

УДК 523.9-36

ОБЗОР ОСОБЕННОСТЕЙ СОСТАВА СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, БОГАТЫХ ИЗОТОПОМ ^3He И ТЯЖЕЛЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В.В. Авдонин

Аннотация

В работе рассмотрены основные особенности состава солнечных космических лучей. Наибольшее внимание уделено элементному, ионному и изотопному составу солнечных космических лучей, богатых гелием-3 и железом. Сделан вывод, что не существует теоретических моделей, объясняющих всю совокупность регистрируемых данных.

Ключевые слова: солнечные космические лучи, коэффициент обогащения, содержание элементов, изотопный состав, зарядовые состояния, сверхтяжелые элементы.

Введение

Солнечными космическими лучами (СКЛ) называются энергичные заряженные частицы (электроны, протоны, ядра гелия и более тяжелые ядра), инжектированные Солнцем в межпланетное пространство. Изучение состава СКЛ может предоставить ценную информацию о процессах, происходящих во время солнечной вспышки. Так, например, содержание ядер тяжелых элементов с высокой энергией (>20 МэВ/нуклон) в СКЛ дает информацию об элементном составе солнечной атмосферы. Содержания этих же элементов, соответствующие диапазону более низких энергий ($\approx 1-10$ МэВ/нуклон), характеризуют механизмы ускорения частиц, под действием которых формируется состав СКЛ [1].

Цель работы – рассмотреть основные характеристики наблюдаемого состава солнечных космических лучей, а также описывающие их физические модели. Необходимость проведения обзора литературы связана с получением (в результате усовершенствования измерительной техники) качественно новых данных о составе СКЛ, касающихся прежде всего изотопного состава СКЛ для тяжелых элементов и обогащения сверхтяжелыми элементами, а также с регистрацией большого числа новых событий [2, 3] исследуемого класса, которые позволяют расширить уже известные каталоги (например, [4, 5]).

В настоящее время различают так называемые импульсные (“impulsive”) и постепенные (“gradual”) события, характеристики которых сильно отличаются друг от друга. Импульсное событие длится несколько минут и в нем преобладают электроны; постепенное может длиться несколько часов и даже суток, в нем преобладают протоны. Состав СКЛ, появившихся в результате импульсного события, значительно обогащен изотопом ^3He и тяжелыми элементами по сравнению с составом плазмы солнечной атмосферы [1]. Рассмотрим вопрос о содержании ^3He и тяжелых элементов в СКЛ более подробно, так как в дальнейшем нас больше всего будет интересовать именно этот аспект состава СКЛ, формирующегося в постепенных и, особенно, импульсных событиях.

Табл. 1

Относительный состав СКЛ и солнечной фотосферы. Абсолютное содержание элемента О принято за 1000

Элемент	$\Gamma_{i,O}$ в фотосфере	Постепенное событие		Импульсное событие	
		$\Gamma_{i,O}$	$E_{i,O}$	$\Gamma_{i,O}$	$E_{i,O}$
C	501 ± 47	465 ± 9	0.93 ± 0.09	303 ± 46	0.61 ± 0.09
N	138 ± 35	124 ± 3	0.90 ± 0.23	135.5 ± 28	0.98 ± 0.21
O	1000 ± 115	1000 ± 10	1.00 ± 0.12	1000 ± 79	1.00 ± 0.08
Ne	151 ± 35	152 ± 4	1.01 ± 0.24	488 ± 49	3.23 ± 0.33
Na	4.07 ± 0.28	10.4 ± 1.1	2.56 ± 0.32	65 ± 21	16.07 ± 5.10
Mg	72.4 ± 3.3	196 ± 4	2.71 ± 0.14	805 ± 73	11.12 ± 1.00
Al	5.89 ± 0.27	15.7 ± 1.6	2.67 ± 0.30	100 ± 27	16.99 ± 4.52
Si	70.8 ± 3.2	152 ± 4	2.15 ± 0.11	543 ± 64	7.67 ± 0.90
S	31.6 ± 0.3	31.8 ± 0.7	1.01 ± 0.02	38 ± 15	1.20 ± 0.47
Ar	7.24 ± 1.34	3.3 ± 0.2	0.46 ± 0.09	75 ± 29	10.35 ± 3.99
Ca	4.47 ± 0.31	10.6 ± 0.4	2.37 ± 0.19	65 ± 24	14.42 ± 5.31
Fe	60.3 ± 4.1	134 ± 4	2.22 ± 0.17	1412 ± 114	23.42 ± 1.89

