

УДК 523.62-726

ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВЫБРОСАХ КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ (ICME)

© 2022 г. А. А. Хохлачев¹, *, Ю. И. Ермолаев¹, И. Г. Лодкина¹,
М. О. Рязанцева¹, Л. С. Рахманова¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*aleks.xaa@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.04.2021 г.

После доработки 02.06.2021 г.

Принята к публикации 25.08.2021 г.

На основе данных базы OMNI2 за период с 1976 по 2019 г. исследуется поведение относительного содержания ионов гелия N_{α}/N_p внутри ICME. Показано, что ранее обнаруженная антикорреляция между N_{α}/N_p и β -параметром внутри ICME в основном связана с зависимостью от магнитного давления (или величины межпланетного магнитного поля), при этом зависимость N_{α}/N_p от величины теплового давления является слабо падающей в MC и растущей в EJECTA. Полученные данные согласуются с ранее высказанной гипотезой о протекании обогащенного ионами гелия электрического тока внутри ICME [1–3].

DOI: 10.31857/S0023420622020042

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию относительного содержания наиболее распространенной малой ионной компоненты солнечного ветра – ионов гелия He^{++} (альфа-частиц) – внутри межпланетных проявлений выбросов корональной массы (Interplanetary Coronal Mass Ejection – ICME). Принято считать, что ICME включают магнитные облака (Magnetic Cloud – MC) с высоким и регулярным вращающимся межпланетным магнитным полем (ММП) и EJECTA с менее высоким и менее регулярным ММП (см., например, работы [4–7] и ссылки в них).

Как хорошо известно, солнечный ветер (СВ) является открытой динамической системой, в которой происходит прямой турбулентный каскад с передачей энергии от крупных структур к более мелким. На 1 а.е. в области масштабов порядка 10^5 – 10^6 км (или на временах 10^2 – 10^3 с) находится характеристическая величина: для структур с размером выше этой величины солнечные явления еще не успели заметно разрушиться при движении в межпланетной среде и содержат в себе информацию об условиях своего образования на Солнце, а ниже этой величины наблюдаются структуры, образовавшиеся в результате локальных физических процессов [8, 9]. Так как длительность ICME на 1 а.е. составляет около 1 суток ($\sim 10^7$ км), то явления ICME относятся к крупномасштабным структурам солнечного ветра, и их свойства в основном определяются физическими

процессами в солнечной атмосфере. В частности, в этом приближении содержание ионов гелия не изменяется с ростом гелиоцентрического расстояния по мере движения солнечного ветра к Земле [10–13].

В недавних наших работах [1, 3] мы двойным методом наложенных эпох построили средние временные профили ряда параметров плазмы и ММП для 8 наиболее распространенных последовательностей типов солнечного ветра: (1) SW/CIR/SW, (2) SW/IS/CIR/SW, (3) SW/EJECTA/SW, (4) SW/SHEATH/EJECTA/SW, (5) SW/IS/SHEATH/EJECTA/SW, (6) SW/MC/SW, (7) SW/SHEATH/MC/SW и (8) SW/IS/SHEATH/MC/SW, где аббревиатуры означают следующее: SW – невозмущенный солнечный ветер, IS – межпланетная ударная волна, CIR (Corotating Interaction Region) – сжатый солнечный ветер между медленным и быстрым потоками, SHEATH – сжатый солнечный ветер между медленным SW и быстрым потоками ICME (MC или EJECTA). Путем сравнения временных профилей параметров было показано, что внутри ICME относительное содержание ионов гелия N_{α}/N_p антикоррелирует с протонным β -параметром, причем в MC наблюдается более сильная антикорреляция, чем в EJECTA. Так как β -параметр является отношением теплового и магнитного давлений, то этот наблюдательный факт был интерпретирован как указание на то, что внутри ICME протекает обогащенный ионами гелия электрический ток, а различия в степени ан-

тикорреляции в МС и ЕЈЕСТА объясняются тем, что, в отличие от МС, при пересечении ЕЈЕСТА спутник проходит дальше от оси ICME и практически не регистрирует электрический ток, основная часть которого занимает около 10^6 км (или $\sim 10\%$) линейного размера сечения в центре ICME. Принципиальным положением используемой в этих работах методики является тот факт, что мы сначала двойным методом наложенных эпох находим средние временные профили параметров и только после этого сравниваем значения различных параметров на этих профилях, относящихся к одинаковому времени эпохи. В данной работе используется другой метод: мы сравниваем зависимость содержания N_α/N_p от параметров, входящих в β -параметр, для одновременных измерений во всех ICME за период 1976–2019 г., не привязываясь к какому-либо времени внутри ICME.

