

УДК 523.62–726

ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ И ИХ ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ НА 1 а.е. В 1998–2017 гг.

© 2019 г. М. А. Зельдович^{1*}, Ю. И. Логачев^{1**}, К. Кечкемети^{2***}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Научно-исследовательский центр физики им. Вигнера Венгерской академии наук,
Будапешт, Венгрия

Поступила в редакцию 09.10.2018 г.; после доработки 23.01.2019 г.; принята к публикации 29.01.2019 г.

Проведено изучение временных вариаций потоков надтепловых (0.04–2 МэВ/нуклон) ионов ^3He , ^4He , С, О и Fe и их относительного содержания в 23 и 24 солнечных циклах (СЦ) по данным прибора ULEIS на КА ACE. Получены положительные значения корреляций интенсивностей ионов, регистрируемых на 1 а.е., с параметрами солнечной активности, что указывает на происхождение надтепловых ионов преимущественно в активных процессах на Солнце. Показано, что в максимумах активности интенсивности всех ионов в СЦ 24 были меньше, чем в СЦ 23, как в возмущенные, так и в спокойные периоды циклов. В противоположность этому, временное поведение отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$, С/О и Fe/О было различно и зависело от величины первого ионизационного потенциала ионов. Распределения Fe/О показали большие, средние и медианные значения в СЦ 23, в то время как распределения С/О и $^3\text{He}/^4\text{He}$ для 23 и 24 СЦ не демонстрировали существенных различий. Полученные результаты позволяют предположить, что потоки надтепловых ионов Fe от Солнца во вспышках и в короне уменьшились в СЦ 24 по сравнению с СЦ 23 в большей степени, чем потоки ионов ^3He , ^4He , С и О.

DOI: 10.1134/S0004629919060070

1. ВВЕДЕНИЕ

При спокойном Солнце в межпланетном пространстве всегда присутствуют частицы, энергия которых в несколько раз превышает среднюю тепловую энергию частиц солнечного ветра. Надтепловые потоки ионов солнечного ветра несут определенную информацию как об их источниках, так и о процессах на Солнце, ускоряющих ионы до надтепловых энергий. Кроме солнечных надтепловых частиц наблюдаются также частицы, ускоренные непосредственно в солнечном ветре. Во многих случаях изучение вариаций потоков и состава надтепловых частиц разной природы позволяют определить их источники. Например, слабые солнечные вспышки, которые возникают на Солнце даже в спокойные периоды солнечной активности. Особый интерес представляют потоки солнечного ветра при спокойном Солнце, которые являются

фоновыми потоками для всех наблюдаемых возрастных. Знание фоновых потоков позволяет выделить основную составляющую непосредственно возрастания. Сравнивая состав надтепловых ионов и их относительное содержание с составом короны, фотосферы Солнца, корональных дыр и других образований на Солнце, можно судить об источнике ускоренных частиц.

Ионный состав в быстром и медленном солнечном ветре изучался в [1, 2] и в потоках частиц, ускоренных в межпланетном пространстве в области коротящихся и транзитных ударных волн [3–5]. В работах [6–9] была проведена оценка относительного содержания надтепловых ионов с энергиями 0.04–1 МэВ/нуклон в спокойные периоды солнечной активности (СА) в 23 цикле, и было показано, что величины отношений С/О и Fe/О в спокойное время зависят от уровня СА. Относительное содержание ионов в потоках частиц служит указанием на популяцию частиц, ускоренных в различных процессах на Солнце или в межпланетном пространстве, и образующих

