

УДК 523

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ ^3He , ^4He , C, O И Fe НА 1 а.е. В ПОТОКАХ ЧАСТИЦ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В 23 И 24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2023 г. М. А. Зельдович¹, *, Ю. И. Логачев¹

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*ms.zeldovich@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.

После доработки 07.07.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

Изучались энергетические спектры ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe с энергиями 0.04–2 МэВ/нуклон на 1 а.е. в потоках солнечного ветра из приэкваториальных корональных дыр на спаде солнечной активности в 23-ем цикле по информации приборов ULEIS, SWICS и SWEPAM, установленных на КА ACE. Результаты данной работы показывают, что надтепловые ионы из корональных дыр являются ионами максвелловского солнечного ветра, ускоренными на Солнце и/или в межпланетном пространстве и образующими высокоэнергичный вклад в ионы солнечного ветра (надтепловой “хвост” в энергетическом распределении ионов солнечного ветра). Энергетические спектры ускоренных ионов “хвоста” имеют разную зависимость от энергии, что говорит о различных механизмах их ускорения. Связь интенсивности надтепловых ионов со скоростью солнечного ветра свидетельствует об эффективности ускорения ионов максвелловского солнечного ветра.

DOI: 10.31857/S0023420623010065, EDN: FINUMH

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная корона состоит из горячей плазмы $\geq 10^6$ K, из которой вглубь Солнечной системы постоянно вытекают потоки частиц, унося с собой глобальное корональное магнитное поле Солнца. Этот поток солнечного ветра и определяет гелиосферу. Солнечный ветер (СВ) достаточно динамичен и наполнен ионами разного состава с разными энергетическими спектрами. Структуры потоков СВ имеют различные масштабы, на них могут накладываться или включать в себя различные образования, такие как корональные выбросы массы (КВМ), коротирующие области взаимодействия разнородных потоков (CIR), образующиеся из-за соседства регионов с более быстрым и более медленным ветром в сочетании с вращением Солнца, создавая области сжатия, где быстрый ветер нагоняет медленный, оставляя за собой разреженные регионы позади [1–4]. В настоящее время принято традиционное разделение СВ по скорости на “быстрый” и “медленный” ветер, которые являются эмпирически связанными с крупномасштабными солнечными структурами: корональными дырами (КД) и корональными стримерами, соответственно. Данные КА *Ulysses* показали, что высокоширотный

СВ имеет гораздо большую скорость, чем экваториальный [5, 6].

Кроме крупномасштабных структур, которые всегда создаются Солнцем, существуют мелкомасштабные структуры, развивающиеся в пространстве с помощью различных механизмов. Разнообразные спектры флуктуаций магнитного поля в таких потоках могут ускорять несомые заряженные частицы [7, 8].

Потоки ускоренных частиц из КД в области CIR наблюдаются уже давно [9–10]. Механизмы ускорения надтепловых ионов He в области коротирующих областей взаимодействия разнородных потоков СВ изучались в [11–14]. Авторы обсуждают возможность существования длительного ускорения (доускорения) ионов в межпланетном пространстве при распространении ионов от Солнца в межпланетном пространстве и также в области сжатия на замыкающей кромке CIR.

Как дополнение к этим ускоренным энергичным частицам нами изучаются потоки надтепловых (0.04–2 МэВ/нуклон) ионов из КД, не связанные с областями взаимодействия CIR. Максимум интенсивности этих ионов наблюдался одновременно с максимумом скорости СВ из КД в замыкающей области CIR [15, 16]. В настоящее время нет четкого представления о природе и ме-

ханизмах возникновения этих, как будет показано далее, долгоживущих потоков надтепловых частиц. В задачу данной статьи входит изучение потоков надтепловых ионов из КД, их некоторых детальных характеристик, наиболее важными из которых являются: состав ионов в потоках СВ и состав надтепловых ионов в потоках из КД, энергетические спектры этих ионов зависимость их интенсивности от скорости СВ.

Кроме того, задача изучения потоков из КД важна потому, что динамический солнечный ветер и встроенные разномасштабные структуры магнитного поля постоянно взаимодействуют со всеми планетами Солнечной системы и работающими там космическими аппаратами. Потоки из КД являются средой, через которую распространяются крупные магнитные структуры с энергичными частицами и обеспечивается фундаментальная передача энергии от Солнца в гелиосферу, что формирует реальную космическую погоду.

