

ВАРИАЦИИ ПРОТОНОВ И ДВАЖДЫ ИОНИЗИРОВАННЫХ ИОНОВ ГЕЛИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

© 2021 г. А. А. Хохлачев¹, *, М. О. Рязанцева¹, Л. С. Рахманова¹,
Ю. И. Ермолаев¹, И. Г. Лодкина¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*aleks.xaa@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.03.2021 г.

После доработки 04.05.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В работе исследуются вариации на масштабах 10^4 – 10^5 км и локальные пространственные неоднородности плотности протонов N_p , дважды ионизированных ионов гелия (α -частиц) N_α и относительного содержания гелия N_α/N_p в солнечном ветре. Анализируются измерения на двух космических аппаратах *СПЕКТР-Р* и *WIND*, разнесенных в пространстве на расстояние более 1 млн км, и определяется коэффициент корреляции между измерениями соответствующих параметров на различных временных интервалах. Для интервалов с высоким в целом уровнем корреляции параметров плазмы проанализированы вариации уровня локальной (на более коротких подынтервалах) корреляции. Показано, что сравнительно часто встречаются области с низким уровнем локальной корреляции всех исследуемых параметров. Уровень локальной корреляции зависит от типа крупномасштабного течения солнечного ветра, а также от переносной скорости потока и степени вариабельности потока. Кроме того, низкий уровень локальной корреляции часто характеризуется отрицательной компонентой B_x межпланетного магнитного поля. Выделены области локальных пространственных неоднородностей по плотностям протонов, гелия и относительному содержанию гелия и проведена оценка их размера.

DOI: 10.31857/S0023420621060029

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, течение солнечного ветра (СВ) носит неламинарный характер, и в нем наблюдаются разнообразные вариации физических свойств на различных пространственных и временных масштабах [1, 2]. Часть этих вариаций связана с крупномасштабными ($>10^6$ км) проявлениями неоднородностей солнечной короны [3, 4], часть – с альфеновскими волнами [5, 6] или потоковыми трубками [7, 8] на масштабах $\sim 10^5$ – 10^6 км. На малых масштабах ($<10^5$ км) резкие и большие по амплитуде изменения параметров связаны, как правило, с различными разрывами в плазме [9–11].

Сравнение измерений параметров на нескольких КА является эффективным методом исследования пространственной неоднородности плазмы, а также динамики структур солнечного ветра и оценки их характерных масштабов. Так, в работе [12] авторы анализировали структуры магнитного поля солнечного ветра на двух аппаратах и показали, что характерные корреляционные длины составляют $\sim 45 R_E$ ($\sim 2.9 \cdot 10^5$ км, R_E – часто используемая в магнитосферной физике величина радиуса Земли, равная 6371.2 км) в радиальном

направлении и $\sim 80 R_E$ ($\sim 5.1 \cdot 10^5$ км) в поперечном направлении. В работах [13–16] сравнивались измерения параметров при значительном разнесении аппаратов в плоскости, перпендикулярной направлению Солнце–Земля, и было выявлено, что коэффициент корреляции в среднем значительно снижается при увеличении расстояния от $50 R_E$ ($\sim 3.2 \cdot 10^5$ км) до $90 R_E$ ($\sim 5.7 \cdot 10^5$ км). Также было показано, что наиболее важными факторами, влияющими на корреляцию параметров, измеренных на двух разнесенных аппаратах, являются: степень изменчивости параметров, направление вектора межпланетного магнитного поля к линии Солнце–Земля и переносная скорость солнечного ветра. Отметим, что оценки масштабов исследуемых структур в вышеуказанных работах в среднем соответствуют диаметру потоковых трубок в солнечном ветре [7].

Наряду с протонной компонентой, вариации которой хорошо изучены (см. ссылки выше), в СВ содержится $\sim 4\%$ двукратно ионизированных ионов гелия He^{++} (альфа-частиц), параметры которых также варьируют. Гелиевую компоненту солнечного ветра начали изучать в одно время с началом регулярных измерений солнечного ветра

в 1960-х гг. [17, 18], и эти исследования остаются актуальными и в настоящее время. Одним из наиболее важных параметров состояния плазмы солнечного ветра является относительное содержание ионов гелия N_{α}/N_p — отношение плотности гелия N_{α} к плотности протонов N_p , сильные изменения которого на больших масштабах являются проявлением смены коронального источника [19–22]. Таким образом, сравнение параметров гелиевой и протонной компоненты солнечного ветра помогает понять свойства верхней короны Солнца и особенности механизмов формирования солнечного ветра в ней. Относительное содержание гелия в среднем составляет около 2–3% в медленном спокойном СВ, около 4–5% в быстрых потоках из корональных дыр и может увеличиваться примерно в 2–4 раза (до ~20%) в событиях ICME [1, 21, 23]. Измерения на околоземной орбите показывают [24–26], что границы между разными крупномасштабными явлениями часто сопровождаются значительными изменениями содержания гелия. При этом такие изменения могут происходить сравнительно быстро — за времена порядка нескольких секунд. Так, например, в работе [27] было показано, что наблюдается резкое возрастание содержания ионов гелия вблизи межпланетных ударных волн. Кроме того, имеется зависимость относительного содержания гелия от цикла солнечной активности [28]. В периоды максимума солнечной активности, когда происходит максимальное количество транзитных явлений в солнечной короне, относительное содержание гелия имеет самые высокие значения. При уменьшении количества подобных явлений, вблизи минимумов солнечной активности, наблюдается в среднем минимальное значение относительного содержания гелия.

Помимо изменения относительного содержания гелия на границах крупномасштабных структур, оно также может значительно (от нескольких процентов до десятков процентов) варьировать за времена порядка единиц-десятков секунд [29, 30]. При этом в работе [29] показано, что быстрые вариации относительного содержания ионов гелия, как правило, наблюдаются на фоне положительной корреляции плотностей гелия и протонов, а отрицательная корреляция встречается в 3–5 раз реже, чем положительная. Также авторы показали, что в потоке солнечного ветра можно выделить области с постоянным характером связи плотностей протонов и ионов гелия на масштабах ~50–300 с. В работе [30] показано, что еще меньшие по масштабу вариации относительного содержания гелия (на временах ~3–30 с) происходят на фоне отсутствия заметных изменений других параметров плазмы, и предполагается, что большинство таких переходов связано с турбулентными процессами в солнечном ветре.

Несмотря на то, что исследованиям относительного содержания гелия в солнечном ветре посвящено значительное число работ (например, работы [24–26, 28] и ссылки в них), в большинстве из них рассматриваются усредненные среднечасовые значения параметров протонов и ионов гелия. Мелкомасштабная динамика гелиевой компоненты исследуется сравнительно редко (например, в [27, 29, 30]), и эти исследования носят несистематический характер. В данной работе рассматриваются вариации плотности протонов и дважды ионизированных ионов гелия в солнечном ветре на масштабах 10^4 – 10^5 км на основе кросс-корреляционного анализа измерений параметров плазмы на КА *СПЕКТР-Р* и *WIND* с высоким временным разрешением. Кроме того, исследуются локальные пространственные неоднородности потока (структуры, наблюдаемые только одним из КА) и анализируются их свойства. В отличие от работ [13–16], описанных выше, в данной работе рассматриваются корреляции на меньших временных масштабах. Кроме того, уделяется внимание вариациям плотности гелия и относительного содержания гелия, не рассмотренным в указанных выше работах.

1. МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для исследования вариаций протонов и дважды ионизированных ионов гелия (далее по тексту “гелия” для краткости) в работе использовались измерения параметров плазмы (плотности, скорости, температуры протонов, плотности и относительного содержания ионов гелия) на КА *СПЕКТР-Р* (спектрометр БМСВ [31, 32]) и на КА *WIND* (спектрометры SWE [33] и 3DP [34]). Также привлекались измерения параметров межпланетного магнитного поля на КА *WIND* (магнитометр MFI [35]). КА *WIND* и *СПЕКТР-Р* были разнесены в среднем на $230 R_E$ ($\sim 1.5 \cdot 10^6$ км) вдоль оси X GSE системы координат (направленной на Солнце) и вплоть до $140 R_E$ ($\sim 8.9 \cdot 10^5$ км) в плоскости YZ , перпендикулярной оси X . При этом расстояния между аппаратами вдоль оси X и в поперечном направлении в явном виде не связаны между собой. Использовались измерения, представленные в соответствующих базах данных: <http://catalog-sw-msh.plasma-f.cosmos.ru/>, <http://aurora.troja.mff.cuni.cz/spekt-r/project/> для прибора БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* и <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> для приборов SWE, 3DP и MFI на КА *WIND*. Временное разрешение используемых данных составило 3 с для приборов БМСВ и 3DP, 60 с для прибора MFI и 90 с для прибора SWE.

Для проведения анализа отбирались интервалы одновременных измерений вышеупомянутых параметров в солнечном ветре на обоих КА за период с 2011 по 2015 гг. Данный период затрагивает

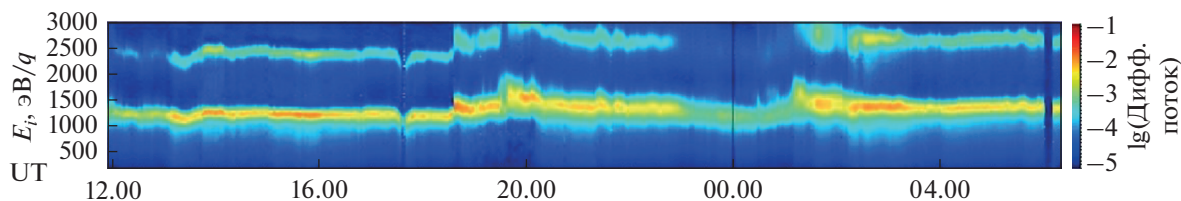


Рис. 1. Энергетическая спектрограмма потока ионов солнечного ветра для одного из интервалов (19.IV.2014 12.00–20.IV.2014 06.00 UT) по измерениям прибора БМСВ на КА СПЕКТР-Р.

три фазы 24 цикла солнечной активности: фазу роста солнечной активности в 2011–2012 гг., фазу максимума солнечной активности в 2012–2014 гг. и фазу спада солнечной активности в 2015 г. Основным критерием отбора интервалов было наличие отчетливой компоненты гелия на энергетических спектрограммах прибора БМСВ (<http://aurora.troja.mff.cuni.cz/spektr-r/project/>). Помимо этого, продолжительность исследуемых интервалов должна составлять не менее четырех часов, а также не должно быть длительных промежутков с отсутствием измерений. На рис. 1 показан пример энергетической спектрограммы в диапазоне 120–3000 эВ/заряд. Цветом показана интенсивность потока: синий цвет показывает минимум интенсивности, красный цвет – максимальную интенсивность. На спектрограмме четко видно два максимума. Из них наиболее интенсивный нижний, при значениях 1000–1500 эВ/заряд, соответствует протонам, а верхний, менее интенсивный, с максимумом около 2000–3000 эВ/заряд – дважды ионизированным ионам гелия. Измерения энергетических спектров прибором БМСВ, как правило, производились в диапазоне 100–3000 эВ/заряд, в результате чего при значениях переносной скорости потока ≥ 550 км/с максимум, соответствующий дважды ионизированным ионам гелия, выходил за пределы диапазона, и гелий не мог быть зарегистрирован прибором. При высоких температурах протонов (> 15 эВ) выделение гелия из интегрального потока также было затруднено. В итоге для анализа был отобран 41 интервал с длительностью от четырех часов до полутора суток и общей продолжительностью ~ 500 ч.

Измерения на двух КА сравнивались путем проведения кросс-корреляционного анализа плотности протонов, плотности и относительно содержания гелия с помощью специально разработанного программного обеспечения. Работа программы делится на четыре этапа, которые проводились для каждой из четырех пар измерений на двух КА: плотности протонов по измерениям приборов БМСВ и SWE, плотности протонов, гелия и относительного содержания гелия по измерениям приборов БМСВ и ZDP.

На первом этапе рассчитывался временной сдвиг dT_0 между измерениями на КА СПЕКТР-Р и WIND, соответствующий примерному времени

распространения солнечного ветра между аппаратами: $dT_0 = r/V$, где r – расстояние между КА вдоль линии Солнце–Земля, V – величина переносной скорости солнечного ветра.

На втором этапе для каждого из рассматриваемых параметров проводилось вычисление коэффициента корреляции R на всем интервале (далее по тексту – крупномасштабный коэффициент корреляции) и временного сдвига dT_1 , при котором достигалось максимальное значение коэффициента корреляции:

$$dT_1 = \max(R(N_{s/c1}(t + dt), N_{s/c2}(t))),$$

$$dT_0 - 30 \text{ мин} < dt < dT_0 + 30 \text{ мин},$$

где $N_{s/c1}(t)$ – временной ряд рассматриваемого параметра по измерениям на КА WIND, $N_{s/c2}(t)$ – аналогичный временной ряд по измерениям на спутнике СПЕКТР-Р, R – коэффициент кросс-корреляции между указанными временными рядами, t – время измерений, dt – текущий сдвиг временного ряда $N_{s/c1}(t)$ относительно временного ряда $N_{s/c2}(t)$, dT_1 – временной сдвиг между данными после корректировки. При этом текущий сдвиг dt и, соответственно, конечный сдвиг dT_1 не могут отличаться от расчетного времени распространения потока между спутниками dT_0 более чем на 30 мин.

На третьем этапе проводилось разбиение рассматриваемого интервала на более короткие подынтервалы длительностью в 1 ч (всего было выделено 866 подынтервалов). Соседние подынтервалы перекрывали друг друга на 30 мин, что позволило избежать потери информации на их границах.

