1029/JA083IA05P02177>
14. *Hirshberg J., Bame S.J., Robbins D.E.* Solar flares and solar wind helium enrichments: July 1965–July 1967 // *Sol. Phys.* 1972. V. 23. P. 467–486. <https://doi.org/10.1007/BF00148109>
15. *Yermolaev Yu.I., Stupin V.V.* Helium abundance and dynamics in different types of solar wind streams: The Prognost 7 observations // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № A2. P. 2125–2136. <https://doi.org/10.1029/96JA01635>
16. *Geiss J.* Processes affecting abundances in the solar wind // *Space Sci. Rev.* 1982. V. 33. P. 201–217. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-7953-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-009-7953-6_9)
17. *Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. et al.* Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis: 4. Helium abundance // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 7. <https://doi.org/10.1029/2020JA027878>
18. *Хохлачев А.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. и др.* Вариации содержания гелия в межпланетных выбросах корональной массы (ICME) // *Космич. исслед.* 2022. Т. 60. № 2. С. 93–98. (*Cosmic Research*. P. 67–72.) <https://doi.org/10.31857/S0023420622020042>
19. *Kasper J.C., Stevens M.L., Lazarus A.J. et al.* Solar wind helium abundance as a function of speed and heliographic latitude variation through a solar cycle // *Astrophysical J.* 2007. V. 660. № 1. P. 901–910. <https://doi.org/10.1086/510842>
20. *Richardson J.D., Richardson I.G., Kasper J.C. et al.* Helium variation in the solar wind // *Proc. ISCS 2003 Symposium*. 2003. ESA SP-535. P. 521–526.
21. *Schwenn R.* Solar Wind Sources and Their Variations over the Solar Cycle // *Solar Dynamics and Its Effects on the Heliosphere and Earth* / eds. Baker D.N., Klecker B., Schwartz S.J., Schwenn R., Steiger R. *Space Sciences Series of ISSI*. V. 22. N. Y.: Springer, 2007. P. 51–76. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-69532-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-69532-7_5)
22. *Ермолаев Ю.И.* Где образуются среднемасштабные вариации солнечного ветра? // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54. № 2. С. 174–175. <https://doi.org/10.7868/s0016794014020096>

23. *Borovsky J.E.* Flux tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU? // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № A08.  
<https://doi.org/10.1029/2007JA012684>
24. *Owens M.J., Wicks R.T., Horbury T.S.* Magnetic Discontinuities in the Near-Earth Solar Wind: Evidence of In-Transit Turbulence or Remnants of Coronal Structure? // *Solar Physics.* 2011. V. 269. № 2. P. 411–420.  
<https://doi.org/10.1007/S11207-010-9695-0>
25. *Tu C.-Y., Marsch E.* MHD structures, waves and turbulence in the solar wind: observations and theories // *Space Science Reviews.* 1995. V. 73. P. 1–210.  
<https://doi.org/10.1007/BF00748891>
26. *Bavassano B.* Recent observations of MHD fluctuations in the solar wind // *Ann. Geophys.* 1994. V. 12. P. 97–104.  
<https://doi.org/10.1007/s00585-994-0097-1>
27. *Malara F., Primavera L., Veltri P.* Compressive fluctuations generated by time evolution of Alfvénic perturbations in the solar wind current sheet // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № A10. P. 21597–21617.  
<https://doi.org/10.1029/96JA01637>
28. *Bruno R., Carbone V., Veltri P. et al.* Identifying intermittency events in the solar wind // *Planet. Space Sci.* 2001. V. 49. № 12. P. 1201–1210.  
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(01\)00061-7](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(01)00061-7)
29. *Riazantseva M.O., Zastenker G.N., Richardson J.D. et al.* Sharp boundaries of small- and middle-scale solar wind structures // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A12110.  
<https://doi.org/10.1029/2005JA011307>
30. *Burlaga L.F., Ogilvie K.W.* Magnetic and Thermal Pressures in the Solar Wind // *Solar Physics.* 1970. V. 15. № 1. P. 61–71.  
<https://doi.org/10.1007/BF00149472>
31. *Riazantseva M.O., Zastenker G.N., Richardson J.D.* The characteristics of sharp (small-scale) boundaries of solar wind plasma and magnetic field structures // *Adv. Space Res.* 2005. V. 35. № 12. P. 2147–2151.  
<https://doi.org/10.1016/J.ASR.2004.12.011>
32. *Neugebauer M., Snyder C.W.* Mariner 2 observations of the solar wind average properties: 1. Average Properties // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. P. 4469–4484.  
<https://doi.org/10.1029/JZ0711019P04469>
33. *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. V. 71. P. 125–153.  
<https://doi.org/10.1007/BF00751328>
34. *Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F. et al.* The WIND magnetic field investigation // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71. P. 207.  
<https://doi.org/10.1007/BF00751330>
35. *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № A2. A02209.  
<https://doi.org/10.1029/2004JA010649>
36. *Ермолаев Ю.И.* Оценка размера электрического тока с повышенным содержанием гелия внутри магнитного облака // *Космич. исслед.* 2019. Т. 57. № 6. С. 477–478. (*Cosmic Research.* P. 471–472.).  
<https://doi.org/10.1134/S0023420619060049>
37. *Grigorenko E.E., Shuvalov S.D., Malova H.V. et al.* Imprints of quasi-adiabatic ion dynamics on the current sheet structures observed in the Martian magnetotail by MAVEN // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* 2017. V. 122. № 10. P. 176–193.  
<https://doi.org/10.1002/2017JA024216>