Одним из параметров радиационной обстановки в межпланетном пространстве является интенсивность потоков ионов надтепловых энергий в различные периоды солнечной активности (СА). Относительное содержание надтепловых ионов с энергиями 0.04–1 МэВ/нуклон в спокойные периоды солнечной активности в 23-ем цикле изучалось в [17–21], где было показано, что величины отношений C/O и Fe/O в спокойное время зависят от уровня солнечной активности. В максимуме цикла относительное содержание этих ионов было близко к содержанию во вспышках СКЛ, а в минимуме цикла – к значениям в солнечном ветре и/или в коротирующих областях взаимодействия разноскоростных потоков СВ.

Значимыми источниками ионов являются корональные дыры (КД) на Солнце, состав потоков ионов из которых изучался нами ранее в [15, 16], где были получены величины относительных содержаний надтепловых ионов ${}^4He/O$, C/O и Fe/O в потоках частиц из КД в спокойные периоды 23 и 24-го солнечных циклов. Были проанализированы и сопоставлены относительные содержания тепловых и надтепловых ионов ${}^4He/O$, C/O и Fe/O в потоках солнечного ветра из приэкваториальных корональных дыр в 2006–2012 и 2015–2017 гг. Потоки ионов с энергиями ~0.04–2 МэВ/нуклон были изучены с использованием данных прибора ULEIS на борту КА ACE вместе с тепловыми ионами в быстром и медленном (максвелловском) солнечном ветре по данным прибора SWICS (КА ACE). Получено, что величины отношений C/O и Fe/O надтепловых ионов были равны их относительному содержанию в потоках СВ, в то время как величина надтепловых ${}^4He/O$ в SC23 иногда превышала соответствующее значение в СВ более чем в два раза. В обоих циклах величины тепловых и надтепловых Fe/O демон-

стрировали одинаковый характер зависимостей от максимальной скорости солнечного ветра из КД. Результаты этого исследования свидетельствовали о том, что источниками надтепловых ионов из КД в периоды низкой СА являются ускоренные тепловые ионы СВ. Проведенное сравнение состава ионов в потоках СВ с составом надтепловых ионов из КД разных энергий позволило предположить, что ускорение ионов до надтепловых энергий происходит в процессе движения потоков частиц от Солнца на всем пути в межпланетном пространстве, согласно с результатами, полученными в [12–14], а не только в момент создания и выхода потоков из корональных дыр.

В настоящей работе изучались ионный состав и энергетические спектры ионов 4He , 3He , C , O и Fe в диапазоне энергий 0.04–2 МэВ/нуклон в рекуррентных потоках ионов на 1 а.е. из приэкваториальных КД на спаде СА в 23-ем и 24-ом циклах. Параметры солнечного ветра и информация по потокам ионов из КД определялись по данным приборов SWEPAM, ULEIS и SWICS (КА ACE в точке L1), также использовались данные сайта ‘Coronal Hole History’. Критериями определения потока ионов из корональной дыры служили условия: $O^7/O^6 < 0.014$ и $Q(Fe) = 9–10$ [23, 24] и одновременное возрастание скорости СВ из КД.

1. ДОЛГОЖИВУЩИЕ ПОТОКИ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

Свойства изучаемых здесь таких явлений, как энергичные потоки частиц из КД, зависят от уровня СА в разные периоды солнечного цикла. В минимумах СА в 2010 г. и в 2020 г. наблюдались как минимальное число КД, так и минимальная скорость солнечного ветра из КД (рис. 1). На спаде солнечной активности в 23-ем и 24-ом циклах (2006–2009 гг. и 2015–2018 гг.) число ($N_{кд}$) всех приэкваториальных КД в году и также величина максимальной скорости солнечного ветра в году V_{SW} из этих КД, изменялись в фазе с числом солнечных пятен Rz . Рисунок 1 демонстрирует число солнечных пятен в году Rz (сплошные ромбы), максимальную скорость солнечного ветра в году V_{SW} из КД (кружки) и число корональных дыр $N_{кд}$ (треугольники). Данные по величинам V_{SW} и $N_{кд}$ получены из сайта ‘Coronal Hole History’. Изучаемые здесь наиболее длительные рекуррентные потоки ионов $CH1$ и $CH2$, более чем 10 солнечных оборотов, были обнаружены на спаде 23-го цикла СА в 2006–2009 гг. Потоки солнечного ветра и малоэнергичных ионов из КД испытывали сильные вариации в течении существования рекуррентных потоков ионов.