После этого для каждого подынтервала аналогично второму этапу вычислялся коэффициент корреляции R_{loc} (далее по тексту – локальный коэффициент корреляции) и временной сдвиг dT_2 (локальный временной сдвиг), при котором достигалось максимальное значение R_{loc} :

$$dT_2 = \max(R_{loc}(N_{s/c1}(t_{sub_int} + dt), N_{s/c2}(t_{sub_int}))),$$

$$dT_1 - 30 \text{ мин} < dt < dT_1 + 30 \text{ мин}.$$

Здесь так же, как и выше, $N_{s/c1}(t)$ и $N_{s/c2}(t)$ – временные ряды рассматриваемых параметров, измеренных на КА WIND и СПЕКТР-Р соответственно,

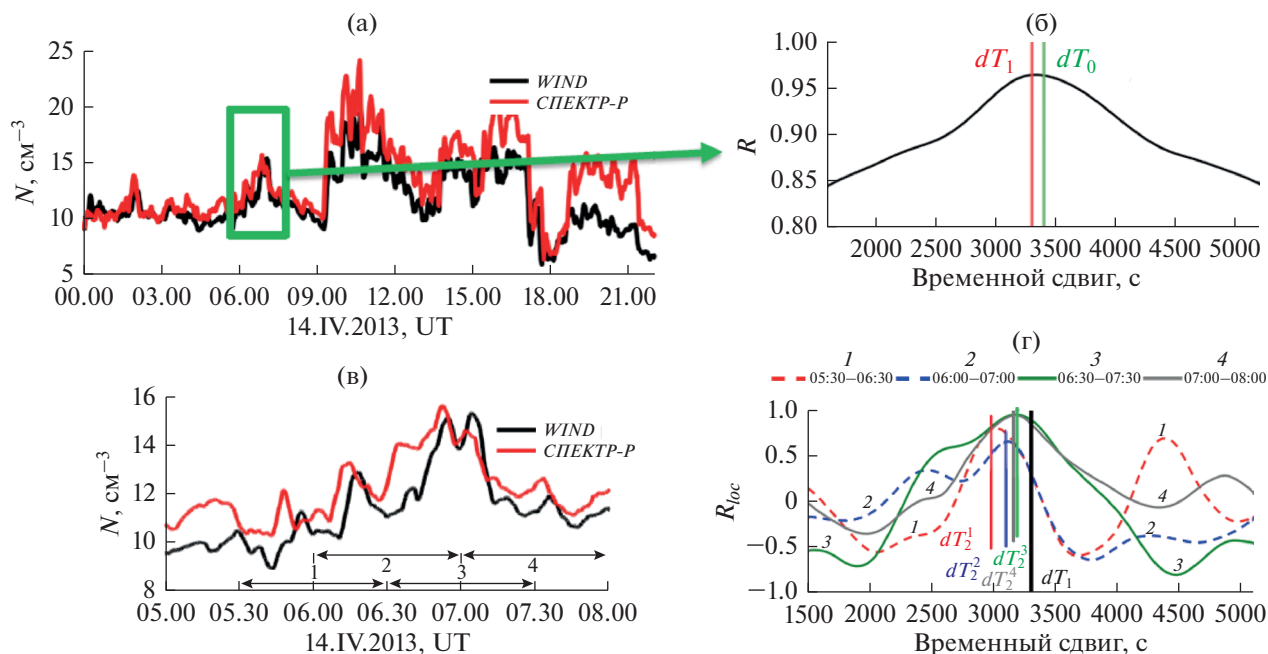


Рис. 2. (а) Пример измерений плотности протонов по данным КА *WIND* (прибор 3DP, черная линия) и *СПЕКТР-Р* (прибор БМСВ, красная линия) для события 14.IV.2013. Измерения по *WIND* сдвинуты на dT_1 (см. текст). (б) Зависимость коэффициента корреляции R между временными рядами измерений плотности протонов от сдвига по времени между временными рядами dt для рассматриваемого примера. (в) Измерения плотности протонов на двух КА 14.IV.2013 на трехчасовом интервале. Стрелками показаны границы некоторых подынтервалов часовой длительности, на которые разбивался изначальный интервал (см. текст). (г) Зависимости коэффициентов корреляции R_{loc} между временными рядами измерений плотности на двух КА от временного сдвига dt между ними на подынтервалах, выделенных на рисунке (в).

R_{loc} — коэффициент кросс-корреляции между этими рядами, t_{sub_int} — время измерений, dt — текущий сдвиг между временными рядами, dT_2 — конечный временной сдвиг или, другими словами, уточненное время распространения потока для конкретного подынтервала.

Выше представлен алгоритм работы программы на примере одного из отобранных интервалов: 14.IV.2013 00.00–22.00. На рис. 2а показан временной ход плотности протонов по измерениям прибора БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* (красная линия) и прибора SWE на КА *WIND* (черная линия). На рис. 2б показана зависимость крупномасштабного коэффициента корреляции R от временного сдвига между временными рядами измерений dt . Для рассматриваемого в качестве примера интервала расстояние между спутниками составило $253 R_E$ ($\sim 1.6 \cdot 10^6$ км), а переносная скорость потока была равна ~ 475 км/с. Таким образом, $dT_0 \approx 3400$ с, соответственно, dt лежит в пределах от 1600 до 5200 с. Максимум функции зависимости коэффициента корреляции R от сдвига dt четко виден и приходится на $dt = 3300$ с, поэтому фактическое время распространения потока между аппаратами dT_1 отличается на 100 с от расчетного времени распространения dT_0 . Временной ход плотности протонов по данным КА *WIND* на рис. 2а сдвинут на время dT_1 . Видно хо-

рошее соответствие положения границ плазменных структур, наблюдаемых на обоих КА. На рис. 2в показан выделенный на рис. 2а интервал 05.00–08.00, который включает в себя следующие подынтервалы: 05.00–06.00, 05.30–06.30, 06.00–07.00, 06.30–07.30, 07.00–08.00. На рис. 2г показаны зависимости локальных коэффициентов корреляции R_{loc} на четырех вышеуказанных подынтервалах, которые помечены разными цифрами на рис. 2в и 2г, от сдвига dt . Аналогично сказанному выше для всего интервала в целом, фактическое время распространения между аппаратами dT_2 равно сдвигу dt , при котором коэффициент корреляции на конкретном подынтервале максимален.

По результатам проведения кросс-корреляционного анализа для всех четырех пар исследуемых параметров (плотности протонов по измерениям приборов БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* и SWE на КА *WIND*, плотности протонов, гелия и относительного содержания гелия по измерениям приборов БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* и 3DP на КА *WIND*) составлялась сводная таблица. Для каждого рассматриваемого подынтервала таблица включала в себя значения коэффициентов крупномасштабной R и локальной R_{loc} корреляции, временные сдвиги dT_1 и dT_2 , рассчитанные для каждой пары измерений, средние значения, величины стандартного отклонения SD и относительного стан-

дартного отклонения RSD рассмотренных параметров, а также средние значения остальных параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Таблица дополнялась координатами КА в системе координат GSE в момент измерений и расстоянием между КА в плоскости YZ $dL = \sqrt{(Y_{WIND} - Y_{СПЕКТР-Р})^2 + (Z_{WIND} - Z_{СПЕКТР-Р})^2}$. Кроме того, для каждого подынтервала определялся и записывался в таблицу тип крупномасштабного течения, к которому он относился. Тип течения солнечного ветра определялся с помощью каталога крупномасштабных явлений ИКИ (<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>, [36]). Среди анализируемых интервалов были выделены следующие типы течений: медленные и быстрые квазистационарные потоки (SLOW, FAST), межпланетные выбросы корональной массы (MC, EJECTA), области сжатой плазмы (SHEATH, CIR) и гелиосферный токовый слой (HCS). В силу приборных ограничений (см. выше по тексту) на рассмотренных интервалах, соответствующих быстрым потокам FAST, MC и EJECTA, скорость составляла менее 550 км/с. Распределение типов течений в рассмотренной выборке интервалов показано на рис. 3, где каждый столбец гистограммы соответствует одному из крупномасштабных типов течений, а на оси ординат отложена вероятность наблюдения данного типа течения в рассмотренной выборке.

