

УДК 523.985.3:543.5

О ПРИРОДЕ ВОЗРАСТАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПА ${}^3\text{He}$ В ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ γ -ЛИНИИ 2.223 МЭВ В ПЕРИОД СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Е. В. Троицкая¹, И. В. Архангельская², А. И. Архангельский²

Исследование мощной солнечной вспышки 20 января 2005 г. проведено на основе данных СОНГ-Д/АВС-Ф/КОРОНАС-Ф. К анализу привлечены данные по временным профилям нейтронной линии 2.223 МэВ и ядерным узким линиям. Выполнены модельные расчёты нейтронов, распространяющихся от области их генерации в короне к области формирования нейтронной линии в нижней хромосфере и фотосфере, расчёты кулоновских потерь энергии ионов гелия-3 в случае допущения их ускорения во вспышке и проведен численный анализ характера возрастания относительного содержания ${}^3\text{He}$ за время вспышки. Проведенное исследование в совокупности с независимыми сведениями о наличии гелия-3 в области вспышки, а также его потоков в межпланетном пространстве, приводят к выводу о том, что область ускорения является наиболее вероятным непосредственным источником повышенного содержания ускоренных ионов изотопа гелия-3.

Ключевые слова: солнечная вспышка, эволюция параметров, гамма-излучение, потоки гелия-3.

Введение. Солнечное событие 20 января 2005 года явилось одним из самых крупных среди наблюдавшихся. Основой наших исследований послужили данные по гамма-излучению, полученные аппаратурой АВС-Ф от прибора СОНГ-Д на борту КА КОРОНАС-Ф [1–7], (рис. 1(а)) [8]. Для сравнения на рис. 1(б) представлены данные КА RHESSI [9]. Вторую необходимую основу исследования составляет ранее предложенный

¹ НИИЯФ МГУ, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2; e-mail: troi.eleo@yandex.ru.

² НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

в НИИЯФ МГУ [10, 11] (позднее усовершенствованный [12, 13]) метод моделирования гамма-излучения в линии 2.223 МэВ от радиационного захвата ядрами водорода тепловых нейтронов. Первоначально энергичные нейтроны генерируются во вспышке при ядерных взаимодействиях ускоренных в короне частиц с ядрами окружающей среды солнечной атмосферы, а затем замедляются в упругих взаимодействиях, главным образом, с водородом. Скорость этого процесса определяется эффективными сечениями с учетом их энергетической и угловой зависимости, а также высотным профилем плотности атмосферы Солнца (рис. 2). Метод основан на статистическом моделировании потери энергии нейтронов при прохождении последних через плазму солнечной атмосферы с учетом упругих соударений и последующих ядерных реакций тепловых нейтронов, приводящих к гамма-излучению в линии 2.223 МэВ. Важную роль при этом играют конкурирующие реакции ионов изотопа гелия-3, который также (в большей или меньшей концентрации) присутствует в атмосфере Солнца. Ядра ${}^3\text{He}$, поглощая безрадиационно нейтрон и понижая тем самым количество излученных γ -квантов, влияют на форму временного профиля гамма-излучения в линии 2.223 МэВ. Две последние упомянутые реакции являются (совместно с “мгновенными” ядерными линиями де-возбуждения) мощным диагностическим средством изучения различных аспектов солнечной вспышки: как области ускорения, так и окружающей среды.

Цель настоящей работы: изучить наиболее полно особенности солнечной вспышки 20 января 2005 года, одной из самых мощных за последние 50 лет. Исследование таких продуктов ядерных реакций, как гамма-излучение различной природы, даёт возможность определить ряд параметров солнечной вспышки: спектральный индекс ускоренных частиц, характер высотной зависимости плотности плазмы солнечной атмосферы, содержание изотопа ${}^3\text{He}$ в области формирования гамма-излучения, а также найти характер эволюции за время вспышки указанных параметров вспышки и окружающей среды.