1. Коэффициент обогащения состава СКЛ

В некоторых событиях экспериментально наблюдается несоответствие между содержанием элементов (^3He и более тяжелых, в том числе и Fe) в солнечной атмосфере и в СКЛ, состав которых формируется из солнечной плазмы. В табл. 1 представлен элементный состав солнечной фотосферы и состав СКЛ, формирующихся в постепенном [6] и импульсном [3, 7] событиях. Для характеристики отклонения состава СКЛ от состава солнечной атмосферы используют коэффициент $E_{i,j}$ обогащения i -го элемента относительно j -го. Если обозначить содержание i -го элемента по отношению к j -му элементу величиной $\Gamma_{i,j} = n_i/n_j$ (n – концентрация), то коэффициент обогащения i -го элемента в составе СКЛ определяется как

$$E_{i,O} = \Gamma_{i,O}^{\text{SCR}} / \Gamma_{i,O}^{\text{SA}},$$

где $\Gamma_{i,O}^{\text{SCR}}$ – содержание i -го элемента в СКЛ, $\Gamma_{i,O}^{\text{SA}}$ – содержание этого же элемента в солнечной атмосфере.

Содержание и коэффициент обогащения состава для ^3He принято определять относительно ^4He , а для более тяжелых элементов – относительно кислорода ($E_{i,O}$) или, гораздо реже, относительно углерода или кремния [9].

2. Обогащение СКЛ гелием-3

Солнечные вспышки, богатые ^3He , стали объектом интенсивного изучения на протяжении последних нескольких десятилетий. Первое сообщение о регистрации аномально высокого отношения потоков $^3\text{He}/^4\text{He}$ появилось в 1962 году [8]. Было обнаружено, что отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в конструкционных элементах космического корабля Discoverer-17 во время вспышки 12 ноября 1960 года достигало 20%, а в составе солнечной атмосферы $^3\text{He}/^4\text{He} \simeq 4 \cdot 10^{-4}$. За время наблюдений богатых ^3He солнечных вспышек накопился обширный массив информации об этом явлении. Среди различных характеристик таких вспышек можно выделить следующие, являющиеся для них общими:

- высокое отношение потоков $^3\text{He}/^4\text{He}$ в СКЛ, достигающее значение $\simeq 8$; обогащение состава ^3He при этом достигает четырех порядков;
- отсутствие измеримых потоков дейтерия и трития;

Табл. 2

Наблюдаемые ионизационные состояния гелия в богатых ${}^3\text{He}$ событиях

	${}^3\text{He}^+ / {}^3\text{He}^{2+}$	${}^4\text{He}^+ / {}^4\text{He}^{2+}$
${}^3\text{He}/{}^4\text{He} > 0.4$	0.037 ± 0.020	0.065 ± 0.020
${}^3\text{He}/{}^4\text{He} > 0.6$	< 0.020	0.075 ± 0.025

- отношение потоков ${}^3\text{He}/p$ варьируется в пределах от $\simeq 0.01$ до $\simeq 0.1$;
- события, богатые ${}^3\text{He}$, обычно связаны со слабыми (низкоэнергетичными) оптическими вспышками в западной полусфере Солнца и сопровождаются рентгеновским и радиоизлучением;

- при низких энергиях СКЛ обогащены тяжелыми элементами [9].

Эти данные были получены при изучении состава СКЛ в диапазоне энергий менее 10 МэВ/нуклон. При недавнем изучении соотношения потоков ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ при более высоких энергиях авторами работы [10] было установлено, что во всех событиях, в которых наблюдается более чем 0.5 ионов ${}^4\text{He}$ на 1 ($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ/нуклон}$), фиксируются и значимые величины потоков ${}^3\text{He}$, причем наиболее часто наблюдаемое соотношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ составляет ~ 0.01 , а соотношение $\sim (0.1 \div 1)$ фиксируется гораздо реже.

Отношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ может быть очень высоким лишь в течение короткого промежутка времени; длительность события, богатого ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, редко превышает 1 сут. Типичная особенность временного профиля – резкое увеличение потока ${}^3\text{He}$ в начале события. Величина коэффициента обогащения зависит от физических характеристик самого события (например, от диапазона энергий, в котором регистрируются потоки ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$) и может сильно варьироваться в различных событиях. Коэффициент обогащения для ${}^3\text{He}$ увеличивается с ростом энергии в определенном диапазоне энергий ($0.5 \div 2$ МэВ/нуклон), выше правой границы этого диапазона он практически постоянный [9].

Выделяют два класса событий, богатых ${}^3\text{He}$:

- с умеренным обогащением ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{He}/{}^4\text{He} \leq 0.1$) и потоком протонов $p/{}^4\text{He} \approx 10^2$; для таких экспериментальных данных наблюдаемый верхний предел потока дейтерия не превосходит величины ${}^2\text{H}/{}^3\text{He} \leq 0.1$;

- со значительным обогащением состава изотопом ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{He}/{}^4\text{He} \approx 1$) и потоком протонов $p/{}^4\text{He} < 30$; в данном случае содержание в составе СКЛ дейтерия относительно ${}^3\text{He}$ не превосходит нескольких процентов.

В работе [1] события первого класса относят к постепенным, второго – к импульсным. Поэтому термин «обогащенный гелием-3» используют для состава с ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} > 0.1$, подразумевая при этом импульсное событие.

Форма спектра элементов позволяет поделить богатые ${}^3\text{He}$ события также на два класса: первый класс характеризуется степенным энергетическим спектром, схожим для ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$. Спектры ионов ${}^3\text{He}$ для событий второго класса имеют пики в диапазоне $\approx 100 \div 400$ кэВ/нуклон, и они отличаются от спектров ${}^4\text{He}$. Вторым классом событий характеризуется большим обогащением, к нему принадлежит рекордное отношение потоков ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} \approx 33.4 \pm 5.2$, наблюдаемое при энергии около 385 кэВ/нуклон в событии 6 января 2000 г. [11].

Ионизационные состояния изотопов ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ связаны с величиной коэффициента обогащения состава ${}^3\text{He}$. В событиях, в которых не наблюдается обогащение ${}^3\text{He}$, зафиксировано довольно большое содержание однократно ионизованного гелия ($\text{He}^+/\text{He}^{2+} \sim 0.01 \div 0.2$). В работе [12] на основе анализа экспериментальных данных в диапазоне энергий $0.6 \div 1$ МэВ/нуклон определены следующие зарядовые состояния (табл. 2). В богатых ${}^3\text{He}$ событиях содержание иона ${}^3\text{He}^+$ в пределах 2 σ

сравнимо с нулем, то есть можно утверждать, что доля однократно ионизованных ионов ${}^3\text{He}^+$ незначительна. Наблюдаемое содержание ${}^4\text{He}^+$ с ростом коэффициента обогащения ${}^3\text{He}$ увеличивается по значению.

3. Обогащение СКЛ тяжелыми элементами

Часто слабые импульсные вспышечные события, богатые изотопом ${}^3\text{He}$, обогащены также и тяжелыми элементами с зарядовыми числами $Z \geq 6$. Зависимость коэффициента обогащения тяжелых элементов от их атомного номера не является монотонной, однако имеется общая тенденция к увеличению обогащения элементов с ростом атомного номера (табл. 1). Как показано в работах [13–15], для большинства наблюдаемых событий коэффициент обогащения Fe (относительно O) по порядку величины равен $E_{\text{Fe,O}} \approx 10$, а коэффициент обогащения Fe относительно ${}^4\text{He}$ приблизительно равен 20. Группа элементов C, N, O имеет коэффициент обогащения $E_{i,\text{O}} \approx 1$, но при этом зачастую содержание азота в СКЛ выше, чем у соседних элементов. Аналогично, Ne и Al обогащены выше, чем их соседи, а коэффициент обогащения Si выше, чем у S. Такие особенности характерны для большинства регистрируемых событий СКЛ, они представляют собой «образец» богатого тяжелыми элементами состава. Однако значения коэффициента обогащения тяжелых элементов, регистрируемые в различных событиях, могут варьироваться в более широком диапазоне, чем значения коэффициента обогащения легких элементов. Например, в работе [1] говорится о регистрации событий с обеднением железа ($E_{\text{Fe,O}} < 1$). Элементный состав СКЛ, наблюдаемый в некоторых событиях, приведен в работах [2–5].