Эволюция скорости солнечного ветра в потоках, одновременных с потоками ионов, показана

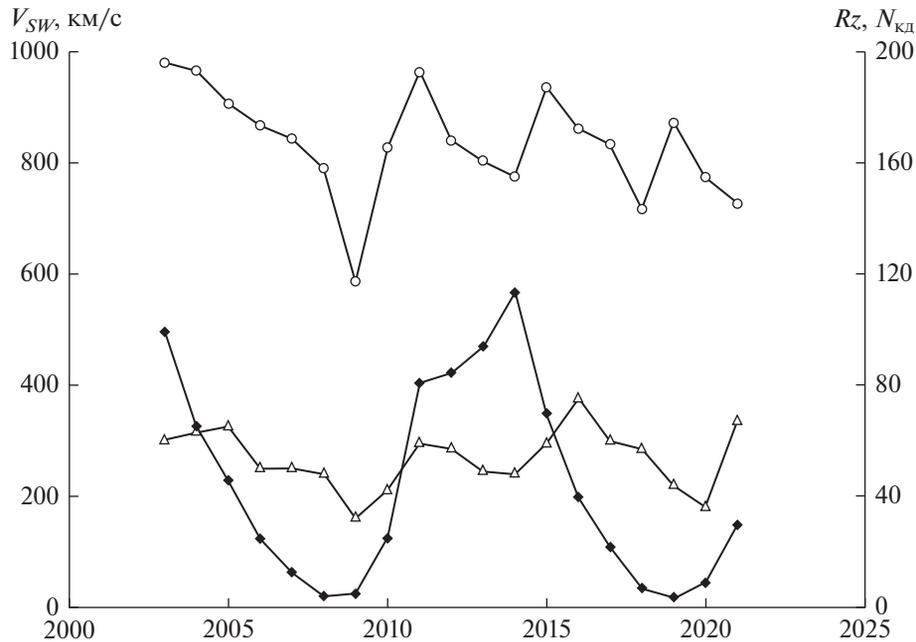


Рис. 1. Число солнечных пятен в году Rz (сплошные ромбы), максимальная скорость солнечного ветра из КД в году V_{SW} (кружки) и число корональных дыр в году N_{KD} (треугольники). Данные по величинам V_{SW} и N_{KD} получены из сайта “Coronal hole history”.

на рис. 2. Как видно из рисунка, величины V_{SW} достигали максимума на срединных оборотах существования потока ионов. Одновременно с потоками солнечного ветра из КД регистрировалось повышение интенсивностей надтепловых ионов, также как наблюдалось в [12–16]. На спаде 23-го цикла наблюдались наиболее долгоживущие рекуррентные потоки малоэнергичных ионов – со временем жизни >10 солнечных оборотов. Одновременно регистрировалось повышение скорости СВ, которая достигала максимума к середине времени жизни потока ионов (рис. 2а). Такая же закономерность видна на рис. 2б для всех рекуррентных потоков ионов в 24-ом цикле, где самый длительный поток существовал 17 оборотов Солнца.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ ИЗ ПРИЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

Энергетические спектры надтепловых ионов в потоках частиц из КД характеризуют механизмы ускорения ионов непосредственно в КД и в процессе распространения в межпланетном пространстве. Спектры ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe с энергиями 0.04–2 МэВ/нуклон были получены в 2006–2012 и в 2015–2018 гг. во время регистрации на 1 а.е. максимального потока частиц из КД. Спектры были аппроксимированы либо степенной функцией ($J(E) \sim E^{-\gamma}$ с показателем γ), либо,

при нарушении степенного закона (уменьшение потока при возрастании энергии ионов), комбинацией степенной и экспоненциальной функциями ($J(E) \sim E^{-\gamma}\exp(-E/E_0)$). На рис. 3 приведены спектры ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe в потоках энергичных частиц из долгоживущего потока ионов **СН1** в 2006–2007 гг. Спектры ^4He были аппроксимированы степенной функцией (спектры а, б, е) и комбинацией двух функций – степенной и экспоненциальной (спектры в, д, г и ж). Видно, что спектры ионов в 2006 г. имели степенной вид $J = AE^{-\gamma}$, а в 2007 г. спектры лучше аппроксимировались произведением экспоненциальной и степенной функций $J(E) \sim E^{-\gamma}\exp(-E/E_0)$, величины E_0 были взяты из [25–27]. При аппроксимации 98 спектров получены значения $2 < \gamma < 6$, что означает наличие разных условий в областях ускорения надтепловых ионов в потоках из КД. Величины γ , полученные при аппроксимациях, приведены на рис. 4. Фиск и Глеклер [27] в модели ускорения ионов до надтепловых энергий в турбулентной среде в спокойное время СА получили спектры вида $J = A(E^{-\gamma})\exp(-E/E_0)$ с показателем $\gamma = 1.5$. В данной работе оценка величин γ степенной части спектров ^4He показала их вариации в диапазоне 2–6, при этом только шесть спектров ионов O и Fe имели $\gamma < 2$ (см. рис. 4). Нужно отметить, что параметры спектров различного вида не зависели от скорости солнечного ветра из корональных дыр, при этом интенсивность ионов была наименьшей на первом обороте