Исследование временных профилей γ -излучения. Были проведены модельные расчеты временных профилей интенсивности γ -линии с энергией кванта 2.223 МэВ для двух моделей солнечной атмосферы: модели невозмущённой атмосферы ($m = 1$) и модели атмосферы в период солнечной вспышки $m = 2$, где значение параметра m представляет собой условный номер модели плотности солнечной атмосферы (см. рис. 2). Более подробно возможные модели плотности рассмотрены в [13]. $\alpha T = 0.003, 0.05, 0.1$ – спектральные индексы ускоренных во вспышке частиц для случая стохастического ускорения, представляемого функцией Бесселя 2-го рода. Соответствующие спектры нейтро-

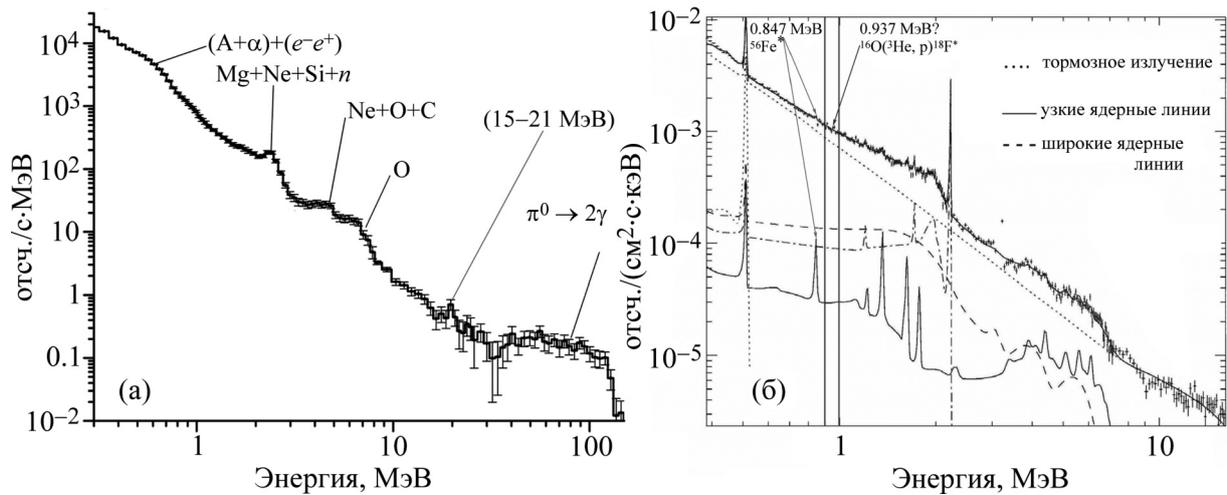


Рис. 1: Энергетический спектр γ -излучения вспышки 20 января 2005 г. (а) данные КОРОНАС-Ф/АВС-Ф/СОНГ-Д [8], (б) данные RHESSI [9] и их модельные расчёты отдельных компонент.

нов рассчитаны в [14, 15]. В качестве временного профиля первоначальной инжекции нейтронов используется суммарный временной профиль γ -линий де-возбуждения, выделенных после очистки от фона излучения в диапазонах 3.2–5.0 МэВ и 5.3–6.9 МэВ. Основные расчёты выполнены для случая изотропного начального испускания нейтронов в нижнее полупространство.

κ – отношение концентраций гелия-3 и водорода, эту величину мы варьируем с шагом $3 \cdot 10^{-5}$, начиная от обычного минимального значения $2 \cdot 10^{-5}$, найденного ранее для ряда вспышек [13]. Сравнение модельных расчётов с данными наблюдений временного профиля интенсивности нейтронной линии 2.223 МэВ методом наименьших квадратов показало, что наилучшее согласие модельных расчётов с экспериментальными данными при усреднении по полному времени исследуемой вспышки достигается при наборе значений параметров расчёта: $m = 2$, $\alpha T = 0.1$, $\kappa = (1.40 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$, то есть при повышенном содержании изотопа ^3He относительно водорода. Для дальнейшего анализа полное время вспышки было разбито на 3 отдельных интервала, что позволило выявить эволюцию всех исследуемых параметров со временем (рис. 3, табл. 1). При этом содержание ^3He меняется от $2 \cdot 10^{-5}$ в фазе роста интенсивности к значению $1.4 \cdot 10^{-4}$ в фазе максимума излучения нейтронной гамма-линии и до $2.0 \cdot 10^{-4}$ в фазе спада. Таким образом, изучение мощной солнечной вспышки 20 января 2005 г. ядерно-физическими методами привело нас к выводу о повышенном содержании изотопа гелия-3 в области