Для дальнейшего анализа отобраны подынтервалы, в которых крупномасштабный коэффициент корреляции составил $R > 0.7$. Такое значение коэффициента корреляции указывает на качественно хорошее соответствие структур, наблюдаемых на двух аппаратах, и дает основание утверждать, что одни и те же крупномасштабные структуры последовательно пролетели мимо обоих космических аппаратов. Доля подобных подынтервалов составила $\sim 75\%$ от общего количества.

Измерения прибора SWE (КА WIND) в основном использовались для проверки данных, так как прибор 3DP в ряде случаев дает заниженные значения плотности протонов. Результаты анализа показали, что между коэффициентами корреляции, вычисленными по парам приборов SWE-БМСВ и 3DP-БМСВ, практически отсутствует разница, поэтому ниже приводятся результаты для пар измерений, проведенных приборами БМСВ (КА СПЕКТР-Р) и 3DP (КА WIND).

На базе полученной сводной таблицы проводился дальнейший статистический анализ величины локального коэффициента корреляции на отобранных подынтервалах при разных условиях и в различных типах крупномасштабных явлений солнечного ветра, а также исследование связи коэффициента корреляции и характеристик плазмы солнечного ветра.

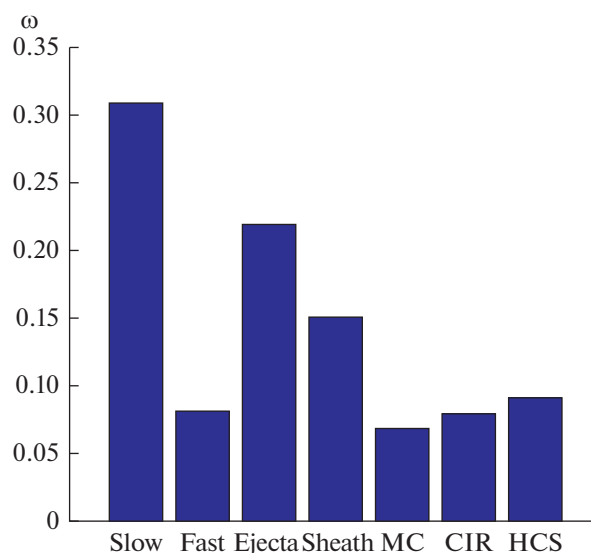


Рис. 3. Распределение типов течений солнечного ветра на отобранных для анализа подынтервалах.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Статистический анализ локальных коэффициентов корреляций по плотности протонов, гелия и относительному содержанию гелия

В интервалах, отобранных для анализа, изменения параметров плазмы на двух разнесенных в пространстве КА WIND и СПЕКТР-Р, как правило, хорошо соответствуют друг другу. Как уже говорилось ранее в разделе 1, были отобраны только те интервалы, в которых крупномасштабный коэффициент корреляции составил $R > 0.7$. При этом локально могут наблюдаться существенные отличия между структурами, регистрируемыми на разных КА. В таких случаях локальный коэффициент корреляции R_{loc} на часовом подынтервале может быть значительно ниже крупномасштабного коэффициента корреляции R . На рис. 4 представлен пример длительного интервала измерений относительного содержания ионов гелия на КА WIND (прибор 3DP) и на КА СПЕКТР-Р (прибор БМСВ) 19.IV.2014 12.00–20.IV.2014 06.00. Коэффициент крупномасштабной корреляции на интервале составил $R = 0.81$, а сдвиг по времени $dT_1 = 3060$ с. При этом можно выделить отдельные подынтервалы с существенно различающимся значением локального коэффициента корреляции. Так, на подынтервале 1 (19.IV.2014 13.30–14.30) $R_{loc} = 0.97$, и видно, что локальная плазменная структура детально повторяется по наблюдениям на обоих КА. На подынтервале 3 (20.IV.2014 01.00–02.00) $R_{loc} = 0.83$, плазменная структура регистрируется обоими спутниками, но ее форма значительно различается, в связи с чем коэффициент корреляции ниже, чем на

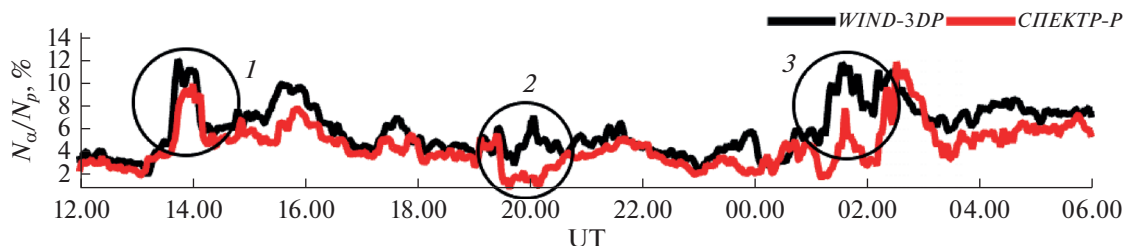


Рис. 4. Измерения относительного содержания гелия по данным КА WIND (прибор 3DP, черная линия) и СПЕКТР-Р (прибор БМСВ, красная) для события 19.IV.2014.

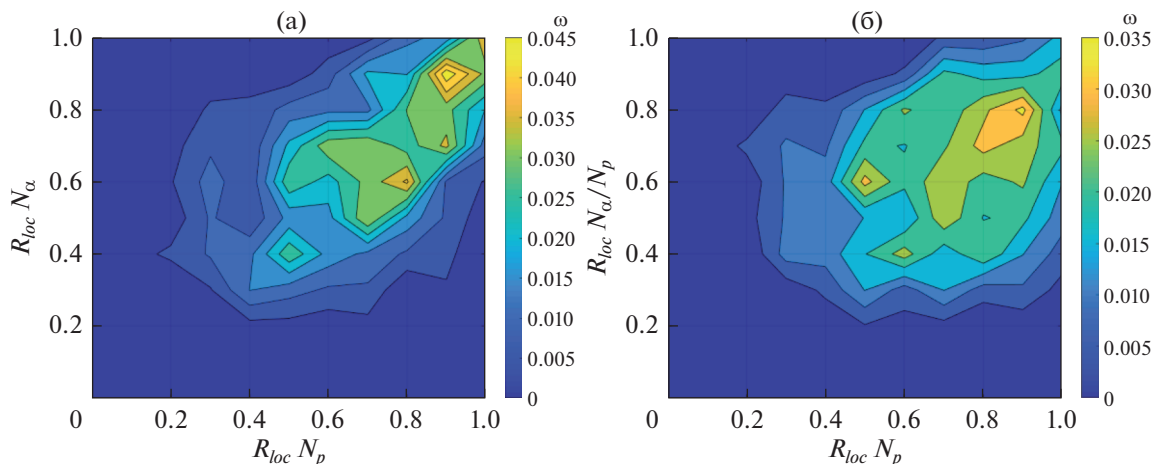


Рис. 5. Распределения локальных коэффициентов корреляций R_{loc} по плотности (а) и относительному содержанию гелия (б) в зависимости от локального коэффициента R_{loc} по плотности протонов.