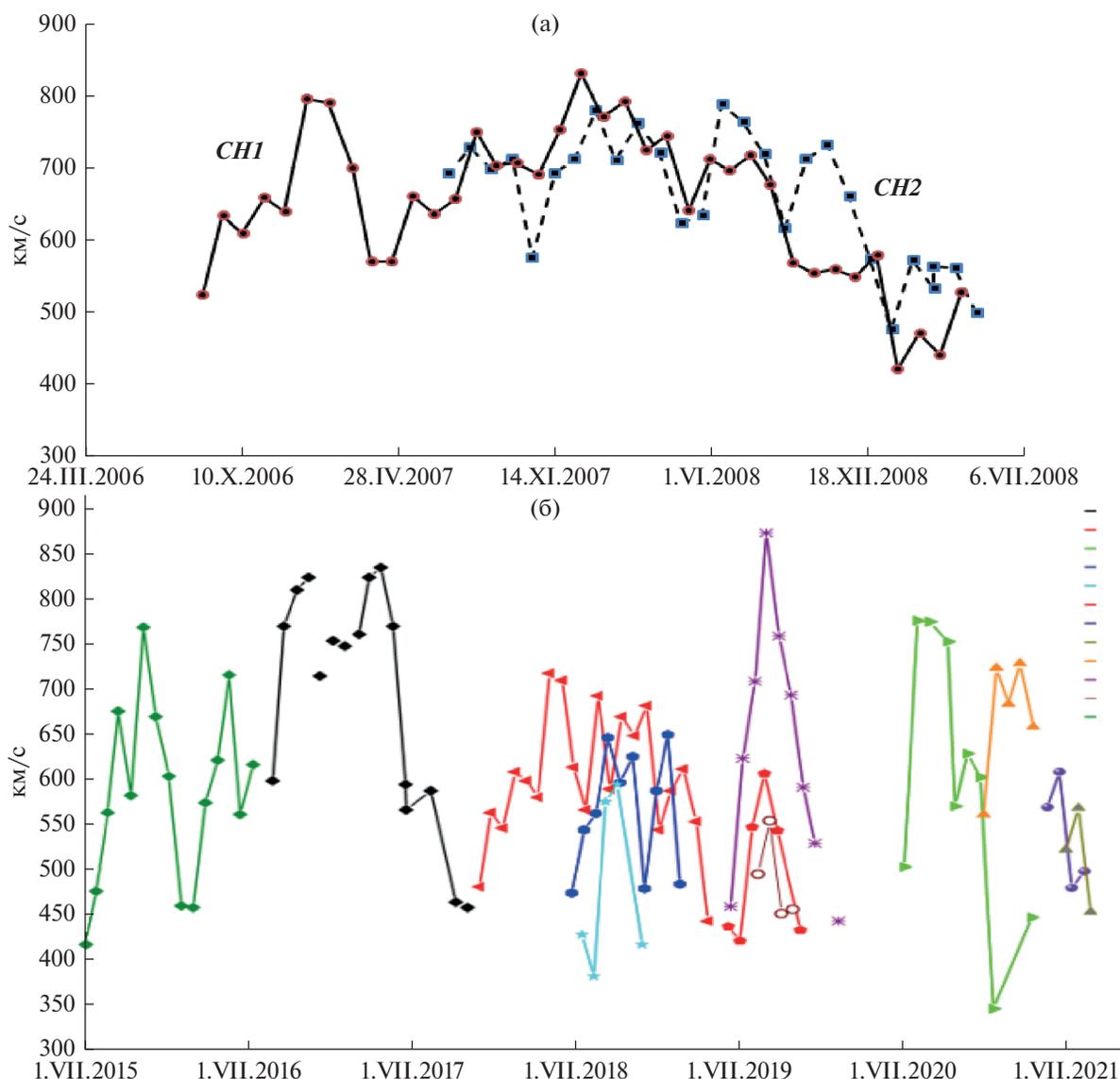


Рис. 2. (а) Максимальные скорости солнечного ветра из корональных дыр в южном полушарии (*CH1*) и вблизи экватора (*CH2*) на каждом обороте Солнца в 23-ем цикле СА, сопровождавшихся повышенными потоками надтепловых ионов в течении >10 оборотов Солнца (*CH1* – сплошная кривая и *CH2* – пунктирная кривая), (б) максимальные скорости СВ из КД с потоками ионов в 24-ом цикле СА.