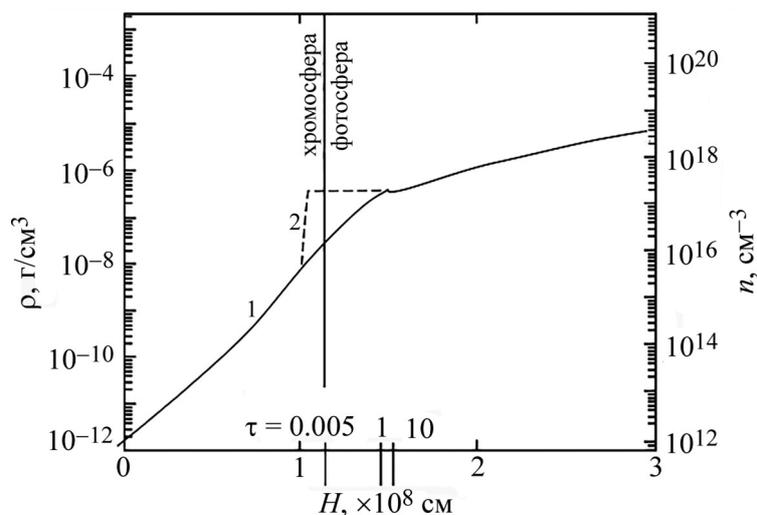


Рис. 2: Модели плотности солнечной атмосферы. Начало отсчёта глубины H (0 горизонтальной оси) помещено на высоте ~ 1250 км над верхним уровнем фотосферы. 1 – плотность невозмущённой атмосферы, сплошная линия: до излома – стандартная гарвардско-смитсоновская модель [16], глубже излома – модель конвективной зоны Спруита [17]; 2 – модель плотности в период вспышки (“вспышечная модель”), для описания которой в среднем участке глубин пунктир заменяет соответствующую часть предыдущей модели (1). τ – оптическая глубина для излучения с длиной волны $\lambda = 500$ нм.

ядерных реакций, формирующих временной профиль узкой нейтронной гамма-линии 2.223 МэВ, возникающей при поглощении вспышечных нейтронов водородом солнечной атмосферы.

Предварительное обсуждение вопроса о месте первичного источника ионов изотопа ${}^3\text{He}$ [18] показало, что источником ионов ${}^3\text{He}$ во вспышке 20 января может являться либо (1) непосредственно область ускорения, либо (2) некоторая магнитная структура, в которой могла некоторое время сохраняться часть ускоренной вспышечной плазмы. В настоящей работе мы возвращаемся к этому вопросу, привлекая дополнительно другие методы и расчеты. Поскольку подобного рода структуры обнаружено не было, мы сосредоточились на изучении области ускорения вспышки как источнике ускоренных ионов ${}^3\text{He}$. Первоначально мы исходим из предположения, что ионы гелия-3 были ускорены наряду с ионами других элементов посредством механизма, связанного с возможностью преимущественного ускорения этого нуклида. Различными авторами предложен ряд механизмов такого ускорения, например, стохастический механизм ускорения на

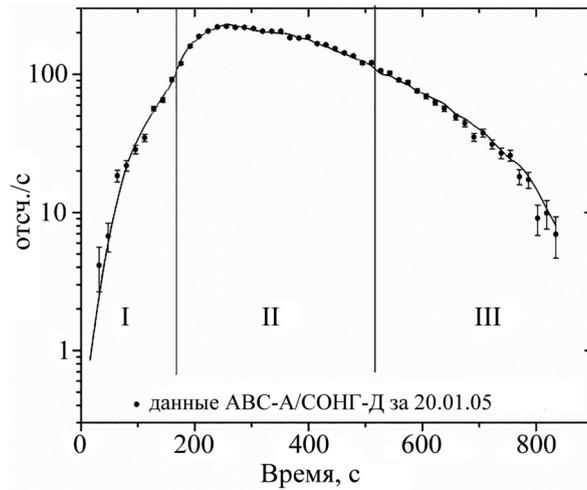


Рис. 3: Точки – данные наблюдений гамма-излучения, соответствующие диапазону энергий, содержащему гамма-линию 2.223 МэВ, полученные с автоматической станции КОРОНАС-Ф аппаратурой АВС-Ф со сцинтилляционного детектора СОНГ-Д. Методом, предложенным в НИИЯФ МГУ, найдены наилучшие аппроксимации наблюдательных данных (линия на рисунке) при варьировании параметров в каждом из трёх временных интервалах (см. табл. 1).

ионно-звуковой турбулентности [19], которая может также сочетаться с дополнительными условиями, например, скрещенными электрическим и магнитным полями, [20, 21]. Другие возможности, связанные с преимущественным ускорением ионов гелия-3, рассмотрены в работах [22], где привлекается механизм ускорения в коллапсирующих магнитных ловушках и [23, 24], посвященных турбулентности в гиротропных средах.