Таким образом, целью настоящей работы является проверка нашей гипотезы о протекании обогатленного ионами гелия электрического тока внутри ICME с помощью нового метода обработки данных.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Данная работа основывается на среднечасовых данных межпланетных измерений базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) [14], которая, в частности, содержит следующие параметры плазмы солнечного ветра и магнитного поля: N_p , T , B — концентрация, температура протонов и величина ММП, определенная как длина вектора магнитного поля $\sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}$, N_α/N_p — относительное содержание гелия, т.е. отношение концентрации дважды ионизированных ионов гелия к концентрации протонов. Другие рассматриваемые в работе параметры: тепловое давление $N_p kT$ и β -параметр (отношение теплового к магнитному давлению) — являются расчетными и вычисляются отдельно.

Необходимо отметить, что, хотя база OMNI включает измерения многих КА, расположенных вблизи Земли, авторы базы перешли на обновленную версию базы OMNI2 и в ноябре 2018 г. исключили из базы данные N_α/N_p , полученные на КА ACE (это исключение было объяснено различиями данных N_α/N_p , полученных на КА ACE и WIND; см. подробнее https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html#norm_pla), и основным источником данных по содержанию гелия в солнечном ветре с 1995 г. по настоящее время в новой базе OMNI2 стал КА WIND. В работе [3] мы сравнили оба варианта базы (т.е. с данными КА ACE и без них) и пришли к выводу, что для исследования крупномасштабных (размером $>10^6$ км или длительностью >1 ч) явлений солнечного ветра

данные КА ACE могут быть использованы. Тем не менее, в данной работе мы используем стандартные данные OMNI2.

В настоящей работе используется классификация типов солнечного ветра, выбор которой обоснован и описан в нашей работе [15]. Эта классификация была основана на имеющихся в мировой литературе представлениях и экспериментальных данных по солнечно-земной физике и включает 3 квазистационарных типа солнечного ветра (быстрый и медленный солнечный ветер, образующийся в корональных дырах и в поясах корональных стримеров соответственно, а также гелиосферный токовый слой) и 6 типов возмущенного солнечного ветра (область сжатия перед быстрым течением солнечного ветра, межпланетные проявления выбросов корональной массы, включающие магнитные облака и ЕЈЕСТА, области сжатия SHEATH перед быстрыми МС и ЕЈЕСТА (SHMC и SHEJ соответственно), области разрежения за ICME (RARE), а также прямые и обратные межпланетные ударные волны IS и ISa). На основе 1-часовых данных базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) [14] нами был создан каталог указанных явлений солнечного ветра для 25-летнего интервала 1976–2000 г. [15]. Этот каталог продолжает расширяться по времени охвата и в настоящее время включает данные за 45 лет с 1976 по 2020 г. (<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni>). В настоящей работе исследуется период 1976–2019 г., который включает 1461 событие ЕЈЕСТА и 202 события МС из этого каталога. Так как некоторые из этих событий включали в себя точки, полученные за часовые интервалы, во время которых происходил переход КА между типами СВ, то для анализа были строго отобраны те интервалы, у которых значения $\beta < 0.7$ и теплового давления $N_p kT < 0.01$. Таким образом, общее число отобранных одночасовых точек измерений составило 19575 для ЕЈЕСТА и 2672 для МС.