потока ионов *CH1*. Спектры ионов с наибольшей крутизной наблюдались в потоках частиц на первых оборотах долгоживущих потоков.

Интенсивность надтепловых ионов из КД в среднем зависела от скорости СВ. На рис. 5 даны энергетические спектры ионов, усредненные по одновременно измеренной величине V_{SW} . Видно, что спектр каждого из ионов сдвигается в область больших энергий при увеличении скорости СВ. Спектры ионов, усредненные по скоростям солнечного ветра V_{SW} из КД, представленные на рис. 5, демонстрируют зависимость усредненной интенсивности ионов от скорости V_{SW} из КД. С увеличением скорости V_{SW} от <600 до >700 км/с, ин-

тенсивность всех надтепловых ионов возрастала. Этот эффект также указывает на то, что популяцией частиц, ускоренной до надтепловых энергий, могут служить тепловые (максвелловские) ионы солнечного ветра из КД.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Наблюдаемая картина распределения ионов по энергии свидетельствует о существовании высокотемпературного “хвоста” в солнечном ветре из КД. Причиной этого может быть как непосредственное ускорение ионов в источнике, в самой корональной дыре, так и ускорение ионов при

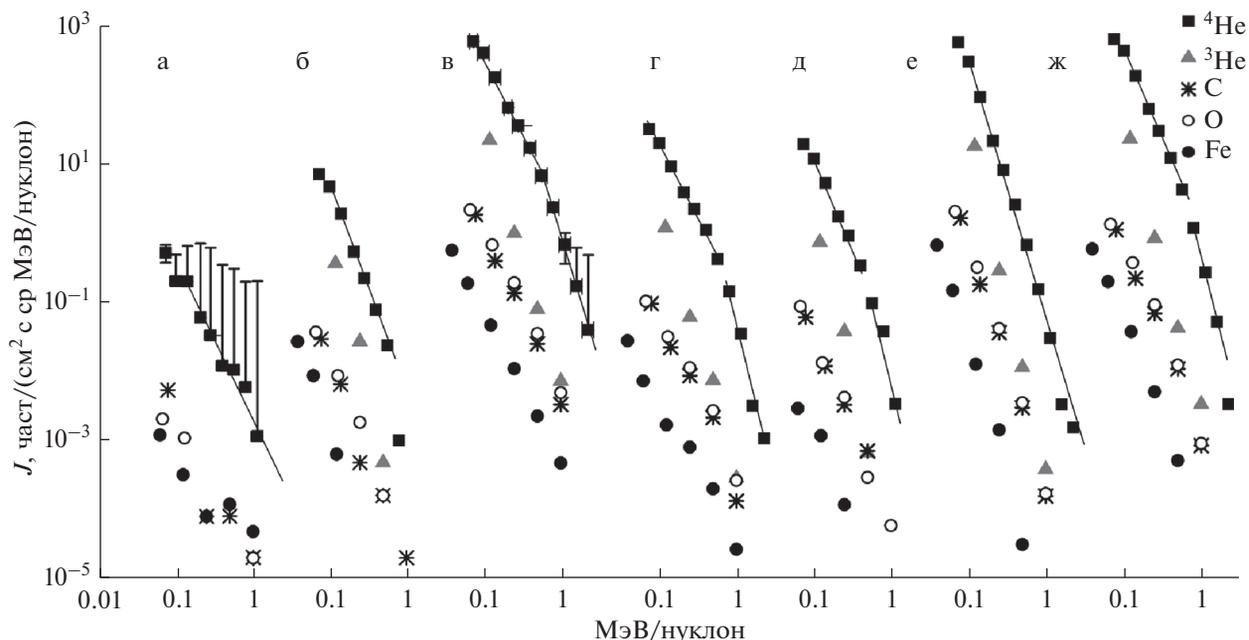


Рис. 3. Спектры ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe в потоках энергичных частиц из КД в 2006–2007 гг. в течение 7 следующих периодов регистрации ионов (а) 22–23.VIII.2006, (б) 18–19.IX.2006, (в) 29–31.I.2007, (г) 11–12.VII.2007, (д) 25–26.X.2007, (е) 23–24.XI.2007, (ж) 18–19.XII.2007. Спектры обозначены следующими символами: ^4He – квадраты, ^3He – треугольники, C – крестики, O – пустые кружки и Fe – черные кружки. Спектры были аппроксимированы степенной функцией (^4He , спектры а, б и е), либо комбинацией двух функций – степенной и экспоненциальной (спектры в, г, д и ж). Интенсивность ионов J дана в част/(см² с ср МэВ/нуклон). Величины γ приведены на рис. 4.