При обогащении состава тяжелыми элементами наблюдаются низкие значения потока ускоренных на Солнце частиц. В [16] приведена формула, ограничивающая максимальное значение $E_{\text{Fe,O}}^{\text{max}}$ коэффициента обогащения железа при определенном значении потока ядер кислорода I_{O} :

$$E_{\text{Fe,O}}^{\text{max}} \approx 1.5 \cdot 10^2 I_{\text{O}}^{-0.55}.$$

Это означает, что при потоке ядер кислорода $\sim 10^4$ ($\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ} / \text{нуклон}$) $^{-1}$ обогащения железом наблюдаться уже не будет ($E_{\text{Fe,O}} \approx 1$). Кроме того, наблюдается тенденция к увеличению обогащения железа с уменьшением энергии частиц.

Коэффициент обогащения тяжелых элементов не зависит от спектральных индексов и величины отношения потоков ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, то есть в событиях, по-разному обогащенных ${}^3\text{He}$, могут наблюдаться примерно постоянные обогащения тяжелых элементов. Отношение потоков ${}^3\text{He}/\text{Fe}$ принадлежит интервалу от 2 до 150 (среднее значение – 30) [14].

В составе СКЛ, образующихся в постепенных событиях, нет полностью ионизованных элементов (кроме He) и зарядовое состояние Fe в среднем составляет 14 ± 1 . Это указывает на электронную температуру плазмы Солнца $2 \cdot 10^6$ К, типичную для окружающей короны. Для импульсных событий характерно ионизационное состояние железа 20.5 ± 1.2 , соответствующее более высокой температуре $\approx 10^7$ К; при этом все элементы, вплоть до Si, практически полностью ионизованы [1].

Авторы [7] рассматривают события с обогащением сверхтяжелых элементов ($78 \leq M \leq 220$, M – масса иона в а.е.м.), подтверждая существование упомянутых особенностей состава в области C–Fe при энергии около 400 кэВ/нуклон. Говорится также о существовании дюжины событий, в которых наблюдалось обогащение состава сверхтяжелыми (“ultraheavy”) элементами. Спектры сверхтяжелых элементов, измеренные в диапазоне энергии $0.1 \div 1$ МэВ/нуклон, имеют форму,

схожую с формой спектров основных элементов (He, O, Fe). Условно сверхтяжелые элементы можно разбить на три группы: с массой $78 \div 100$ а.е.м., для которой средний коэффициент обогащения относительно O достигает ~ 40 ; с массой $125 \div 150$ а.е.м. и обогащением порядка 120 и с массой $180 \div 220$ а.е.м. и обогащением ~ 215 . Максимальные значения коэффициентов обогащения, наблюдаемые в наиболее обогащенных сверхтяжелыми элементами событиях, превышают приведенные средние значения более чем в 5 раз. Такие данные могут быть описаны степенной зависимостью коэффициента обогащения от фактора (Q/M), где Q – заряд иона, для плазмы с температурой около $3 \cdot 10^6$ К, что соответствует большинству ранее наблюдавшихся событий. Кроме того, оценка времен инжекции тяжелых и сверхтяжелых элементов, проведенная в работе [7], свидетельствует об одновременности этих событий.

В богатых тяжелыми элементами событиях увеличивается и содержание отдельных изотопов. Чаще всего упоминается, что отношения потоков $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ и $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ в СКЛ превышают солнечное в 2-3 раза [15]. В работе [17] представлены результаты измерений содержания изотопов 11 элементов (от C до Ni). Изотопный состав СКЛ может значительно варьироваться от события к событию, но при этом чаще всего более тяжелый изотоп (например, ^{44}Ca) обогащен в СКЛ по сравнению с менее тяжелым (^{40}Ca). Кроме того, отмечена корреляция обогащения $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ и других изотопов со значением коэффициента обогащения состава железом: в бедных Fe событиях коэффициент обогащения ^{22}Ne относительно ^{20}Ne составляет ~ 0.7 , а в богатых железом событиях увеличивается до 3. Отметим, что в более ранних работах (например, [5]) говорилось об отсутствии заметных аномалий в изотопном составе СКЛ.