подынтервале 1. На подынтервале 2 (19.IV.2014 19.30–20.30) $R_{loc} = 0.13$, и видно, что на фоне хорошего соответствия временного хода относительного содержания гелия на двух КА на всем интервале в целом на данном подынтервале на КА WIND наблюдается локальная плазменная структура, которая не видна по измерениям на КА СПЕКТР-Р. Подобные случаи можно интерпретировать как локальные плазменные неоднородности, размер которых в плоскости, перпендикулярной линии Солнце–Земля, меньше, чем расстояние между КА.

На рис. 5 представлены двумерные статистические распределения локальных коэффициентов корреляций R_{loc} : по плотности протонов (по оси X на обеих панелях), по плотности гелия (по оси Y на рис. 5а) и по относительному содержанию гелия (по оси Y на рис. 5б). Цветом на рисунках показана вероятность наблюдения R_{loc} в фиксированном диапазоне значений. Соответственно, значения R_{loc} для каждого из параметров разделены на 10 диапазонов с шагом 0.1.

Примерно в половине случаев значение локального коэффициента корреляции превышает 0.6 для каждого из рассматриваемых параметров. Однако, как видно из рисунка, для значительного

числа подынтервалов $R_{loc} < 0.6$. Число таких случаев составляет ~40% для плотности протонов, ~45% для плотности гелия и ~55% для относительного содержания гелия. В среднем же значение R_{loc} равно 0.65 по плотности протонов, 0.61 по плотности гелия и 0.58 по относительному содержанию гелия.

Кроме того, рис. 5 также показывает связь значений локальных коэффициентов корреляций для различных параметров друг с другом. Видно, что, как правило, при высоком значении R_{loc} по плотности протонов также наблюдаются высокие значения R_{loc} для плотности и относительного содержания гелия. Однако можно выделить случаи, когда при высоких значениях локального коэффициента корреляции по одному из параметров $R_{loc} > 0.7$ наблюдаются низкие значения $R_{loc} < 0.6$ по другому параметру. Подобное несоответствие наблюдается в ~15% всех случаев. Из них 10% приходится на ситуации, когда при высоких значениях локального коэффициента корреляции по протонам наблюдаются низкие значения коэффициентов корреляции по гелию, и 5% — на зеркальные случаи, где при низких значениях коэффициента корреляции по плотности протонов значения коэффициента корреляции по плотности гелия сравнительно высоки. Этот результат

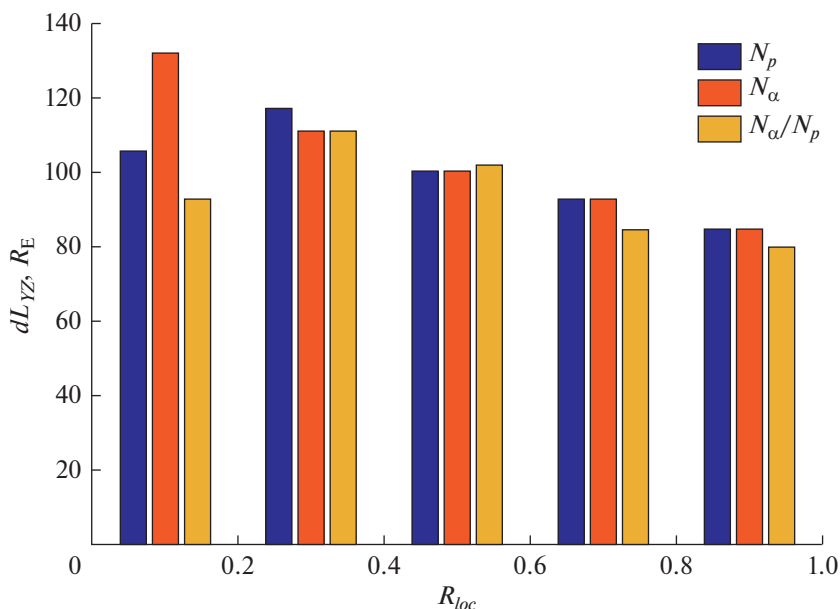


Рис. 6. Связь расстояния между спутниками в плоскости YZ и локального коэффициента корреляции R_{loc} по плотности протонов N_p , гелия N_α и относительному содержанию гелия N_α/N_p .

свидетельствует о том, что локальные неоднородности в плазме, т.е. ситуации, когда возмущение по протонам или гелию регистрируется только одним из КА, могут наблюдаться только по одному из рассматриваемых параметров, тогда как по второму параметру будет сохраняться хорошее соответствие его временного хода на обоих КА.

2.2. Факторы, определяющие локальные коэффициенты корреляции по плотности протонов, гелия и относительному содержанию гелия

Как было показано в разделе 2.1, низкие значения R_{loc} могут быть связаны с локальными неоднородностями в плазме, наблюдаемыми только одним из двух КА. В связи с этим сравнение R_{loc} на подынтервалах с различным взаимным расположением аппаратов дает возможность грубо оценить размеры этих локальных неоднородностей: если расстояние между аппаратами в плоскости, перпендикулярной линии Солнце–Земля, превышает размер неоднородностей, возмущение будет видно только на одном КА, и, соответственно, коэффициент локальной корреляции будет принимать низкие значения. На рис. 6 показана связь коэффициентов локальной корреляции R_{loc} для всех рассмотренных параметров с расстоянием между спутниками в плоскости YZ . Весь набор подынтервалов был разделен на 5 групп по значению коэффициента корреляции R_{loc} в диапазонах с шагом 0.2. По оси абсцисс указаны диапазоны значений соответствующего локального коэффициента корреляции, а по оси ординат показаны

медианные значения расстояний между космическими аппаратами в плоскости YZ на подынтервалах со значениями R_{loc} , которые принадлежат этим диапазонам. Различными цветами показаны гистограммы локальных коэффициентов корреляции для разных пар параметров (плотности протонов N_p , плотности гелия N_α и относительного содержания гелия N_α/N_p). Видно, что наиболее высокие коэффициенты корреляции наблюдаются для интервалов с медианным значением расстояния $\sim 85 R_E$ ($\sim 5.4 \cdot 10^5$ км), тогда как низкий коэффициент корреляции, напротив, характерен для тех интервалов, где медианное значение расстояния в плоскости YZ превышает $110 R_E$ ($\sim 7 \cdot 10^5$ км). Таким образом, увеличение расстояния между спутниками приводит к уменьшению значений локальных коэффициентов корреляции. Хотя по этим результатам нельзя точно определить масштаб возможных локальных неоднородностей (для этого нужны измерения как минимум с еще одного спутника), но можно предположить, что размер этих неоднородностей в плоскости YZ составляет $\sim 85 R_E$ ($\sim 5.4 \cdot 10^5$ км). Эта ситуация наблюдается для локальных неоднородностей как по плотности протонов, так и по плотности и относительному содержанию гелия. Отметим, что эти оценки близки к корреляционным длинам, определенным в работах [12–16]. Результаты упомянутых работ относятся к измерениям протонов, оценки для корреляций по плотности и относительному содержанию гелия получены в данной работе впервые.