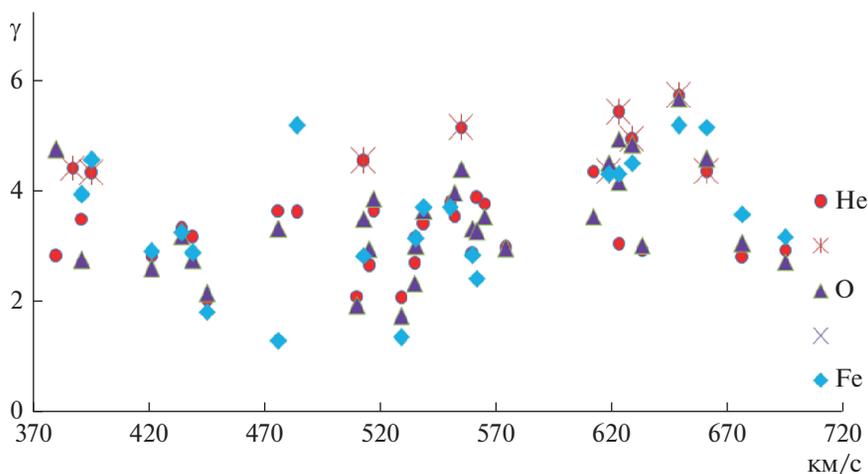


Рис. 4. Показатели γ энергетических спектров надтепловых ионов из корональных дыр в зависимости от скорости солнечного ветра, полученные при аппроксимации спектров степенной функцией $J(E) \sim E^{-\gamma}$ (наиболее крутые спектры обозначены Ж) и также при аппроксимации комбинацией двух функций $J(E) \sim E^{-\gamma} \exp(-E/E_0)$.

распространении жгута частиц из КД в процессе многократного взаимодействия ионов с магнитным полем, несомого потоком движущейся турбулизованной плазмы. Спектры частиц в результате этих механизмов ускорения могут отличаться, что сказывается на вариациях спектров в зависимости от вклада обоих источников в общий поток частиц, измеряемых на больших расстоя-

ниях от Солнца. Наблюдаемое увеличение интенсивности надтепловых ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe в потоке из КД с увеличением скорости солнечного ветра подтверждает связь высокотемпературного “хвоста” в солнечном ветре с механизмом ускорения потоков ионов из КД. В проведенном ранее изучении химсостава 0.04–2 МэВ/нуклон ионов C, O и Fe в потоках частиц из КД в 23-ем и 24-ом цик-

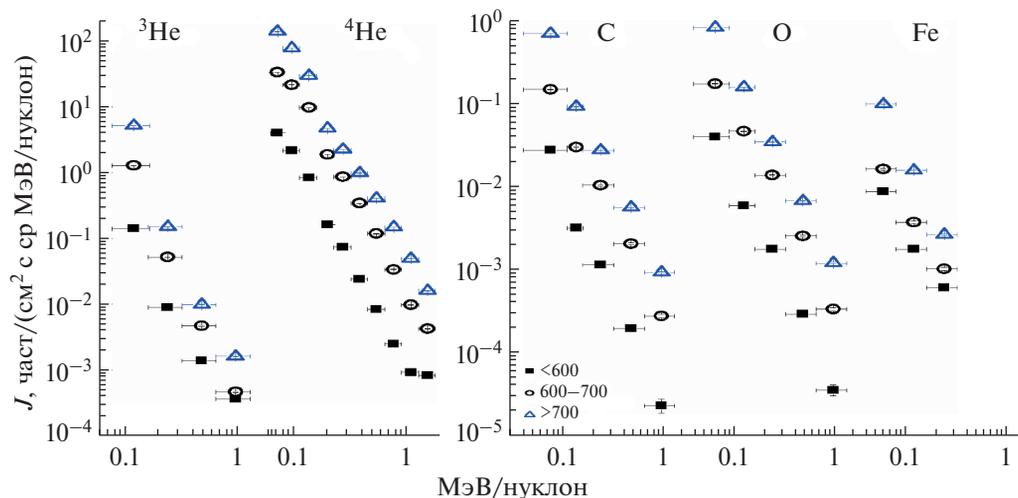


Рис. 5. Спектры надтепловых ионов ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, C, O и Fe в потоках частиц из КД, усредненные по трем интервалам скорости солнечного ветра: <600 км/с (квадраты), $600\text{--}700$ км/с (кружки) и >700 км/с (треугольники) из 25 корональных дыр в 2015–2017 гг.