*E-mail: mariya@srd.sinp.msu.ru

**E-mail: logachev@srd.sinp.msu.ru

***E-mail: kecske@rmki.kfki.hu

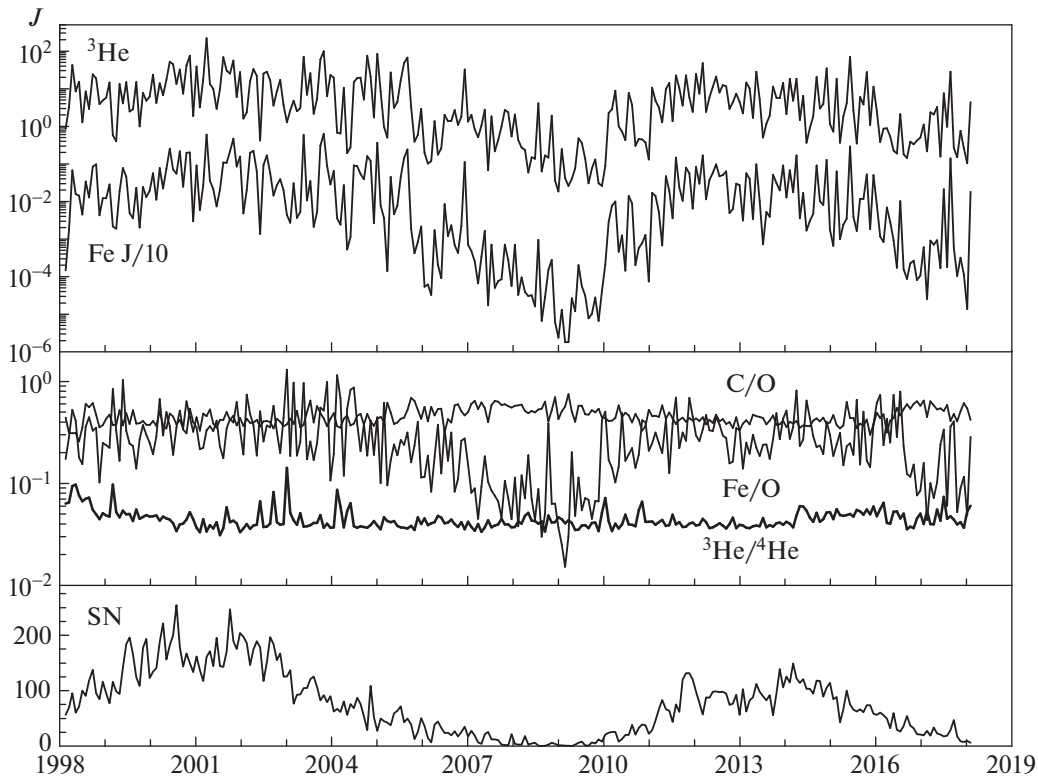


Рис. 1. 27-дневные средние величины в период времени 19.02.1998–4.02.2018 интенсивностей ионов ^3He и Fe (поделены на 10) с энергией 0.08–0.16 МэВ/нуклон (вверху), относительного содержания ионов C/O, Fe/O и $^3\text{He}/^4\text{He}$ (в центре) и числа солнечных пятен SN (внизу).

потоки надтепловых ионов. В максимуме цикла относительное содержание этих ионов было близко к содержанию во вспышках СКЛ (солнечные космические лучи), а в минимуме цикла — к значениям в солнечном ветре и/или в рекуррентных областях взаимодействия быстрых и медленных потоков солнечного ветра. Результаты, полученные в [10, 11], показали преимущественно вспышечное происхождение надтепловых ионов (ускорение в крупных и мелких солнечных вспышках) на 1 а.е. во внутренней гелиосфере как в спокойные, так и в возмущенные периоды солнечной активности.

В настоящей работе по данным прибора ULEIS на КА ACE исследуются временные вариации интенсивностей надтепловых ионов ^3He , ^4He , C, O, Fe (энергии 0.04–1 МэВ/нуклон) на 1 а.е. и относительного содержания этих ионов в течение 23 и 24 СЦ.

2. ПОТОКИ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ И ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В 1998–2017 гг.