4. Основные механизмы, предложенные для объяснения обогащения состава СКЛ

Для объяснения обогащения состава СКЛ тяжелыми элементами предложен ряд моделей, которые можно условно разделить на одностадийные и двухстадийные [18, 19]. Исторически сначала избыток ^3He пытались объяснить его прямым производством в ядерных реакциях на Солнце, однако при таких условиях в составе СКЛ должны присутствовать ионы дейтерия и трития. Кроме того, ядерные реакции не способны объяснить обогащение тяжелыми элементами. Аналогичные трудности возникают и у гипотезы, предложенной Г.Е. Кочаровым, согласно которой избыточные ионы ^3He поступают в область формирования состава СКЛ из глубинных слоев атмосферы солнца, где их концентрация выше.

Эти механизмы являются одностадийными. В отличие от них, двухстадийные механизмы включают в себя процесс предварительного нагрева ^3He и более тяжелых ионов (первая стадия) и дальнейшее вовлечение ускоренных частиц в состав солнечных космических лучей (вторая стадия). При этом для нагрева частиц на первой стадии было предложено множество различных физических процессов. Фиском [20] предложен механизм резонансного нагрева электростатическими циклотронными волнами. В рамках резонансного механизма можно объяснить обогащение состава ^3He , но при этом в СКЛ будут отсутствовать основные изотопы ^{12}C и ^{16}O , а также ионы $^{56}\text{Fe}^{+12}$, $^{56}\text{Fe}^{+13}$, $^{56}\text{Fe}^{+14}$. Это является основным недостатком механизма Фиска. Варвоглис и Пападопулос [21] предложили использовать на первой стадии нерезонансный механизм ускорения электростатическими водородными циклотронными волнами, который, однако, не может гарантировать селективность ускорения при одинаковых пороговых скоростях для изотопов ^3He и ^4He .

Темерин и Роф [22] предложили, а в дальнейшем Миллер и Винас [23] усовершенствовали одностадийный механизм ускорения ионов при взаимодействии с нестабильностью плазмы, вызванной электромагнитными ион-циклотронными волнами, альфвеновскими волнами и электронными лучами. Данный механизм не объясняет нескоррелированность обогащения $^3\text{He}/^4\text{He}$ и Fe/O в разных событиях. Кроме того, он хорошо описывает состав СКЛ при низких энергиях частиц (~ 1 МэВ/нуклон), и неизвестно, какие результаты будут получаться при более высоких энергиях.

Особо можно выделить работы Жанга и соавторов [18, 24, 25], объясняющие не только обогащение состава СКЛ ^3He и тяжелыми элементами, но и обогащение сверхтяжелыми элементами, а также изотопное содержание некоторых тяжелых элементов. Однако в этих работах могут проявиться трудности, общие для резонансных механизмов предварительного нагрева ионов.

Наиболее предпочтительным процессом для предварительного нагрева частиц, с точки зрения автора, является нагрев ионов за счет плазменных эффектов, предложенный в работе [26] и детально развитый в [9, 16]. Однако чтобы возбудить ленгмюровскую турбулентность в плазме до требуемого уровня, необходимо «создать» специальные физические условия, которые не наблюдаются на Солнце. Поэтому в качестве основного механизма предварительного нагрева используется [9, 16] взаимодействие ионов с ионно-звуковой турбулентностью. Такая модель не только позволяет объяснить обогащение состава изотопом ^3He и тяжелыми элементами, но и не противоречит основным наблюдаемым свойствам событий СКЛ. То, что ионно-звуковая турбулентность может играть решающую роль в объяснении обогащения состава ^3He , отмечают даже авторы альтернативных моделей [18]. Однако, как отмечено в [14], в рамках этого механизма объяснено лишь несколько событий.