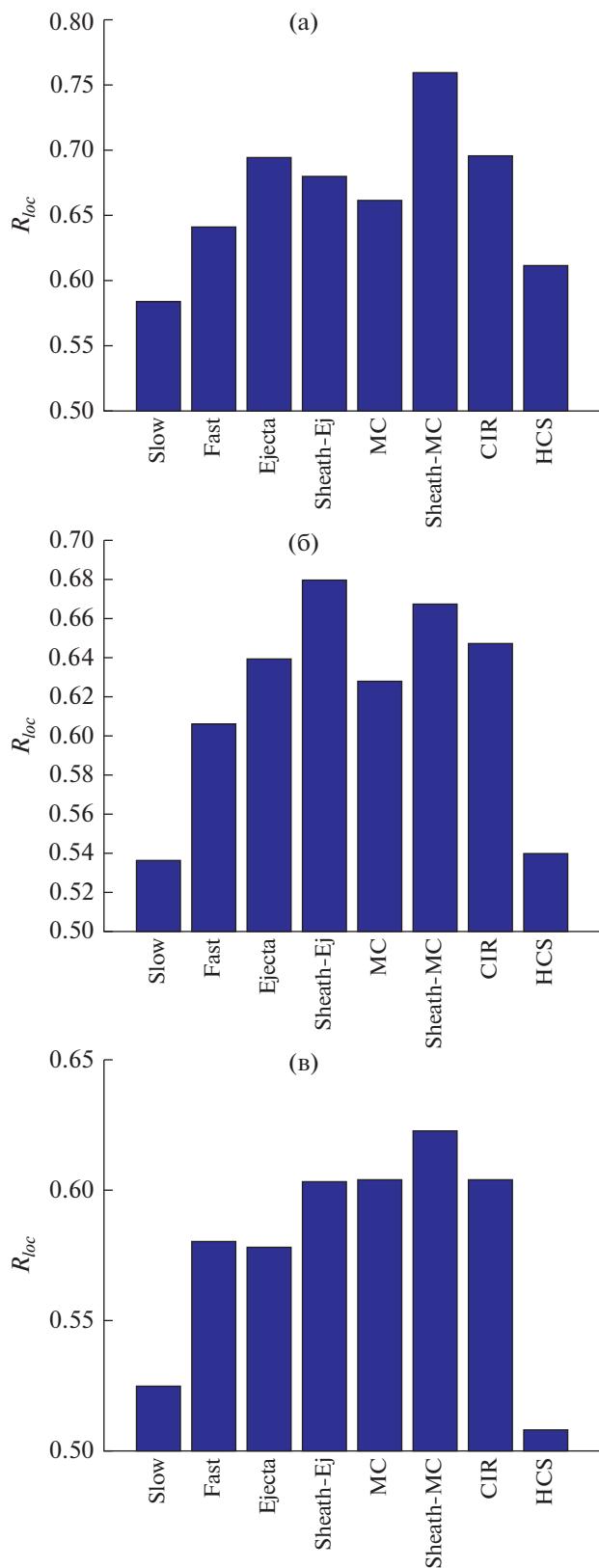


Рис. 7. Гистограммы медианных значений локальных коэффициентов корреляций R_{loc} по плотности протонов (а), по плотности гелия (б) и по относительному содержанию гелия (в) в разных типах крупномасштабных течений солнечного ветра.

Далее была рассмотрена связь значений локальных коэффициентов корреляции с типами крупномасштабных течений солнечного ветра. На рис. 7 представлены соответствующие гистограммы для локальных коэффициентов корреляций всех рассмотренных параметров: N_p , N_α и N_α/N_p . Каждый столбец соответствует одному из крупномасштабных типов солнечного ветра (см. раздел 1). Высота столбца соответствует медианному значению R_{loc} для каждой группы подынтервалов, отнесенной к одному из типов ветра. Видно, что наименьшие медианные значения R_{loc} наблюдаются в медленных квазистационарных течениях и гелиосферном токовом слое для корреляций по всем рассмотренным парам параметров. Самые высокие медианные значения R_{loc} наблюдаются в потоках сжатой плазмы SHEATH перед MC и EJECTA. Следует отметить, что для подынтервалов внутри высокоскоростных квазистационарных потоков из корональных дыр медианное значение R_{loc} не превышает 0.6, т.е. высокие значения локальных коэффициентов корреляции характерны только для интервалов в высокоскоростных потоках, связанных с возмущенными областями сжатия типа SHEATH.

Также было проведено сравнение параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного поля для подынтервалов с различными значениями локальных коэффициентов корреляции (см. рис. 8). Аналогично рис. 6, рассматриваемый набор подынтервалов был разделен на группы в зависимости от величины коэффициента корреляции R_{loc} , каждая группа представлена отдельным столбцом гистограммы на рис. 8 (диапазон значений R_{loc} указан на оси абсцисс). Для каждой группы вычислены средние и медианные значения параметров плазмы солнечного ветра на основе измерений прибора БМСВ (КА СПЕКТР-Р) и межпланетного магнитного поля на основе измерений прибора MFI (КА WIND). Некоторые группы содержали сравнительно небольшое число подынтервалов, в связи с чем средние значения не всегда адекватно отображали выборку, и поэтому на рис. 8 высота каждого столбца соответствует именно медианному значению параметров в указанном диапазоне R_{loc} . Столбцы гистограмм разных цветов, аналогично рис. 6, относятся к корреляциям по различным парам параметров.