В таком случае, после процесса ускорения ионы гелия-3, наряду с другими ускоренными частицами, распространяются и попадают (в частности) в области фотосферы и нижней хромосферы, где и участвуют в формировании временного профиля нейтронной гамма-линии.

Исследование эволюции популяции изотопа ^3He со временем. Обнаружена эволюция исследованных параметров κ , αT и t со временем. Нулевая метка времени соответствует 06:43:00.499 UT.

Далее, для проверки гипотезы о вспышечном происхождении ядер ^3He мы исследуем более подробно эволюцию свойств популяции этого изотопа. Для этого мы фиксируем середины каждого из трёх выделенных на рис. 3 временных интервалов. Это 85-я, 345-я и 670-я секунды от начала отсчета (табл. 1). Затем рассчитываем темп накопления ^3He

в области вторичных ядерных реакций, который пропорционален темпу накопления количества отсчётов.

Найдено, что средний темп накопления составлял 0.046 с^{-2} от 85-й до 345-й секунды и лишь 0.018 с^{-2} от 345-й до 670-й секунды. Таким образом, хотя накопление гелия-3 и продолжается со временем вспышки, тем не менее, темп этого роста замедляется во второй по времени части вспышки по сравнению с первой. Это обстоятельство может указывать на взрывоподобный характер роста накопления ионов ${}^3\text{He}$ со временем в интересующей нас области вспышки и, как следствие, на взрывной характер исходного процесса, т.е. на действительное происхождение ионов непосредственно от ускорения в исходном вспышечном процессе.

Т а б л и ц а 1

Наилучший набор параметров объединенного временного профиля

| | Интервал времени секунды | Середина интервала, секунды | $\kappa = n({}^3\text{He})/n({}^1\text{H})$ | αT | Модель, m |
|-----|--------------------------------|-----------------------------------|---|------------|-------------|
| I | 170 с (0–170 с) | 85 | $2.0 \cdot 10^{-5}$ | 0.005 | 1 |
| II | 350 с (170–520 с) | 345 | $1.4 \cdot 10^{-4}$ | 0.03 | 2 |
| III | 300 с (520–820 с) | 670 | $2.0 \cdot 10^{-4}$ | 0.1 | 2 |

В табл. 1 представлены временные характеристики интервалов, а также наилучшие аппроксимации параметров в каждом из трех выделенных интервалов вспышки.

Затем, исходя из предположения о том, что повышенное содержание ${}^3\text{He}$ в указанной области действительно обусловлено его преимущественным ускорением в более высоко расположенной в короне или в верхней хромосфере, области ускорения, мы провели расчёты кулоновских потерь энергии ускоренных ионов ${}^3\text{He}$ при распространении их от области ускорения вниз (к фотосфере), вплоть до области ядерных реакций. На рис. 4 представлены графики остаточной энергии ионов ${}^3\text{He}$. Заряженные частицы взаимодействуют, главным образом, с электронами атомных оболочек, вызывая ионизацию атомов и постепенно теряя энергию. Как можно видеть, потери энергии частиц ${}^3\text{He}$ на большей части пути пробега до плотных слоёв невелики, и резко возрастают только перед остановкой (пик Брэгга).

В предыдущих работах было показано, что процессы радиационного захвата нейтронов водородом на Солнце начинают происходить на уровнях, где плотность частиц $n = 10^{15} - 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [12], и активность этих реакций возрастает с глубиной. Очевидно,