лах СА [16] было показано, что величины содержания ионов C/O и Fe/O соответствовали содержанию этих ионов в тепловом (максвелловском) СВ.

Полученные результаты изучения ионного состава и энергетических спектров ионов с энергиями $0.04\text{--}2$ МэВ/нуклон из КД указывают на возможность того, что надтепловые ионы из КД являются высокотемпературным продолжением «максвелловского» энергетического распределения тепловых ионов солнечного ветра, т.е. представляют собой ускоренные тепловые ионы солнечного ветра. При этом проблемы определения области и механизма ускорения ионов остаются открытыми – тепловые ионы солнечного ветра с низкими и высокими значениями FIP могут быть ускорены до надтепловых энергий как в солнечной короне, так и в межпланетном пространстве разными механизмами ускорения ионов при разных условиях в короне Солнца в областях возникновения КД. Аппроксимация 98 спектров дала большой диапазон величины $2 < \gamma < 6$, что подтверждает наличие разных условий в областях ускорения ионов в потоках из КД.

Наличие изломов и отклонения спектров от степенного при возрастании энергии ионов скорее всего являются следствием постепенного изменения механизма ускорения, вместо степенного спектра возникает экспоненциальный, что можно рассматривать как изменение процессов ускорения по мере распространения потоков частиц из КД в межпланетное пространство.

Изучение химсостава и энергетических спектров надтепловых ионов в потоках частиц из корональных дыр на Солнце в 23–24-ом циклах дает дополнительную информацию для исследования этих механизмов ускорения.

Обнаруженное *Ulysses* возрастание скорости потоков солнечного ветра с гелиоширотой провоцирует вопрос: существует ли такой же высокотемпературный «хвост» в потоках энергичных частиц из полярных корональных дыр?

Экспериментальные данные по потокам заряженных частиц с приборов ULEIS и SWICS на космическом аппарате ACE были получены со следующих сайтов: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_ULEIS.html, http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_SWICS.html.

Данные о скорости СВ получены из сайта:

Coronal Hole History (CHH) site http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html.

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что исследование проводилось в отсутствие каких-либо коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neugebauer M., Snyder C.W. Solar Plasma Experiment // Science. 1962. V. 138. P. 1095–1097. <https://doi.org/10.1126/science.138.3545.1095-a>
2. Neugebauer M., Snyder C.W. Mariner 2 Observations of the Solar Wind: 1. Average Properties // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P. 4469–4484. <https://doi.org/10.1029/jz071i019p04469>
3. Gosling J., Pizzo V. Formation and Evolution of Corotating Interaction Regions and Their Three Dimensional Structure // Space Sci. Rev. 1999. V. 89. P. 21–52. <https://doi.org/10.1023/a:1005291711900>
4. Barnes C.W., Simpson J.A. Evidence for interplanetary acceleration of nucleons in corotating interaction re-