В отличие от работ [1, 3], в которых данные сначала обрабатывались двойным методом наложенных эпох с целью получения средних временных профилей параметров для различных типов СВ, в текущей работе проводилось сопоставление параметров, взятых непосредственно из базы OMNI2 без какого-то предварительного усреднения. Одной из известных особенностей данных по относительному содержанию малых ионных составляющих СВ является большой разброс их значений (более порядка величины) [3]. Так как в дальнейшем анализе мы будем использовать рисунок зависимости относительного содержания гелия от ряда параметров плазмы солнечного ветра и ММП, необходимо обсудить методику выявления существующих закономерностей при столь большом разбросе значений N_α/N_p . Во-первых, для аппроксимации использовались степенные

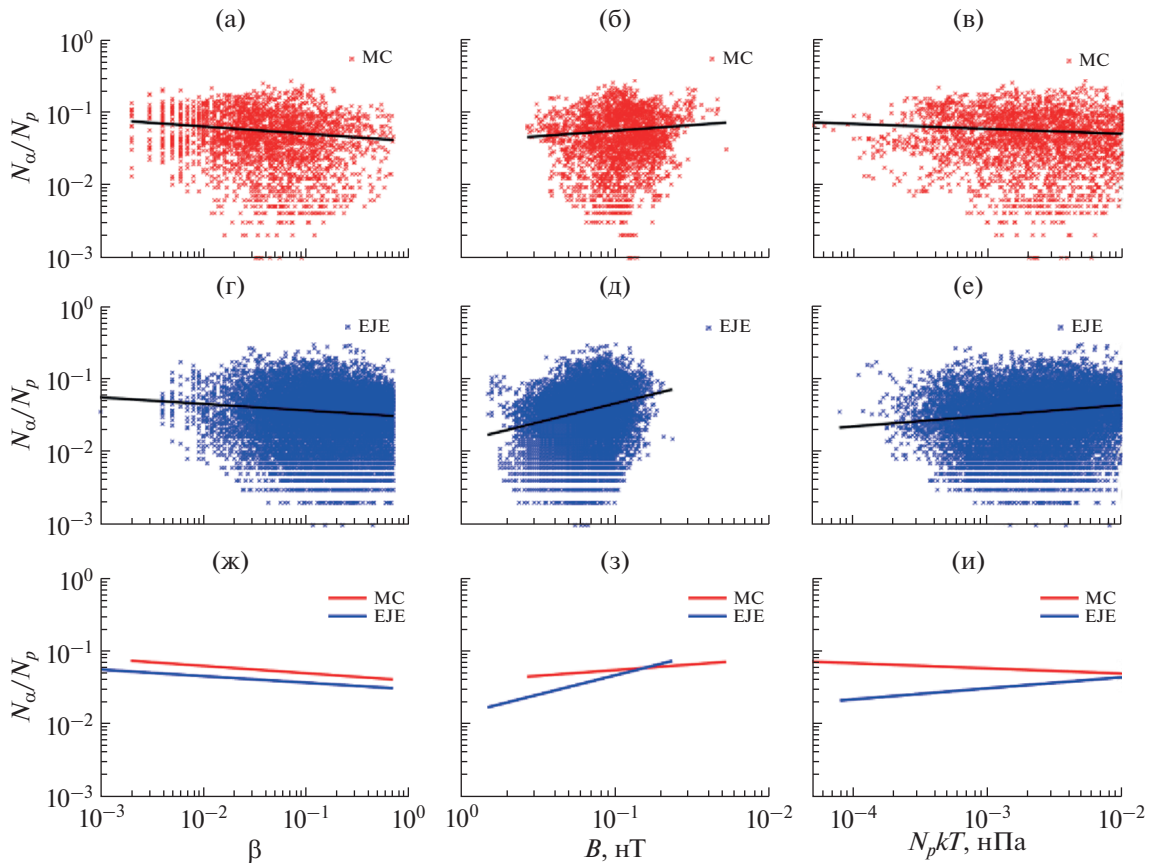


Рис. 1. Зависимости содержания гелия N_{α}/N_p от β -параметра (1-й столбец), модуля магнитного поля B (2-й столбец) и теплового давления $N_p kT$ (3-й столбец) в двух типах ICME: MC (а–в) и EJECTA (г–е). Панели (ж–и) демонстрируют степенные аппроксимации соответствующих типов ICME: для MC красные линии и для EJECTA синие линии.