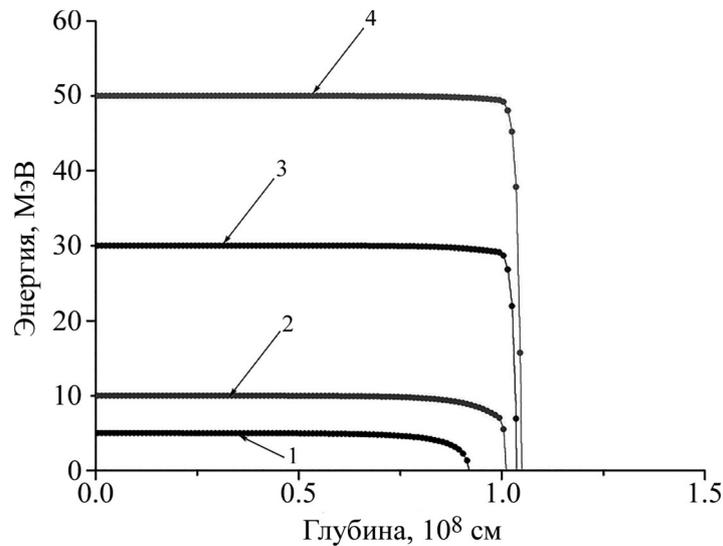


Рис. 4: Результаты расчёта остаточной энергии иона гелия-3 при его прохождении от точки испускания (0 шкалы глубин) до полной потери энергии, т.е. до достижения теплового равновесия с окружающей средой. Начальные энергии ионов: № 1 – 5 МэВ, № 2 – 10 МэВ, № 3 – 30 МэВ, № 4 – 50 МэВ.

что и ядра нуклида ^3He должны достигать тех же глубин, поскольку из наблюдений хорошо известно, что ^3He заметно воздействует на форму временного профиля гамма-излучения в нейтронной линии. Проведенный расчёт показывает, что уже 5-МэВ-ые ионы достигают уровней, где $n = (1.9 - 2.1) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а 30-МэВ-ые – уровня, где $n = (8.3 \cdot 10^{16} - 2.0 \cdot 10^{17}) \text{ см}^{-3}$, т.е., глубоких фотосферных уровней. Таким образом, расчёты согласуются с представлением о прохождении первоначально ускоренных в корональных областях ионов ^3He в глубь атмосферы, где они могут вступать в ядерные реакции, в том числе влияющие на форму временного профиля гамма-излучения в линии 2.223 МэВ, что и найдено из наблюдений. Таким образом, модельные расчёты наряду с дополнительными расчётами кулоновских потерь подтверждают сделанное предположение о происхождении избытка ионов ^3He непосредственно из области ускорения.

Обсуждение и выводы. Наиболее существенные результаты работы связаны с нахождением эволюции за время вспышки ряда параметров вспышки, таких, как отношение концентраций $\kappa = n(^3\text{He})/n(^1\text{H})$, спектрального параметра αT и модели плотности солнечной атмосферы m . Обнаруженное явление потоков вещества, содержащих изотоп ^3He , также должно быть изучено и понято.

Отмечены и другие явления, которые подтверждают повышенное содержание ${}^3\text{He}$ во время исследуемой вспышки. Так, по этой же вспышке мы изучили другие виды гамма-излучения, в частности, в диапазоне 15–21 МэВ [25]. Как показал анализ полученных экспериментальных данных, слабое возрастание интенсивности γ -излучения в этом диапазоне представляет собой сумму гамма-излучения в линии 20.58 МэВ от захвата нейтронов гелием-3 и ядерной линии излучения углерода при энергии 15.11 МэВ. Существенным условием возможности наблюдения линии 20.58 МэВ является повышенный уровень содержания ${}^3\text{He}$.

Важно отметить, что сама проблема повышенного содержания ${}^3\text{He}$, обнаруженного также другими авторами в ряде других вспышек, до сих пор не получила окончательного решения, т.к. высказывались различные предположения о его источнике: обогащение в процессе различного вида турбулентности в области ускорения, или в фазе преднагрева, или, как альтернатива, – вбрасывание ядер изотопа ${}^3\text{He}$ из конвективной зоны или более глубоких слоёв в предвспышечном периоде [19].

Проведенный в настоящей работе анализ подтверждает сделанное ранее предположение: мы показываем, что предполагаемый процесс распространения ускоренных ядер гелия-3 от области ускорения до области генерации γ -излучения не противоречит сделанным предположениям об их (ядер гелия-3) повышенном содержании в области ускорения и экспериментальным данным.

Имеются также наблюдательные данные КА ACE, SAMPEX и GOES-11, анализ которых [2] позволяет определить верхнюю границу содержания ${}^3\text{He}$ по отношению к водороду: найдено, что $\kappa < 1.54 \cdot 10^{-4}$ в потоках вблизи орбиты Земли, что не противоречит найденному нашим методом среднему значению $\kappa = 1.40 \pm 0.15 \cdot 10^{-4}$ в области генерации нейтронной γ -линии. Известно, что наличие повышенного содержания ${}^3\text{He}$ в процессе солнечной вспышки обычно связано с плазменными резонансными процессами. В настоящей работе показано, что ионы гелия-3, первоначально ускоренные в процессе того или иного возможного преимущественного механизма ускорения ${}^3\text{He}$, затем распространяются и накапливаются в области фотосферы и нижней хромосферы. В перспективе, уточнение критериев возможных плазменных резонансных процессов ускорения во вспышках, обогащённых изотопом ${}^3\text{He}$, а также исследование других возможных процессов, связанных с обогащением этим изотопом, может способствовать выбору механизма ускорения в конкретной вспышке, что определяет необходимость детального изучения вспышек, обогащённых гелием-3.