Временные профили 27-дневных средних интенсивностей ионов ^3He и Fe с энергией 0.08–0.16 МэВ/нуклон на протяжении почти полных

2-х последовательных последних солнечных циклов представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, интенсивности надтепловых ионов изменяются в фазе с числом солнечных пятен SN¹, так же, как будет показано ниже, выглядят временные зависимости интенсивностей всех изучаемых в данной работе надтепловых ионов. При этом особенности изменения со временем относительных содержаний ионов зависят от величины первого ионизационного потенциала иона (FIP) [12]. Эту зависимость четко демонстрирует рис. 1 (центральная панель), где даны 27-дневные средние величины $^3\text{He}/^4\text{He}$, C/O и Fe/O. Здесь два первых отношения ионов с FIP > 10 эВ остаются почти постоянными на протяжении двух СЦ, в то время как Fe/O с FIP(Fe) = 7.6 эВ изменяется в фазе с числом SN в солнечных циклах, достигая наибольших значений в максимумах циклов.

Мы провели сравнение временного хода надтепловых ионов с временными вариациями различных параметров солнечной активности. Это сравнение показало положительную корреляцию между всеми изучаемыми величинами. На рис. 2 представлены сглаженные по 13 месяцам среднемесячные

¹ <http://wso.stanford.edu/sn.html>

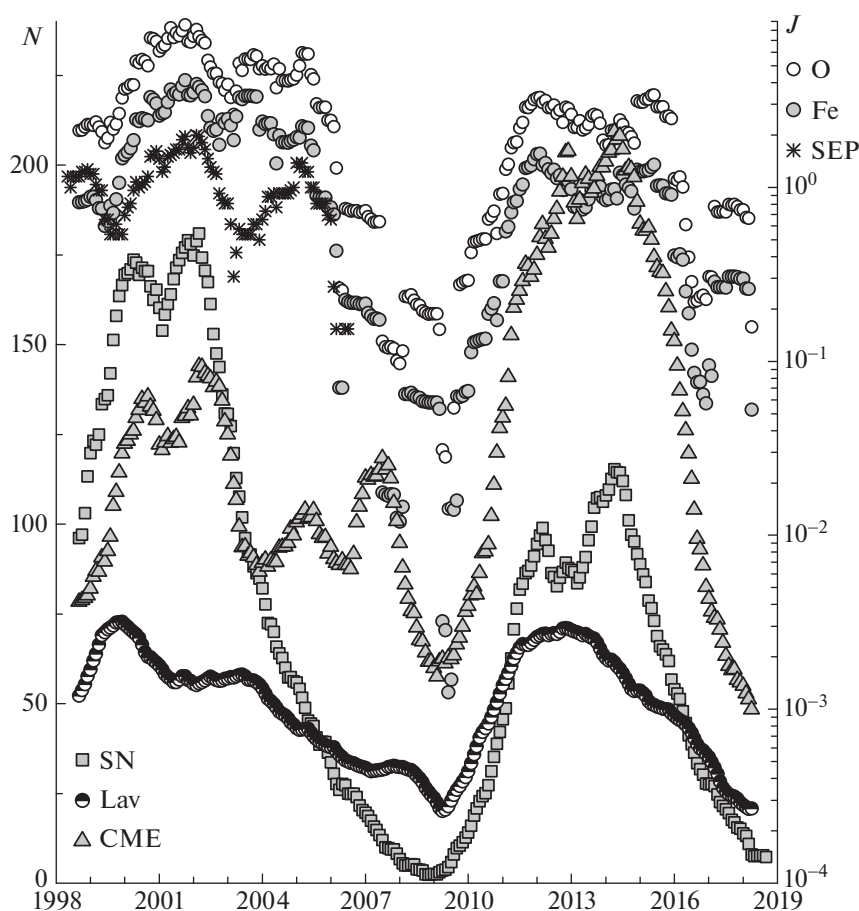


Рис. 2. Сглаженные по 13 месяцам: среднемесячные интенсивности J в единицах [$\text{част}/\text{см}^2 \times \text{с} \times \text{ср} \times \text{МэВ}/\text{нуклон}$] ионов O и Fe с энергией $\sim 0.08\text{--}0.16$ МэВ/нуклон, числа вспышечных протонных событий SEP по каталогу СПС 1997–2008 [14], чисел солнечных пятен SN, угла наклона гелиосферного токового слоя (<http://wso.stanford.edu/Tilts.html>) Lav и числа корональных выбросов массы (SOHO LASCO CME catalog, <http://vso.nascom.nasa.gov/cgi-bin/vso/catalog.pl>) CME.