функции, как имеющие наиболее общий характер, так как *a priori* неизвестен закон, описывающий исследуемую зависимость. Во-вторых, степенные функции, которыми мы аппроксимируем данные, в логарифмическом масштабе позволяют, с одной стороны, наглядно отобразить переменную в широком диапазоне значений, как в случае с N_{α}/N_p , а с другой стороны, оценить качество аппроксимаций по методике работы [16]. Согласно этой методике сначала вычисляется некоторая величина $W = 0.5\sqrt{(N-3)\ln[(1+|r|)/(1-|r|)]}$, где N и r – число точек и коэффициент корреляции, после чего по этой величине W оценивается вероятность корректности аппроксимации данных: чем выше W , тем выше вероятность P . При $W > 2$ вероятность попадает в интервал $P > 95\%$. Поскольку мы работаем с наборами, включающими в себя большое число точек, то полученные аппроксимации достаточно надежны, несмотря на маленькие коэффициенты корреляции. Для сравнения результатов, полученных для разных подтипов ICME, мы также используем статистическую ошибку, равную стандартному отклонению, деленному на квадратный корень из числа точек из-

мерений. Благодаря большому числу измерений статистическая ошибка N_{α}/N_p оказывается малой ($\sim 0.1-0.3\%$), и в рассматриваемых случаях мы считаем различия статистически достоверными, если она $< 0.5\%$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 и 2 представлены зависимости между содержанием гелия N_{α}/N_p и параметрами плазмы и ММП. Верхние панели показывают события, которые относятся к MC (красным цветом), средние панели – события EJECTA (синим цветом). В разных колонках показаны зависимости содержания гелия от разных параметров: β -параметра, величины ММП B и теплового давления $N_p kT$, которые входят в виде знаменателя и числителя в величину β -параметра (рис. 1, левая, центральная и правая колонки, соответственно), а также концентрации N_p и температуры протонов T – множителей в тепловом давлении $N_p kT$ (рис. 2, левая и правая колонки, соответственно).

Прямые линии являются линейными аппроксимациями в логарифмических шкалах, так как

