

УДК 523.62-726

СПЕКТР ЮПИТЕРИАНСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ 2007–2008 гг.

© 2021 г. Е. И. Дайбог¹, *, Ю. И. Логачев¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Спектры электронов МэВ-ных энергий по данным SOHO/EPHIN в период минимума солнечной активности 2007–2008 гг. представлены комбинацией двух степенных законов с $\gamma \approx 1.5$ –1.6 при энергиях выше 0.7 МэВ, что говорит об их юпитерианском происхождении, и $\gamma \geq 3.5$ при меньших энергиях, что вместе с короткими (2–3 дня) всплесками электронов (АСЕ/ЕРАМ) и протонов (SOHO/LION) с энергиями порядка сотен кэВ говорит об ускорении низко-энергичных частиц в межпланетной среде.

DOI: 10.31857/S0367676521090088

ВВЕДЕНИЕ

Проблема происхождения заряженных частиц в межпланетном пространстве не сходит с повестки дня в течение многих лет. Если источником высоко энергичных (>10 МэВ) частиц, по всеобщему мнению, являются солнечные вспышки и инициированные ими корональные выбросы вещества, сопровождаемые ударными волнами, то проблема ускорения частиц меньших энергий (десятки-сотни кэВ – единицы МэВ) вызывает гораздо большее количество вопросов. В целом ряде случаев речь идет о “чисто” межпланетном процессе ускорения, который не инициируется солнечной активностью и, по-видимому, не включает дополнительного ускорения частиц, первоначально ускоренных в результате солнечных событий. Скорее их источником могут являться сверхтепловые частицы солнечного ветра. Такому ускорению подвержены не только протоны и ионы, но и электроны низких энергий, исследуемые в данной статье.

Электроны МэВ-ных энергий во внутренней гелиосфере в спокойные периоды солнечной активности в основном имеют юпитерианское происхождение. Пролеты космических зондов Pioneer-10 и Pioneer-11 вблизи Юпитера показали, что Юпитер является их постоянным источником. юпитерианские электроны (ю-электроны) регистрировались и другими космическими аппаратами: IMP-8, Ulysses, SOHO, [3–5]. Дифференциальный спектр ю-электронов в степенном

представлении характеризуется показателем спектра $\gamma \approx 1.5$ –1.6. [1, 2]. На рис. 1а представлены 27-дневные вариации ю-электронов по данным SOHO, наблюдавшиеся в минимуме СА 2007–2009 гг. В это же время аппарат АСЕ регистрировал частицы с энергией меньшей сотни кэВ (рис. 2в). Мягкий спектр и отсутствие активных процессов на Солнце исключают их юпитерианский и солнечный источники. Исследование спектров электронов в 27-дневных вариациях, показало, что ю-электронами являются только электроны с энергией >0.7 МэВ ($\gamma \approx 1.5$ –1.6), а электроны меньших энергий ($\gamma > 3$) в этих же вариациях имеют другой источник. Определение возможных источников второй группы частиц является целью статьи.

СУБРЕЛЯТИВИСТСКИЕ И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭЛЕКТРОНЫ В МИНИМУМАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Определяющим моментом при идентификации происхождения электронов МэВ-ных энергий является их энергетический спектр. Отличительной особенностью ю-электронов, по сравнению с электронами солнечного и магнитосферного происхождения, является их более жесткий энергетический спектр, который начиная с их первых наблюдений на Pioneer 10, характеризуется показателем спектра $\gamma \approx 1.5$ –1.6. Такой спектр электронов на 1 а. е. на трех последовательных солнечных оборотах был зарегистрирован во время минимума