Соответствующие зависимости представлены на рис. 8 для некоторых параметров плазмы, а также модуля и компонент межпланетного магнитного поля. На рис. 8а видно, что более высокие значения R_{loc} наблюдаются при более высокой скорости потока (более 400 км/с), что, вероятно, является следствием высоких значений локальных коэффициентов корреляции, наблюдающихся в областях сжатия плазмы типа SHEATH,

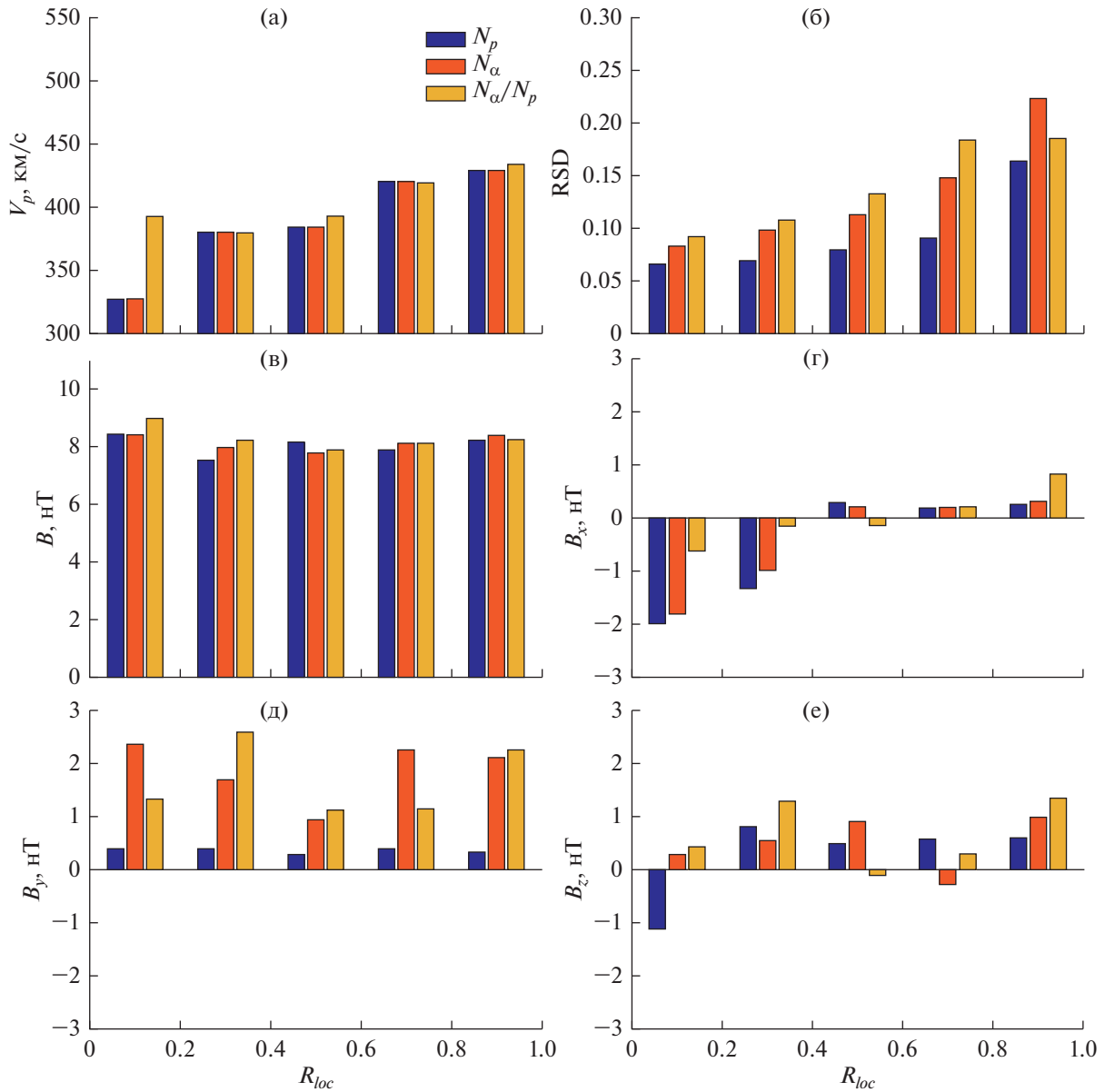


Рис. 8. Связь параметров плазмы и межпланетного магнитного поля с локальным коэффициентом корреляции R_{loc} по плотности протонов N_p , гелия N_α и относительному содержанию гелия N_α/N_p для: (а) скорости протонов V_p ; (б) относительного стандартного отклонения RSD соответствующего параметра; (в), (г), (д), (е) модуля B и компонент B_x , B_y , B_z межпланетного магнитного поля соответственно.

скорости потока в которых, как правило, достаточно высоки.

Также на рис. 8б четко видна связь локальных коэффициентов корреляции со значениями параметра RSD: более высокие значения R_{loc} наблюдаются при более высоком значении RSD соответствующего параметра (более 15%), и, напротив, на подынтервалах с низким значением RSD коэффициент локальной корреляции тоже низкий. Следует отметить, что коэффициент RSD косвенно отражает уровень варибельности параметра, т.е. наличие или отсутствие мелко- и среднemasштабных структур на рассматриваемом интервале. Другими

словами, к снижению значений локального коэффициента корреляции R_{loc} наряду с присутствием локальных неоднородностей в плазме может приводить отсутствие на рассматриваемом подынтервале каких-либо плазменных структур.

Зависимость значений коэффициента корреляции R_{loc} от модуля межпланетного магнитного поля (ММП) не была обнаружена (рис. 8в), однако для отобранных в работе интервалов была обнаружена связь R_{loc} с B_x компонентой ММП (рис. 8г) для всех рассмотренных параметров. Так, например, в случае анализа корреляции по плотности гелия

для выборки случаев с $R_{loc} > 0.6$ медианное значение B_x лежит вблизи нуля и составляет 0.26 нТ, а для случаев с низкими значениями локального коэффициента корреляции $R_{loc} < 0.4$ медианное значение компоненты B_x смещено в сторону отрицательных значений и равно -1.3 нТ. Аналогичная ситуация наблюдалась и в случае анализа корреляций по плотности протонов и относительному содержанию гелия. Однако в рассмотренном ограниченном наборе интервалов распределение B_x компоненты ММП не соответствовало нормальному, вследствие чего связь значений локальных коэффициентов корреляции с компонентой B_x нуждается в дополнительной проверке по расширенному статистическому материалу. Этот вопрос будет более подробно исследован в последующих работах. Для плотностей протонов, гелия, относительного содержания гелия и температуры четкие зависимости также не были обнаружены и не представлены на рисунках. Отметим, что для локальных корреляций всех трех пар параметров (плотности протонов, гелия и относительного содержания гелия) наблюдаются схожие зависимости на всех панелях рис. 8.

ВЫВОДЫ

Исследование одновременных измерений на двух разнесенных в пространстве КА *СПЕКТР-Р* и *WIND* позволяет наблюдать вариации параметров плазмы при распространении потока от одного спутника до другого и дает возможность выделить локальные пространственные неоднородности потока в плоскости, перпендикулярной линии Солнце—Земля. По результатам кросс-корреляционного анализа и последующего статистического анализа значений локальных коэффициентов корреляции плотности протонов, гелия и относительного содержания гелия было показано, что:

1. При высоком коэффициенте корреляции параметров плазмы на двух КА на интервале в целом локальное поведение плотности протонов, гелия и относительного содержания гелия на одном КА может не соответствовать аналогичным измерениям на другом. При этом низкие значения локального коэффициента корреляции $R_{loc} < 0.6$ встречаются довольно часто: в 40% случаев для плотности протонов, в 45 и 55% — для плотности гелия и его относительного содержания. В 15% случаев низкий локальный коэффициент корреляции наблюдается только по одному из параметров.