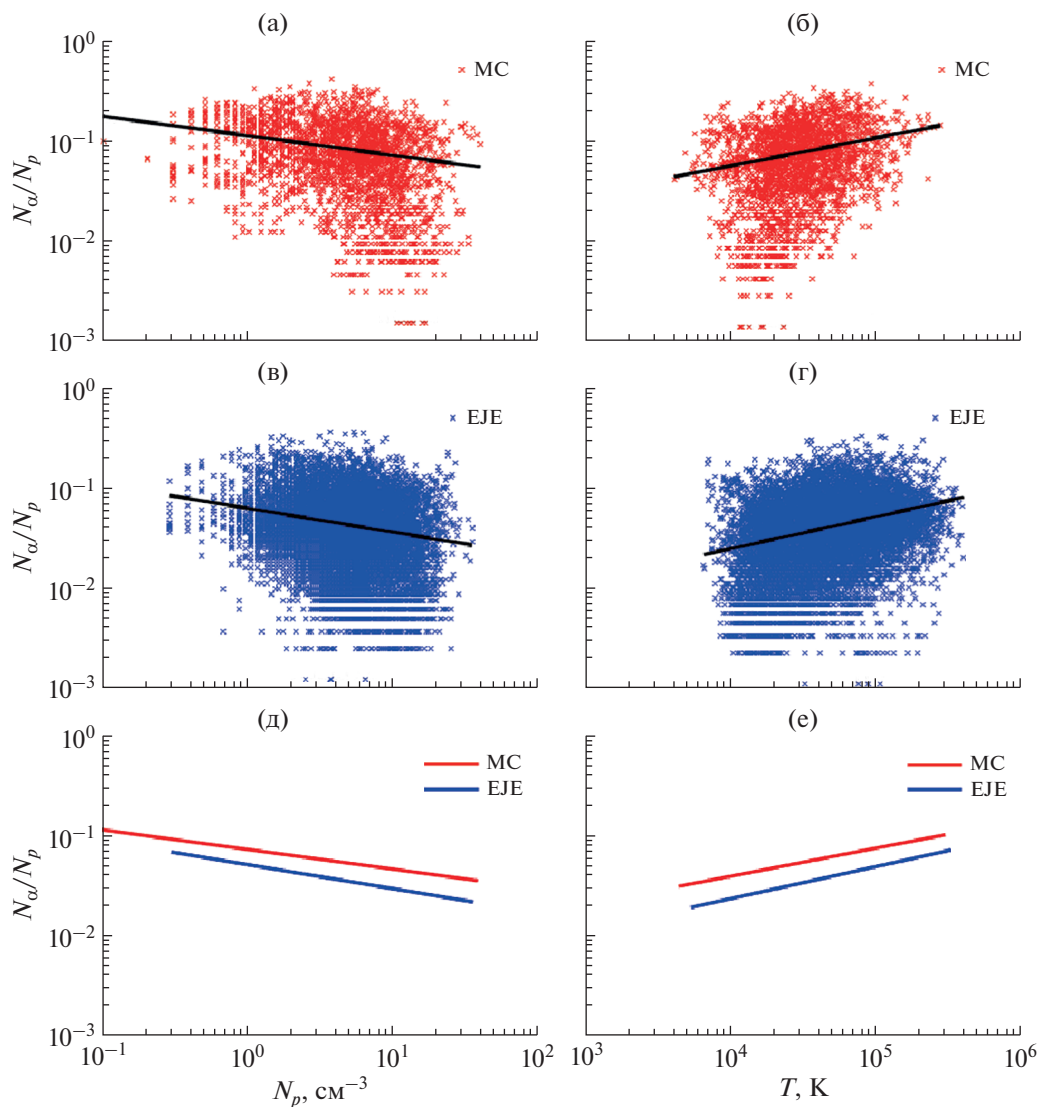


Рис. 2. Зависимости содержания гелия N_{α}/N_p от концентрации N_p (1-й столбец) и температуры протонов T (2-й столбец). Обозначения такие же, как на рис. 1.

данные аппроксимировались степенными функциями. На нижних панелях рисунков показаны только линии аппроксимации соответствующих зависимостей, что позволяет сравнить результаты аппроксимаций для МС и ЕЈЕСТА. Коэффициенты корреляции r и функции аппроксимации для каждой из зависимостей представлены в табл. 1 и 2. В них также приводится параметр W (см. раздел 1), который позволяет подчеркнуть статистическую значимость результатов.

Содержание гелия антикоррелирует с β -параметром и в МС, и в ЕЈЕСТА. При этом обе линии аппроксимации имеют приблизительно одинаковый наклон (степень ~ -0.1), но для МС линия проходит на $\sim 50\%$ выше. Поскольку β -параметр — это отношение теплового и магнитного давлений, также представляет интерес поведение содержания

гелия в зависимости от этих давлений. На средних панелях рис. 1 видно, что содержание гелия растет с увеличением модуля ММП B (и, соответственно, магнитного давления). Линия аппроксимации для ЕЈЕСТА проходит в области вычисления (области наличия измерений B) ниже, чем для МС, но имеет более крутой наклон, так что в области $B \sim 15$ нТл линии пересекаются. Зависимости же содержания гелия от теплового давления в МС и в ЕЈЕСТА различны: для МС зависимость убывающая, а для ЕЈЕСТА — возрастающая (правые панели рис. 1).

На рис. 2 показаны зависимости содержания гелия от параметров, входящих в тепловое давление: концентрации N_p и температуры протонов T . По определению относительного содержания гелия величина N_{α}/N_p обратно пропорциональна

Таблица 1. Коэффициенты корреляций r и аппроксимации для зависимостей содержания гелия N_{α}/N_p от β -параметра, величины магнитного поля B и теплового давления $N_p kT$ для ЕЈЕСТА и МС (см. рис. 1)

Тип ИСМЕ	Кол-во точек	N_{α}/N_p от β			N_{α}/N_p от B			N_{α}/N_p от $N_p kT$		
		r	W	Аппр.	r	W	Аппр.	r	W	Аппр.
ЕЈЕСТА	19575	-0.08	11.2	$\ln y = -0.09 \ln x - 3.51$	0.25	35.7	$\ln y = 0.52 \ln x - 4.8$	0.15	21.1	$\ln y = 0.15 \ln x - 2.46$
МС	2672	-0.10	5.2	$\ln y = -0.1 \ln x - 3.23$	0.11	5.7	$\ln y = 0.15 \ln x - 3.27$	-0.10	5.2	$\ln y = -0.07 \ln x - 3.33$