величины интенсивности надтепловых ионов O и Fe и различные параметры СА. Временной ход ионов демонстрирует 2-х пиковую структуру потоков ионов в максимумах циклов с провалами, аналогичными провалу Гневыхева [13] в параметрах СА. Однако, как видно на рис. 1 и 2, в 23 цикле провал интенсивности ионов одновременно с провалом в числе вспышек СКЛ произошел во время систематического уменьшения числа солнечных пятен до минимума в 2009 г.

Получены положительные значения коэффициентов корреляции интенсивностей ионов с параметрами солнечной активности (см. табл. 1). В СЦ 23 наилучшая корреляция имеет место между интенсивностями ионов и числами солнечных пятен, а также числом вспышечных протонных событий по каталогу СПС 1997–2008 [14], что предполагает значительный вклад частиц от вспышек СКЛ в потоки ионов на 1 а.е.

3. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ НА 1 а.е. В 23 И 24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

На рис. 3 представлены распределения 5-дневных средних сглаженных величин относительного содержания ионов ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, C/O и Fe/O с энергией $\sim 0.08\text{--}0.16$ МэВ/нуклон в 23 и 24 СЦ. Приведенные распределения были построены по всем 5-дневным средним интенсивностям ионов, полученных в 1999–2006 гг. и в 2010–2017 гг. и, следовательно, включают целиком все измерения — в спокойное время, в периоды различных спорадических возрастаний потоков частиц, и во время спада солнечной активности. Из рисунка видно, что кривые распределений ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ и Fe/O для СЦ 24 сдвинуты в область меньших величин относительно распределений для СЦ 23, при этом кривая ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ в СЦ 23 сдвинута в сторону больших значений по сравнению с СЦ 24 только