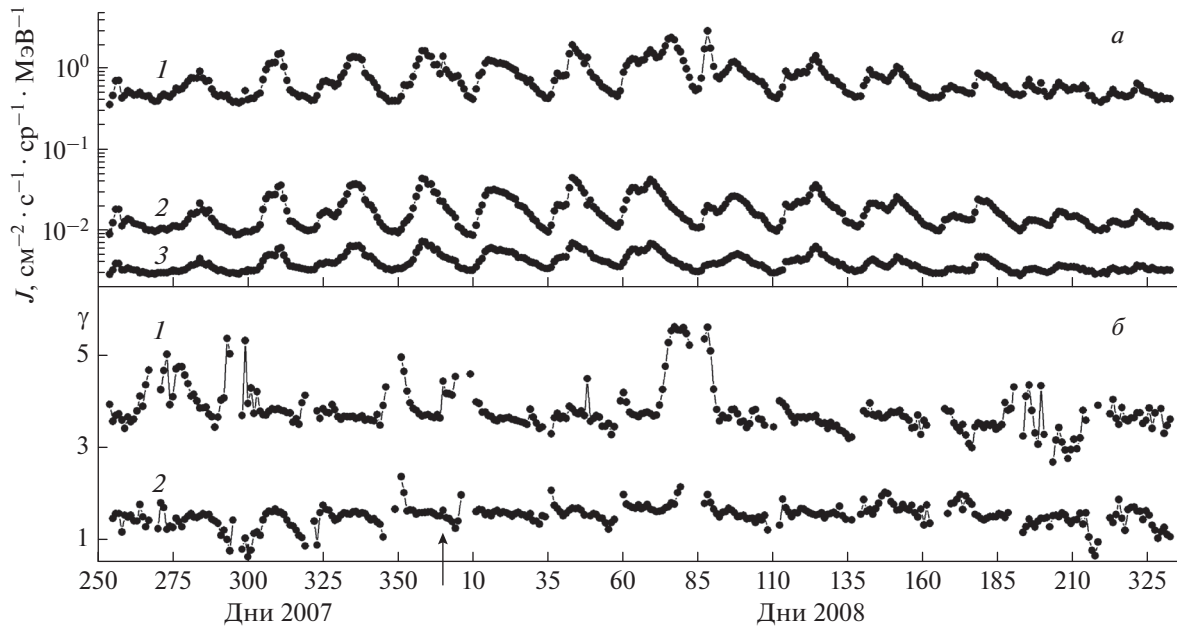


Рис. 1. Временные профили потоков электронов по данным SOHO/EPHIN в энергетических каналах (а): 0.25–0.7 (1), 0.67–3 (2), 2.64–10.4 МэВ (3). Показатели энергетического спектра γ (б): 1 – низкоэнергичная часть спектра – 0.25–3 МэВ, 2 – высокоэнергичная часть спектра – 0.67–10.4 МэВ. Стрелка на оси абсцисс – граница между 2007 и 2008 гг.

22–23 цикла солнечной активности в 1996 г. [6]. Были получены указания на то, что спектр электронов несколько смягчается в максимальной фазе 27-дневной вариации.

Гораздо больший интерес представляет следующий глубокий минимум 23–24 цикла солнечной активности, охватывавший целый синодический цикл Земля–Юпитер (сентябрь 2007 г.–октябрь 2008 г.), в течение которого были зарегистрированы 14 последовательных 27-дневных возрастаний потоков ю-электронов. Анализ спектров электронов для этого периода проводился по данным SOHO/EPHIN [7], по потокам электронов в энергетических интервалах: $e_1(0.25–0.7)$, $e_2(0.67–3)$ и $e_3(2.64–10.4$ МэВ). В предположении степенной зависимости $Je = aE^{-\gamma}$ во всем рассматриваемом энергетическом интервале можно оценить значения показателей γ в интервалах энергий 0.25–3 и 0.67–10.4 МэВ, которые определялись по максимальным значениям потоков электронов в соответствующих интервалах e_i . Для интервалов энергий 0.25–3 (γ_1) и 0.67–10.4 МэВ (γ_2) значения величин γ определялись из соотношений $\gamma_1 = \lg(J_1/J_2)/\lg(E_1/E_2)$ и $\gamma_2 = \lg(J_2/J_3)/\lg(E_2/E_3)$, для значений E_i принимались энергии начала рассматриваемого энергетического интервала; J_1 , J_2 и J_3 – значения потоков соответственно для E_1 , E_2 и E_3 .

Потоки ю-электронов на орбите Земли очень малы Je (1 МэВ) $\approx 10^{-2}$ см $^{-2}$ · с $^{-1}$ · ср $^{-1}$ · МэВ $^{-1}$, и

для их выделения актуален вопрос об учете фоновых значений потоков (электроны ГКЛ, приборный фон). Фоновыми значениями считались минимальные потоки непосредственно перед началом очередного 27-дневного возрастания. На рис. 1б приведен временной профиль показателя степени γ для всех 14 оборотов Солнца. Для интервала энергий 0.67–10.4 МэВ спектры в максимумах потоков в 27-дневных вариациях имеют показатели $\gamma_2 = 1.6 \pm 0.2$, что свидетельствует об их юпитерианском происхождении.