Таблица 2. Коэффициенты корреляций и аппроксимации для зависимостей содержания гелия N_{α}/N_p от концентрации N_p и температуры протонов T для ЕЈЕСТА и МС (см. рис. 2)

Тип ИСМЕ	Кол-во точек	N_{α}/N_p от N_p			N_{α}/N_p от T		
		r	W	Аппр.	r	W	Аппр.
ЕЈЕСТА	19575	-0.17	24	$\ln y = -0.24 \ln x - 2.98$	0.28	40	$\ln y = 0.52 \ln x - 6.72$
МС	2672	-0.26	13.7	$\ln y = -0.2 \ln x - 2.63$	0.13	6.7	$\ln y = 0.15 \ln x - 5.81$

концентрации протонов, и наблюдается убывающая зависимость на левых панелях рис. 2. В то же время содержание гелия возрастает с ростом температуры протонов как для МС, так и для ЕЈЕСТА (правые панели рис. 2). При этом для обоих параметров линии аппроксимации двух наборов имеют близкий наклон, но содержание гелия в МС на ~50% выше.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, необходимо отметить, что все представленные данные свидетельствуют о том, что среднее содержание гелия N_{α}/N_p в магнитных облаках на ~50% выше, чем в ЕЈЕСТА. Как было отмечено в методической главе, эта величина превышает статистическую ошибку определения средней величины содержания гелия, и поэтому это различие является статистически значимым. Однако из-за большого разброса измерений содержания гелия использовать этот параметр для идентификации отдельных событий МС или ЕЈЕСТА в солнечном ветре затруднительно, и оно может быть использовано только в качестве вспомогательного параметра.

Данные о зависимости содержания гелия от β -параметра, представленные на рис. 1, в целом согласуются с ранее полученными результатами об антикорреляции содержания гелия N_{α}/N_p в МС или ЕЈЕСТА [3]. Однако при использовании усреднения по двойному методу наложенных эпох в работе [3] степень антикорреляции была выше. Полученные данные о корреляции N_{α}/N_p и величины ММП B в ИСМЕ согласуются с результатами работ [17, 18], в которых исследовалась связь содержания гелия и напряженности магнитного поля в солнечной короне. В данной работе степень корреляции N_{α}/N_p и B для ЕЈЕСТА оказалась выше, чем для МС, хотя при предполо-

жении, что возрастание N_{α}/N_p в основном наблюдается в области минимальных значений β -параметра в центре ИСМЕ, можно было бы ожидать более крутую антикорреляцию с β -параметром и корреляцию с B в МС. На наш взгляд, это, прежде всего, связано с различиями в методических подходах для обеих работ, и отсутствие усреднения по областям ИСМЕ до корреляционного анализа изменяет вклад различных областей в полученные коэффициенты корреляции. Низкий наклон зависимости N_{α}/N_p от B для МС также может быть связан с тем, что в число событий МС были включены события со значениями $B < 5$ нТл, которые не характерны для МС. Данный вопрос требует дополнительного исследования и будет предметом дальнейшего изучения.

Зависимость N_{α}/N_p от теплового давления для МС убывающая, а для ЕЈЕСТА – возрастающая. Это может быть связано с тем, что ИСМЕ при движении от Солнца к Земле расширяются, и внешние области ИСМЕ могут сильнее подвергаться влиянию взаимодействия с окружающей плазмой, чем внутренние ее части, которые в большей степени определяются протекающим внутри электрическим током. Так как селекция ИСМЕ на МС или ЕЈЕСТА в значительной мере определяется удаленностью траектории КА от оси ИСМЕ, то в ЕЈЕСТА может наблюдаться более высокое тепловое давление. Для ЕЈЕСТА увеличение содержания гелия с ростом величины ММП превосходит увеличение с ростом теплового давления, что и приводит к антикорреляции N_{α}/N_p с β -параметром. Для МС антикорреляция содержания гелия и теплового давления (числитель β -параметра) дополняет корреляцию гелия и давления магнитного (знаменатель β -параметра), что, очевидно, также приводит к антикорреляции с β -параметром.