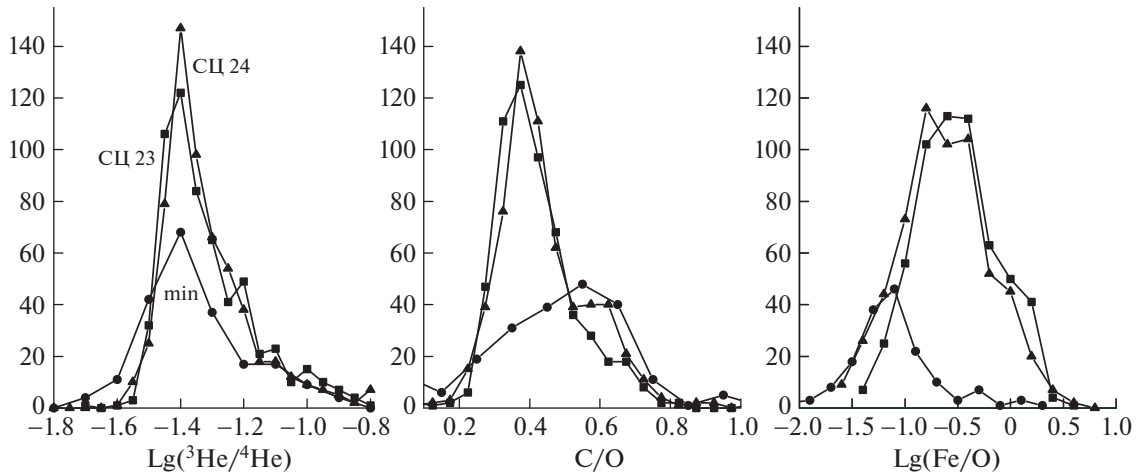


Рис. 3. Распределения пяти дневных средних ($\sim 0.08\text{--}0.16$ МэВ/нуклон) значений относительного содержания ионов $^3\text{He}/^4\text{He}$, C/O и Fe/O. Сплошные тонкие кривые, соединяющие квадраты, представляют распределения во время фаз возрастания и максимума СЦ 23 (1999–2006 гг.), линии, соединяющие треугольники — для тех же стадий в СЦ 24 (2010–2014 гг.). Толстые сплошные кривые, соединяющие точки, представляют распределения во время минимума солнечной активности (2008–2009 гг.).

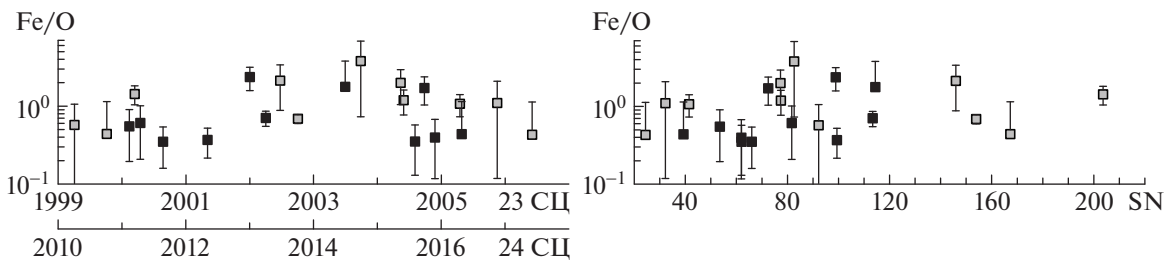


Рис. 4. Величины Fe/O в спокойных периодах СА типа FL [11] в СЦ 23 (серые квадраты) и в СЦ 24 (черные квадраты) в зависимости от времени (слева) и от среднегодовых чисел солнечных пятен SN (справа).

в области больших значений абсолютных величин $\lg(^3\text{He}/^4\text{He}) > -1.25$. Отметим, что в СЦ 24 наблюдалось меньшее число дней со значениями отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$ и Fe/O, больших значений в максимумах распределений. Этот результат означает, что интенсивности ионов ^3He и Fe были ниже в СЦ 24 в большей степени, чем ионы ^4He и O. Полученные здесь распределения C/O и Fe/O показывают, что вариации и состав надтепловых ионов также определяются величиной их первого ионизационного потенциала (FIP), что не противоречит выводам, полученным в [15].

4. ИНТЕНСИВНОСТИ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ И ИХ ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ НА 1 а.е. В МАКСИМУМАХ АКТИВНОСТИ 23 И 24 ЦИКЛОВ

В табл. 2 даны интенсивности надтепловых ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe с энергией $\sim 0.08\text{--}0.16$ МэВ/нуклон в периоды максимумов и спада активности СЦ 23 и 24. Так же как и числа солнечных пятен, интенсивности ионов показали

по 2 максимума интенсивности в каждом цикле в периоды, указанные в таблице. Из таблицы видно, что во время максимумов солнечной активности в СЦ 23 и 24 наблюдаются большие интенсивности всех ионов в каждом из двух максимумов в СЦ 23, причем ионы Fe дают наибольшую разницу интенсивностей в этих циклах.