2. Величина локального коэффициента корреляции рассматриваемых параметров в значительной степени зависит от типа крупномасштабного течения солнечного ветра: самые низкие значения наблюдаются в медленных течениях и гелиосферном токовом слое, тогда как наибольшие значения характерны для потоков плазмы перед магнитными облаками.

3. Низкие значения локального коэффициента корреляции по плотности протонов, гелия и относительному содержанию гелия часто наблюдаются в потоках с низким уровнем относительных вариаций соответствующего параметра, с пониженной скоростью протонов, а также часто при отрицательной компоненте B_x межпланетного магнитного поля.

4. Области с низкими значениями локального коэффициента корреляции параметров плазмы указывают, в частности, на существование локальных пространственных неоднородностей потока. Оценка показывает, что размер подобных неоднородностей как для протонов, так и для гелия в плоскости YZ составляет $\sim 85 R_E$ ($\sim 5.4 \cdot 10^5$ км).

5. Локальные пространственные неоднородности по плотности протонов, гелия и относительному содержанию гелия имеют близкие масштабы и схожие свойства.

В заключение можно сказать, что представленные в работе результаты качественно согласуются с результатами, полученными ранее в лаборатории солнечного ветра Института космических исследований РАН по корреляциям измерений потока ионов и плотности протонов на КА *WIND*, *ИНТЕРБОЛЛ-1* и *IMP-8* [15, 16], однако затрагивают меньшие масштабы вариаций. Кроме того, в настоящей работе в дополнение рассматриваются корреляции измерений параметров дважды ионизированных ионов гелия на КА *СПЕКТР-Р* и *WIND*, и впервые выявлено существование областей с локальными отличиями по плотности и относительному содержанию гелия на одном из КА. Были выявлены связи значений локального коэффициента корреляции с некоторыми параметрами солнечного ветра, однако в силу ограниченности выборки эти исследования требуют уточнения в последующих работах. Проведенный анализ указывает на общую природу возникновения областей локальных пространственных неоднородностей как по плотности протонов, так и по плотности и относительному содержанию гелия: например, вследствие локальных процессов, возникающих из-за разницы скоростей между протонами и ионами гелия.

Авторы благодарны своим коллегам в ИКИ РАН и в Карловом Университете (Прага, Чехия) за возможность использования данных прибора БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* (<http://catalog-sw-msh.plasma-f.cosmos.ru/>, <http://aurora.troja.mff.cuni.cz/spektr-r/project/>), а также создателям базы данных спутника *WIND* (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. Schwenn R., Marsch E. Physics of the Inner Heliosphere II. Particles, Waves and Turbulence. Berlin: Springer, 1991.
3. Зеленый Л.М., Милованов А.В. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // УФН. 2004. Т. 174. № 8. С. 809–852.
4. Ермолаев Ю.И. Где образуются среднемасштабные вариации солнечного ветра? // Геомагнетизм и аэронаука. 2014. Т. 54. № 2. С. 174–175.
5. 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>
6. 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.
7. 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>
8. 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.
9. Mariani F., Bavassano B., Villante U. A Statistical Study of Magnetohydrodynamic Discontinuities in the Inner Solar System - HELIOS-1 and HELIOS-2 // Solar Physics. 1983. V. 83. № 2. P. 349–365.
10. Horbury T.S., Burgess D., Fränz M. et al. Three spacecraft observations of solar wind discontinuities // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 4. P. 677–680.
11. 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. № A12.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011307>
12. Chang S.C., Nishida A. Spatial structure of transverse oscillations in the interplanetary magnetic field // Astrophys. Space Sci. 1973. V. 23. P. 301.
13. Crooker N.U., Siscoe G.L., Russell C.T. et al. Factors controlling degree of correlation between ISEE 1 and ISEE 3 interplanetary magnetic field measurements // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 2224.
14. Richardson J.D., Paularena K.I. Plasma and magnetic field correlations in the solar wind // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 239.
15. Zastenker G.N., Dalin P.A., Petrukovich A.A. et al. Solar wind structure dynamics by multipoint observations // Phys. Chem. Earth (C). 2000. V. 25. P. 137.
16. Dalin P.A., Zastenker G.N., Paularena K.I. et al. A Survey of large, rapid solar wind dynamic pressure changes observed by Interball-1 and IMP-8 // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 293–299.
17. Neugebauer M. Mariner 2 observations of the solar wind average properties // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P. 4469.
18. Ogilvie K.W., Wilkerson T.D. Helium abundance in the solar wind // Solar Phys. 1969. V. 8. № 2. P. 435–449.
19. Geiss J. Processes affecting abundances in the solar wind // Space Sci. Rev. 1982. V. 33. P. 201.
20. Geiss J., Gloeckler G., Von Steiger R. Origin of the solar wind from composition data // Space Sci. Rev. 1995. V. 72. № 1–2. P. 49–60.
21. Ермолаев Ю.И. Наблюдение ионов He^{++} в солнечном ветре // Космич. исслед. 1994. Т. 32. № 1. С. 93–125. (Cosmic Research. P. 71.)
22. Zurbuchen T.H., Weberg M., Steiger von 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>
23. Yermolaev Y.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.
24. 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.
25. 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.
26. Kasper J.C., Stevens M.L., Korrecke K.E. et al. Evolution of the relationships between abundance, minor ion charge state, and solar wind speed // Astrophysical J. 2012. V. 745. № 2. P. 162.
27. Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Застенкер Г.Н. и др. Поведение ионов He^{++} на фронте межпланетной ударной волны // Геомагнетизм и аэронаука. 2020. Т. 60. № 6. P. 720–726.
<https://doi.org/10.31857/S0016794020060127>
28. Ogilvie K.W., Hirshberg J. The solar cycle variation of the solar wind helium abundance // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 2. P. 4595–4602.
29. Застенкер Г.Н., Колоскова И.В., Рязанцева М.О. и др. Наблюдение быстрых вариаций содержания ионов гелия в солнечном ветре // Космич. исслед. 2014. Т. 52. № 1. С. 27–38. (Cosmic Research. P. 25–36.)
30. Safrankova J., Nemecek Z., Cagas P. et al. Short-scale variations of the solar wind helium abundance // Astrophysical J. 2013. V. 778. P. 25.
31. Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al. Fast solar wind monitor (BMSW): description and first results // Space Sci. Rev. 2013. V. 175(1–4). P. 165–182.
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-9979-4>
32. Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // Космич. исслед. 2013. Т. 51. № 2. С. 88–99. (Cosmic Research. P. 78–89.)
<https://doi.org/10.1134/S0010952515010098>
33. Ogilvie K., Chornay D., Fritzenreiter R. SWE, a comprehensive plasma instrument for the wind spacecraft // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. № 1–4. P. 55–77.
<https://doi.org/10.1007/BF00751326>
34. 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>
35. 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>
36. 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.)