Рис. 2 показывает зависимость содержания гелия от сомножителей, входящих в тепловое дав-

ление. Содержание гелия N_{α}/N_p , определяемое как отношение концентраций α -частиц и протонов, уменьшается с ростом концентрации протонов N_p в соответствии с определением этой величины. Однако N_{α}/N_p возрастает с ростом температуры протонов T таким образом, что для МС произведение концентрации и температуры (тепловое давление $N_p kT$) слабо антикоррелирует с содержанием гелия, а для ЕЈЕСТА наблюдается слабая положительная корреляция.

ВЫВОДЫ

В данной работе на основе 1-часовых данных базы OMNI2 за период с 1976 по 2019 г. мы исследовали зависимости содержания ионов гелия N_{α}/N_p от параметров плазмы и магнитного поля внутри ICME. Анализ полученных результатов показал следующее:

1. Среднее содержание гелия в МС в ~ 1.5 раза выше, чем в ЕЈЕСТА.

2. Подтвержден ранее полученный в работах [1–3] результат: в обеих разновидностях ICME (МС и ЕЈЕСТА) содержание гелия N_{α}/N_p антикоррелирует с β -параметром, который определяется отношением теплового и магнитного давлений.

3. Впервые показано, что эта антикорреляция N_{α}/N_p с β -параметром в ICME связана с ростом N_{α}/N_p при возрастании величины (или давления) ММП. При этом зависимость содержания гелия N_{α}/N_p от величины теплового давления (произведения концентрации и температуры, $N_p kT$) слабо падающая для МС и растущая для ЕЈЕСТА.

4. Зависимости содержания гелия N_{α}/N_p от параметров, входящих в тепловое давление плазмы в ICME (МС и ЕЈЕСТА), имеют следующий вид: содержание растет с увеличением температуры и убывает с увеличением концентрации.

Таким образом, можно сделать вывод, что, хотя в данной работе мы не использовали информацию о местоположении измерений параметров относительно границ ICME [1–3], полученные новым методом данные подтверждают ранее выдвинутую гипотезу о протекании обогащенного ионами гелия электрического тока внутри ICME.

Авторы выражают благодарность создателям базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) за возможность ее использования в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S. et al.* Dynamics of large-scale solar wind streams obtained by the double superposed epoch analysis // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. P. 7094–7106. <https://doi.org/10.1002/2015JA021274>
2. *Ермолаев Ю.И.* Оценка размера электрического тока с повышенным содержанием гелия внутри маг-

- нитного облака // *Космич. исслед.* 2019. Т. 57. № 6. С. 477–478. (*Cosmic Research.* P. 471–472.)
3. *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>
4. *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>
5. *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>
6. *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.
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. *Ермолаев Ю.И.* Где образуются среднемасштабные вариации солнечного ветра? // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2014. Т. 54. № 2. С. 174–175.
9. *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.
10. *Geiss J.* Processes affecting abundances in the solar wind // *Space Sci. Rev.* 1982. V. 33. P. 201.
11. *Ермолаев Ю.И.* Наблюдение ионов He^{++} в солнечном ветре // *Космич. исслед.* 1994. Т. 32. № 1. С. 93–125. (*Cosmic Research.* P. 71.)
12. *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.
13. *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>
14. *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales and comparisons of hourly wind and ACE plasma and magnetic field data // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 110. № A2. A02209.
15. *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.)
16. *Bendat J.S., Piersol A.G.* Measurement and analysis of random data. N.Y.: Wiley-Interscience, 1971.
17. *Wang Y.-M.* Relating the solar wind helium abundance to the coronal magnetic field // *Astrophysical J.* 2008. V. 683. P. 499–509. <https://doi.org/10.1086/589766>
18. *Wang Y.-M.* Role of the coronal alfvén speed in modulating the solar-wind helium abundance // *Astrophysical J. Lett.* 2016. V. 833. P. L21. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/833/2/L21>