Авторы благодарят С. А. Богачева за консультацию по преимущественному ускорению ионов гелия-3 в солнечных вспышках.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (ПКС НИЯУ МИФИ № 02.а03.21.0005 от 27.08.2013).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф*. Под ред. В. Д. Кузнецова (М., Физматлит, 2009).
- [2] S. N. Kuznetsov, K. Kudela, S. P. Ryumin, et al., *Adv. Sp. Res.* **30**, 1857 (2002).
- [3] I. V. Arkhangelskaja, Yu. D. Kotov, A. I. Arkhangelsky, et al., *Adv. Space Res.* **43**(4), 542 (2009).
- [4] Ю. Д. Котов, И. В. Архангельская, А. И. Архангельский и др., В сб.: *Солнечно-земная физика*. Под ред. Кузнецова В. Д. (М., Физматлит, 2009), с. 178.
- [5] I. V. Arkhangelskaja, A. I. Arkhangelsky, Yu. D. Kotov, et al., *Adv. Space Res.* **43**(4), 589 (2009).
- [6] И. В. Архангельская, А. И. Архангельский, Ю. Д. Котов и др., *Астрономический вестник* **42**(4), 373 (2008).
- [7] А. С. Гляненко, Ю. Д. Котов, В. Н. Павлов и др., *Приборы и техника эксперимента*, № 5, 16 (1999).
- [8] I. V. Arkhangelskaja, A. I. Arkhangelsky, A. S. Glyanenko, et al., in *Proceedings of the International Symposium SEE 2007: Fundamental Science and Applied Aspects, Athens, Greece, 2007* (National & Kapodistrian University of Athens, 2008), p. 178.
- [9] G. Share, R. J. Murphy, D. Smith, et al., in *Talks of the SHINE 2006 Special Session on the 2005 January 20 Event SHINE2006, 2006* (AGU Monograph Series), **165**, 177 (2006).
- [10] Б. М. Кузевский, Е. В. Троицкая, Препринт НИИЯФ МГУ, № 89-28/105 (М., 1989), 28 с.
- [11] Б. М. Кузевский, Е. В. Троицкая, Препринт НИИЯФ МГУ, № 95-8/372 (М., 1995), 17 с.
- [12] В. М. Kuzhevskij, S. N. Kuznetsov, and E. V. Troitskaia, *Adv. Space Res.* **22**, 1141 (1998).
- [13] Б. М. Кузевский, Л. И. Мирошниченко, Е. В. Троицкая, *Астрономич. журнал* **82**(7), 637 (2005).
- [14] X.-M. Hua and R. E. Lingenfelter, *Ap.J.*, **107**, 351 (1987).

- [15] X.-M. Hua, V. M. Kozlovsky, R. E. Lingenfelter, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **140**, 563 (2002).
- [16] O. Gingerich, R. W. Noyes, W. Kalkofen, et al., *Solar Physics* **18**, 347 (1971).
- [17] H. C. Spruit, *Solar Physics* **34**, 277 (1974).
- [18] E. V. Troitskaia, I. V. Arkhangel'skaja, L. I. Miroshnichenko, et al., *Adv. Space Res.* **43**(4), 547 (2009).
- [19] L. G. Kocharov and G. E. Kocharov, *Space Sci. Rev.* **38**, 89 (1984).
- [20] В. Ю. Попов, В. П. Силин, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, **42**(12), 83 (2015).
- [21] V. P. Silin, *Plasma Physics Reports* **37**(5), 461 (2011).
- [22] С. А. Богачев, Б. В. Сомов, *Письма в АЖ* **35**(1), 63 (2009).
- [23] И. Н. Топтыгин, Г. Д. Флейшман, *УФН* **178**(4), 385 (2008).
- [24] Г. Д. Флейшман, *Стохастическая теория излучения*. (Изд-во НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский ин-т компьютерных исследований, 2008).
http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_72159.
- [25] I. V. Arkhangel'skaja, A. I. Arkhangel'sky, E. V. Troitskaya, et al., *Adv. Space Res.* **43**, 594 (2009).

Печатается по представлению ОЯФА ФИАН.

Поступила в редакцию 10 ноября 2016 г.