Для электронов с энергией 0.25–3 МэВ спектр гораздо мягче, значения $\gamma_1 \geq 3.5$, что говорит о другой, не-юпитерианской природе этих электронов. Поскольку временной профиль потоков электронов в канале 0.25–0.7 МэВ повторяет временные профили высоко-энергичных ю-электронов (рис. 1а), очевидно, что и те и другие “привязаны” к одним и тем же структурам магнитного поля, т.е. электроны малых энергий ускоряются и продолжают свою жизнь, в основном, там же, где и ю-электроны. Отметим ужесточение спектра между максимумами потока, аналогичное наблюдавшемуся в [6], что наводит на мысль о дополнительном ускорении электронов до МэВ-ных энергий в соответствующие моменты времени.

Качественно аналогичный эффект двух степенных законов, мягкого ниже ($\gamma \approx 3.6–4.2$) и более жесткого выше 0.5 МэВ ($\gamma \approx 0.9–1.1$), в предположении о разных условиях распространения ю-электронов от Юпитера до Земли отмечался в

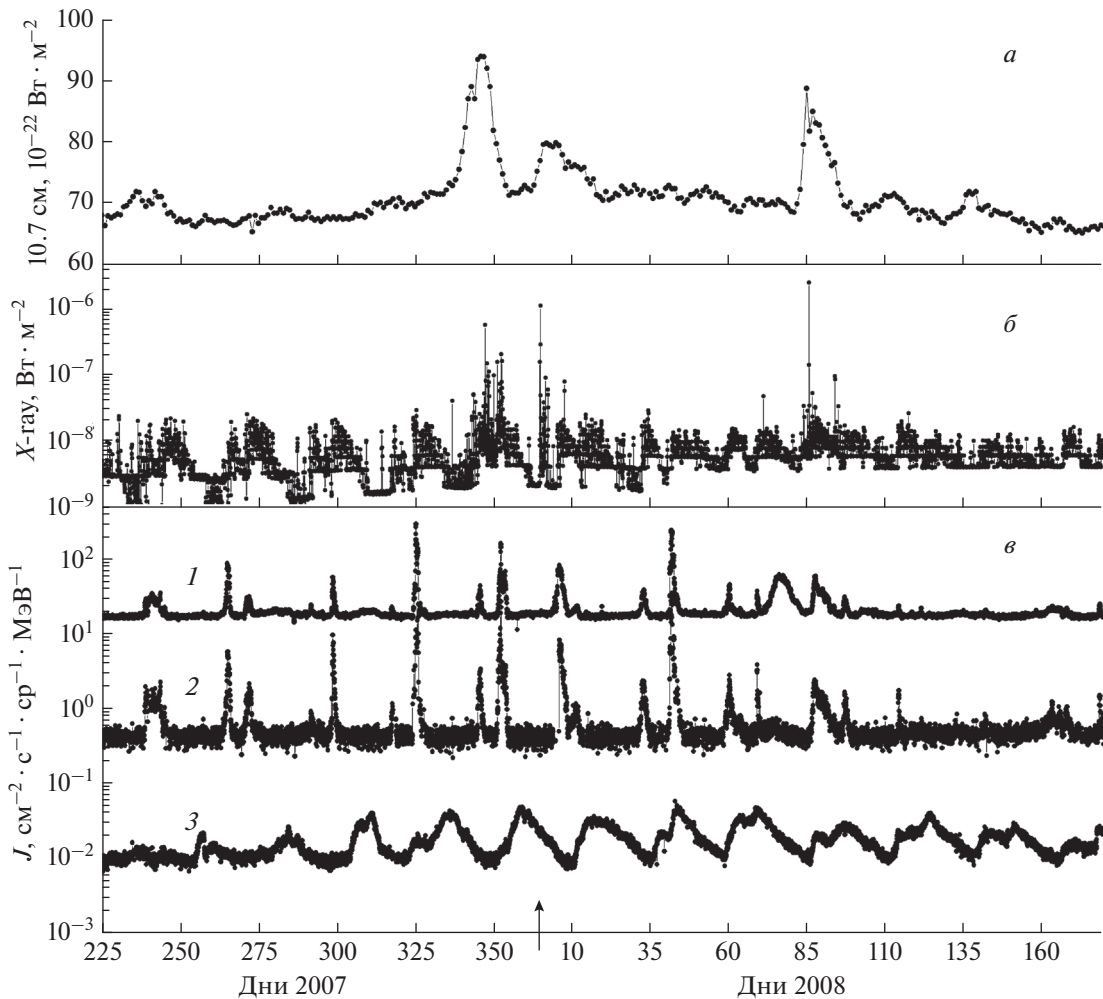


Рис. 2. Радиоизлучение — 10.7 см (а). Рентгеновское излучение — 1–8 Å (б). Временные профили потоков частиц (в): 1 — протоны 300–750 кэВ по данным SOHO/LION, 2 — электроны 103–175 кэВ по данным ACE/EPAM, 3 — юпитерианские электроны 0.67–3 МэВ по данным SOHO/EPHIN. Стрелка на оси абсцисс обозначает границу между 2007 и 2008 гг.