Существует около десятка моделей (более подробно см. [18, 19] и ссылки в этих работах), характеризующихся наличием трудностей при их реализации в условиях Солнца или при объяснении сопутствующих характеристик состава СКЛ. В настоящее время активно предлагаются новые механизмы для объяснения обогащения, анализ которых в данном обзоре не приводится сознательно, так как они направлены лишь на объяснение состава СКЛ, и их необходимо проверить на предсказание спектральных форм элементов [19].

Заключение

Рассмотрено современное состояние проблемы обогащения состава солнечных космических лучей тяжелыми элементами и изотопом ^3He . Основными наблюдаемыми особенностями состава СКЛ, богатого железом, являются сходство спектров элементов, соответствие зарядовых состояний элементов одной температуре (около 3 МК), а также одинаковые времена инжекции и корреляция коэффициентов обогащения элементов в различных событиях. Это свидетельствует о действии единого механизма, который формирует состав СКЛ, обогащенный ^3He , тяжелыми и сверхтяжелыми элементами.

Большинство моделей и механизмов обогащения СКЛ предложено до экспериментального обнаружения явления обогащения СКЛ сверхтяжелыми элементами и изотопами тяжелых элементов (до 2000 г.), поэтому они должны пройти дополнительную проверку на возможность объяснения такого типа данных. В настоящее время не существует единой общепризнанной модели, которая способна объяснить всю совокупность экспериментально зарегистрированных данных.

Автор выражает благодарность кандидату физико-математических наук, доценту А.В. Орищенко за постановку задачи, научное руководство и постоянный интерес к работе.

Summary

V.V. Avdonin. A Survey of the Features of ^3He -Rich and Heavy-Ion-Rich Solar Cosmic Rays Composition.

The article deals with the main features of solar cosmic rays composition. Attention is primarily given to the elemental, ionic and isotopic composition of ^3He -rich and Fe-rich solar cosmic rays. It is concluded that all proposed theoretical models do not provide a very good fit to observable experimental data.

Key words: solar cosmic rays, enrichment factor, elemental composition, isotopic composition, charge states, ultraheavy elements.

Литература

1. Reames D.V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere // Space Sci. Rev. – 1999. – V. 90, No 3–4. – P. 413–491.
2. Desai M.I., Mason G.M., Gold R.E., Krimigis S.M., Cohen C.M.S., Mewaldt R.A., Mazur J.E., Dwyer J.R. Heavy-ion elemental abundances in large solar energetic particle events and their implications for the seed population // Astrophys. J. – 2006. – V. 649, No 1. – P. 470–489.
3. Slocum P.L., Stone E.C., Leske R.A., Christian E.R., Cohen C.M.S., Cummings A.C., Desai M.I., Dwyer J.R., Mason G.M., Mazur J.E., Mewaldt R.A., von Rosenvinge T.T., Wiedenbeck M.E. Elemental fractionation in small solar energetic particle events // Astrophys. J. – 2003. – V. 594, No 1. – P. 592–604.
4. Mason G.M., Fisk L.A., Hovestadt D., Gloeckler G. A survey of 1 MeV nucleon $^{-1}$ solar flare particle abundances $1 \leq Z \leq 26$ during the 1973–1977 solar minimum period // Astrophys. J. – 1980. – V. 239, No 1. – P. 1070–1088.
5. Оршченко А.В. Обзор экспериментальных данных для богатых тяжелыми ядрами солнечных событий за период 1971–1978 гг. // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1981. – Т. 45, № 8. – С. 1174–1188.
6. Kahler S.W., Tylka A.J., Reames D.V. A comparison of elemental abundance ratios in SEP events in fast and slow solar wind regions // Astrophys. J. – 2009. – V. 701, No 1. – P. 561–570.
7. Mason G.M., Mazur J.E., Dwyer J.R., Jokipii J.R., Gold R.E., Krimigis S.M. Abundances of heavy and ultraheavy ions in ^3He -rich solar flares // Astrophys. J. – 2004. – V. 606, No 1. – P. 555–564.
8. Schaeffer O.A., Zähringer J. Solar flare helium in satellite materials // Phys. Rev. Lett. – 1962. – V. 8, No 10. – P. 389–390.
9. Kocharov L.G., Kocharov G.E. ^3He -rich solar flares // Space Sci. Rev. – 1984. – V. 38, No 1–2. – P. 89–141.
10. Torsti J., Laivola J., Kocharov L. Common overabundance of ^3He in high-energy solar particles // Astron. Astrophys. – 2003. – V. 408, No 1. – P. L1–L4.
11. Mason G.M., Dwyer J.R., Mazur J.E. New properties of ^3He -rich solar flares deduced from low-energy particle spectra // Astrophys. J. – 2000. – V. 545, No 2. – P. L157–L160.
12. Klecker B., Hovestadt D., Möebius E., Scholer M., Gloeckler G., Ipavich F.M. Ionization states of helium in ^3He -rich solar energetic particle events // Proc. 18th Int. Cosmic Ray Conf., Bangalore, India. – 1983. – V. 10. – P. 326–329.
13. Reames D.V., Meyer J.P., von Rosenvinge T.T. Energetic particle abundances in impulsive solar flare events // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1994. – V. 90, No 2. – P. 649–667.