На рис. 4 приведены результаты сравнения величины относительного содержания Fe/O в спокойные периоды в СЦ 23 и 24, обозначенные FL в [11], во время которых происхождение потоков надтепловых ионов было определено в [11] как ускоренных в очень малых вспышках в солнечной короне. Видно, что величина Fe/O в периодах FL была выше в СЦ 23, где значения $\text{Fe}/\text{O} > 1$ были получены в 7 спокойных периодах, а в СЦ 24 — в 3 периодах. Нужно отметить, что величины отношений Fe/O были получены из измерений интенсивностей ионов в спокойные периоды времени, определенные по критериям, разработанным ранее и приведенным в наших статьях [10, 11]. На рис. 4 даны значения Fe/O для спокойных периодов, но

Таблица 1. Коэффициенты корреляции скользящих средних по 13 месяцам среднемесячных интенсивностей ионов и параметров солнечной активности в СЦ 23 в 1999–2006 гг. и в СЦ 24 в 2010–2017 гг.

Ионы	СЦ 23//СЦ 24			СЦ 23
	Lav	SN	CME	N SEP
³ He	0.59//0.73	0.68//0.79	0.54//0.79	0.60
⁴ He	0.52//0.82	0.63//0.81	0.53//0.79	0.58
C	0.64//0.74	0.78//0.80	0.64//0.82	0.77
O	0.65//0.76	0.77//0.82	0.63//0.84	0.73
Fe	0.64//0.77	0.76//0.86	0.61//0.84	0.58
³ He/ ⁴ He	0.38//–0.57	0.24//–0.25	–0.22//–0.20	–0.05
C/O	0.28//–0.73	0.41//–0.85	0.38//–0.91	0.58
Fe/O	0.66//0.77	0.66//0.85	0.42//0.85	0.17

Таблица 2. Средние значения во время роста, максимумов и спада солнечной активности интенсивностей J ионов ³He, ⁴He, C, O, Fe с энергиями 0.08–0.16 МэВ/нуклон и их отношений в СЦ 23 и 24

№ цикла, годы	³ He	⁴ He	C	O	Fe	³ He/ ⁴ He	C/O	Fe/O
	Интенсивности J					Отношения		
СЦ 23, 1998.0–2004.0	18.4	451.4	0.9	2.1	0.8	0.06	0.45	0.4
СЦ 24, 2010.0–2016.0	7.2	167.9	0.4	0.9	0.3	0.06	0.4	0.3
23/24	2.5	2.7	2.4	2.3	2.8	1.05	1.1	1.2
1-й максимум								
СЦ 23, 2000.5–2001.6	61.6	826.0	4.5	7.5	6.6	0.013	0.04	0.9
СЦ 24, 2011.4–2012.8	12.8	322.0	0.7	1.55	0.5	0.05	0.4	0.35
23/24	4.8	2.6	6.9	4.8	12.7	0.25	0.11	2.5
2-й максимум								
СЦ 23, 2003.5–2005.5	15.5	232.3		1.7	0.6	0.07	0.5	0.35
СЦ 24, 2013.1–2015.7	9.01	199.5	0.5	1.3	0.4	0.06	0.4	0.3
23/24	1.7	1.2		1.35	1.6	1.1	1.1	1.2
Спад активности								
СЦ 23, 2005.5–2007.9	6.22	169.0	0.31	0.65	0.18	0.049	0.5	0.22
СЦ 24, 2015.7–2017.0	3.34	64.5	0.14	0.345	0.1	0.054	0.47	0.32
23/24	1.86	2.6	2.2	1.9	1.8	0.91	1.06	0.67

Примечание. Приведены 5-дневные средние величины интенсивностей и относительного содержания ионов в указанные периоды времени. Интенсивность ионов J дана в единицах [част/(см² с ср МэВ/нуклон)]

таких, когда величина Fe/O оказалась в пределах значений, характерных для солнечных протонных событий (SEP-events), как импульсных, так и постепенных. В течение 2017 г. такие периоды не наблюдались, поэтому на рис. 4 черные квадраты в 2017 г. отсутствуют.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследованы временные вариации и относительное содержание надтепловых (0.04–1 МэВ/нуклон) ионов ³He, ⁴He, C, O и Fe по данным прибора ULEIS на КА ACE на 1 а.е. в 1998–2017 гг.