- gions // *Astrophysical Journal*. 1976. L. 210. 91B.
<https://doi.org/10.1086/182311>
5. *McComas D.J., Bame S.J., Barraclough B.L. et al.* Ulysses Return to the Slow Solar Wind // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1–4.
<https://doi.org/10.1029/97gl03444>
 6. *Marsden R.G.* Ulysses Explores the South Pole of the Sun // *ESA Bulletin*. 1995. № 82. P. 48–55.
 7. *Тверской Б.А.* Перенос и ускорение заряженных частиц в магнитосфере Земли // *Геомагнетизм и аэронаука*. 2008. С. 751–758.
 8. *Тверской Б.А.* Динамика радиационных поясов Земли. Москва. Наука. 1968.
 9. *Fisk L.A., Gloeckler G.* Acceleration and Composition of Solar Wind Suprathermal Tails // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 130. P. 153.
<https://doi.org/10.1007/s11214-007-9180-8>
 10. *Cohen C.M.S., Christian E.R., Cummings A.C. et al.* Energetic Particle Increases Associated with Stream Interaction Regions // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2020. V. 246. № 2. P. 10.
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab4c38>
 11. *Ebert R.W., Dayeh M.A., Desai M.I., Mason G.M.* Corotating Interaction Region Associated Suprathermal Helium Ion Enhancements at 1 AU: Evidence for Local Acceleration at the Compression Region Trailing Edge // *Astrophysical J.* 2012. V. 749. № 1. P. 73–86.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/749/1/73>
 12. *Bucik R., Innes D.E., Mall U. et al.* Multi-Spacecraft Observations of Recurrent 3He-Rich Solar Energetic Particles // *Astrophysical Journal*. 2014. V. 786. P. 71–83.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/786/1/7>
 13. *Bucik R., Innes D.E., Mall U. et al.* Multi-Spacecraft Observations of Recurrent 3He-Rich Solar Energetic Particles // *Статья архив*. 2018. arXiv:1403.4856v1 [astro-ph.SR].
 14. *Viall N.M., DeForest C.E., Kepko L.* Mesoscale Structure in the Solar Wind // *Front. Astron. Space Sci.* 2021. V. 8.
<https://doi.org/10.3389/fspas.2021.735034>
 15. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сурова Г.М. и др.* Надтепловые ионы в потоках солнечного ветра из корональных дыр на 1 а.е. // *Астрон. журн.* 2016. Т. 93. С. 675.
 16. *Zeldovich M.A., Kecske-mety K., Logachev Yu.I.* Suprathermal Ions from Coronal Holes at 1 AU in Solar Cycles 23 and 24: Dependence of ion abundances on solar wind speed // 2021. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. V. 502. № 2. P. 2961–2969.
 17. *Lepri S.T., Landi E., Zurbuchen T.H.* Solar Wind Heavy Ions Over Solar Cycle 23: *Ace/Swics* Measurements // *Astrophysical Journal*. 2013. V 768. № 1. P. 94–107.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/1/94>
 18. *Zel'dovich M.A., Ishkov V.N., Logachev Yu.I., Kecske-mety K.* Ion abundances of low-energy quiet period particle fluxes at 1 AU // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2011. V. 75. № 6. P. 776.
 19. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сурова Г.М.* Энергетические спектры и относительное содержание ионов С, О и Fe на 1 а.е. при спокойном Солнце // *Астрон. журн.* 2011. Т. 88. № 2. С. 409.
 20. *Zeldovich M.A., Logachev Yu.I., Surova G.M., Kecske-mety K.* Suprathermal Ions in Quiescent Periods at 1 AU in the 23rd and 24th Solar-Activity Cycles // *Astronomy Reports*. 2014. V 58. № 6. P 399-405.
<https://doi.org/10.1134/S1063772914050072>
 21. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И.* надтепловые ионы 4He, O и Fe на 1 а. е. в спокойное время в 2006–2012 гг. // *Известия РАН. Серия физическая*. 2017. Т. 81. № 2. С. 159–161.
<https://doi.org/10.7868/S0367676517020478>
 22. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Кекемети К.* Временные вариации потоков надтепловых ионов и их относительное содержание на 1 а.е. в 1998-2017 // *Астрономический Журнал*. 2019. Т. 96. № 6. С. 523–528.
<https://doi.org/10.1134/S0004629919060070>
 23. *Lee C.O., Luhmann J.G., de Pater I. et al.* Organization of Energetic Particles by the Solar Wind Structure During the Declining to Minimum Phase of Solar Cycle 23 // *Solar Phys.* 2010. V. 263. P. 239–261.
<https://doi.org/10.1007/s11207-010-9556-x>
 24. *Zhao L., Landi E., Fisk L.A. et al.* The coherent relation between the solar wind proton speed and O7+/O6+ ratio and its coronal sources // *AIP Conference Proceedings*. 2016. V. 1720. 020007.
<https://doi.org/10.1063/1.4943808>
 25. *Fisk L.A., Lee M.A.* Shock acceleration of energetic particles in corotating interaction regions in the solar wind // *Astrophysical Journal*. 1980. Part 1. V. 237. P. 6.
<https://doi.org/10.1086/157907>
 26. *Fisk L.A., Gloeckler G.* Particle Acceleration in the Heliosphere: Implications for Astrophysics // *Space Science Reviews*. 2012. V. 173. № 1–4. P. 433–458.
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9899-8>
 27. *Fisk L.A., Gloeckler G.* The case for a common spectrum of particles accelerated in the heliosphere: Observations and theory // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2014. V. 119. № 11. P. 8733–8749.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020426>