14. *Mason G.M., Reames D.V., Klecker B., Hovestadt D., von Rosenvinge, T.T.* The heavy-ion compositional signature in ^3He -rich solar particle events // *Astrophys. J.* – 1986. – V. 303, No 1. – P. 849–860.
15. *Mewaldt R.A., Cummings A.C., Stone E.C., von Rosenvinge T.T.* Ionic charge states inferred from elemental and isotopic composition in ^3He -rich solar energetic particle events // *Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conf., Lodz, Poland.* – 2009. – 4 p.
16. *Кочаров Л.Г., Орищенко А.В.* Механизм обогащения солнечных космических лучей тяжелыми элементами // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* – 1984. – № 11. – С. 2162–2164.
17. *Leske R.A., Mewaldt R.A., Cohen C.M.S. et al.* Measurements of the heavy-ion elemental and isotopic composition in large solar particle events from ACE // *ASP Conf. Ser.* – 2000. – V. 206. – P. 118–123.
18. *Zhang T.X.* Solar ^3He -rich event and ion acceleration in two stages // *Astrophys. J.* – 1995. – V. 449. – P. 916–929.
19. *Petrosian V.* Particle acceleration in solar flares and enrichment of ^3He and heavy ions. – arXiv:0808.1757v1 [astro-ph]. – 2008. – 22 p. – URL: http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0808/0808.1757v1.pdf.
20. *Fisk L.A.* ^3He -rich flares: a possible explanation // *Astrophys. J.* – 1978. – V. 224, No 1. – P. 1048–1055.
21. *Varvoglis H., Papadopoulos K.* Selective nonresonant acceleration of $^3\text{He}^{++}$ and heavy ions by H^+ cyclotron waves // *Astrophys. J.* – 1983. – V. 270. – P. L95–L98.
22. *Temerin M., Roth. I.* The production of ^3He and heavy ion enrichments in ^3He -rich flares by electromagnetic hydrogen cyclotron waves // *Astrophys. J.* – 1992. – V. 391, No 2. – P. L105–L108.
23. *Miller J.A., Viñas A.F.* Ion acceleration and abundance enhancements by electron beam instabilities in impulsive solar flares // *Astrophys. J.* – 1993. – V. 412, No 1. – P. 386–400.
24. *Zhang T.X.* An explanation for huge enhancements of ultraheavy ions in solar ^3He -rich events // *Astrophys. J.* – 2004. – V. 617, No 1. – P. L77–L80.
25. *Zhang T.X., Oshawa Y.* ^3He enrichments by magnetosonic waves in current-driven instabilities // *Solar Phys.* – 1995. – V. 158, No 1. – P. 115–137.
26. *Ibragimov I.A., Kocharov G.E.* Possible mechanism for enrichment of solar cosmic rays by helium-three and heavy nuclei // *Proc. 15th Int. Cosmic Ray Conf., Plovdiv, Bulgaria.* – 1977. – V. 12. – P. 221–228.

Поступила в редакцию
29.11.10

Авдонин Василий Вячеславович – аспирант кафедры физического материаловедения Ульяновского государственного университета.

E-mail: avd-vasya@yandex.ru