Проведено сравнение интенсивностей ионов в последних двух солнечных циклах. Показано, что во время максимумов циклов интенсивности всех ионов меньше в СЦ 24, как в возмущенные, так и в безвспышечные периоды солнечной активности, где соответственно относительное содержание этих ионов было близко к содержанию в солнечной короне или во вспышках солнечных космических лучей.

Получены положительные значения корреляций интенсивностей ионов с параметрами солнечной активности и углом наклона токового слоя. В СЦ 23 наилучшая корреляция наблюдалась между интенсивностями ионов и числами солнечных пятен и числом вспышечных протонных событий по каталогу СПС 1997–2008 [13], что предполагает преимущественно вспышечное происхождение ионов на 1 а.е. В противоположность этому, временное поведение отношений ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, C/O и Fe/O различно и зависит от величины первого ионизационного потенциала (FIP) ионов. Величины ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ и C/O с FIP > 10 эВ остаются примерно постоянными на протяжении 2 последних циклов, в то время как Fe/O с FIP(Fe) = 7.6 эВ изменяется в фазе с солнечными циклами, достигая наибольших значений в максимумах циклов, при этом распределение Fe/O в СЦ 23 показало большие средние и медианные значения, в то время как распределения C/O и ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ для СЦ 23 и 24 не демонстрируют различий.

Полученные результаты позволяют предположить, что потоки надтепловых ионов Fe от Солнца во вспышках и в короне уменьшились в СЦ 24 в большей степени, чем потоки ионов ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, C и O.

БЛАГОДАРНОСТИ

Экспериментальные данные по потокам заряженных частиц прибора ULEIS на косми-

ческом аппарате ACE были получены на сайте http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_ULEIS.html.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. A. Fisk and G. Gloeckler, *Space Sci. Rev.* **130**, 153 (2007).
2. R. von Steiger, N. A. Schwadron, L. A. Fisk, J. Geiss, et al., *J. Geophys. Res.* **105**(A12), 27217 (2000).
3. G. Gloeckler, and J. Geiss, *Space Sci. Rev.* **130**, 139 (2007).
4. G. M. Mason, R. A. Leske, M. I. Desai, C. M. S. Cohen, et al., *Astrophys. J.* **678**, 1458 (2008).
5. S. W. Kahler, A. J. Tylka, and D. V. Reames, *Astrophys. J.* **701**, 561 (2009).
6. M. I. Desai, G. M. Mason, J. E. Mazur, and J. R. Dwyer, *Astrophys. J.* **645**, L81 (2006).
7. M. I. Desai, G. M. Mason, R. E. Gold, S. M. Krimigis, et al., *Astrophys. J.* **649**, 470 (2006).
8. M. I. Desai, M. A. Dayeh, and G. M. Mason, in: *Shock waves in space and astrophysical environments*, 18th Ann. Internat. Astrophysics Conf., AIP Conf. Proc., **1183**, 11 (2009).
9. M. A. Dayeh, M. I. Desai, J. R. Dwyer, H. K. Rassoul, G. M. Mason, and J. E. Mazur, *Astrophys. J.* **693**, 1588 (2009).
10. М. А. Зельдович, Ю. И. Логачев, Г. М. Сурова, *Астрон. журн.* **88**, 409 (2011).
11. М. А. Зельдович, К. Кецкемети, и Ю. И. Логачев, *Solar Phys.* **293**, 3 (2018).
12. U. Feldman and K. G. Widing, *Astrophys. J.* **414**, 381 (1993).
13. M. N. Gnevyshev, *Solar Phys.* **1**, 107 (1967).
14. Yu. I. Logachev, G. A. Bazilevskaya, E. V. Vashenyuk, E. I. Daibog, et al., *Catalog of Solar Proton Events in the 23rd Cycle of Solar Activity (1996–2008)* (M.: Geophys. Center of the Russian Academy of Sciences, 2015).
15. U. Feldman, *Space Sci. Rev.* **85**, 227 (1998).