[8]. На наш взгляд, это обстоятельство свидетельствует об ускорении электронов в межпланетном пространстве до энергий порядка сотен кэВ. Турбулентность магнитного поля в замкнутых структурах и областях взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра может рассматриваться как механизм такого ускорения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Двухстепенной спектр электронов в 27-дневных вариациях их потоков в минимуме СА говорит о разных источниках этих компонент. Электроны с $\gamma \approx 1.5$ –1.6 генерированы магнитосферой Юпитера, а электроны малых энергий (<1 МэВ) с $\gamma \geq 3.5$, которые наблюдаются вместе с ю-электронами, дополнительно ускоряются в процессе распространения, что и приводит к смягчению их спектра.

Это предположение подтверждается тем, что в это же время отмечены кратковременные (2–3 дня) возрастания потоков протонов с энергией 0.1–1 МэВ аппаратами ACE/EPAM [9] и SOHO/LION [10] на многих оборотах Солнца. Эти низко энергичные электроны и протоны были не всплешечного характера: Солнце было очень спокойным в течение всего периода измерений и не было всплесков ни в радиоизлучении 10.7 см, ни в мягком рентгеновском излучении (рис. 2). Несолнечное происхождение частиц низкой энергии и их связь со структурами магнитного поля Солнца, подтверждалось также измерениями на аппаратах STEREO-A и B [11]. Всплески наблюдались в порядке, соответствующем гелиодолготам местоположений STEREO-B, ACE и SOHO, STEREO-A. Мы объясняем эти наблюдения существованием замкнутых структур магнитного поля Солнца, образующих магнит-

ные ловушки заряженных частиц [12, 13], в которых при определенных условиях возмущенности магнитного поля происходит ускорение частиц до небольших (<1 МэВ) энергий. Замкнутые структуры магнитного поля постоянно возникают при взаимодействии разноскоростных потоков солнечного ветра и, при спокойном Солнце, существуют длительное время, иногда до десятка оборотов Солнца и более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электроны, зарегистрированные во время минимума солнечной активности 2007–2008 гг., имеют две составляющие: 1) периодические 27-дневные возрастания юпитерианского происхождения с показателем спектра $\gamma \approx 1.5–1.6$ и 2) электроны с $E < 1$ МэВ с более мягким спектром ($\gamma \geq 3.5$), обусловленные ускорением частиц в межпланетном пространстве, аналогичном ускорению частиц в рекуррентных потоках. Наблюдавшиеся потоки протонов с энергиями <1 МэВ не-солнечной природы, генерируются, по-видимому, тем же механизмом, что и электроны с мягким спектром в 27-дневных вариациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Teegarten B.J., McDonald F.B., Trainor J.H et al.* // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 3615.
2. *Hamilton D.C., Simpson J.A.* // Astrophys. J. 1979. V. 228. Art. No. L. 123.
3. *Moses D.* // Astrophys. J. 1987. V. 313. P. 471.
4. *Heber B., Potgieter M.S., Ferreira S.E.S. et al.* // Planet Space Sci. 2007. V. 55. Nos. 1–2. P. 1.
5. *Müller-Mellin R., Bothmer V., Kunow H. et al.* // Proc. 25-th ICRC. 1997. V. 1. P. 301.
6. *del Peral L., Gomez-Herrero R., Rodriguez-Frias M.D. et al.* // Astropart. Phys. 2003. V. 20. P. 235.
7. <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>.
8. *Kuhl P., Dresing N., Dunzlaff P. et al.* // Proc. 33-th ICRC. 2013. P. 3480.
9. http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lv12-DATA_EPAM.html.
10. <http://www.ieap.uni-kiel.de/et/ag-heber/costep>.
11. <http://www.srl.caltech.edu/STEREO/DATA/HET/Ahead>.
12. *Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л. и др.* // Астрон. журн. 2017. Т. 94. № 12. С. 1062; *Daibog E.I., Kecskemety K., Lazutin L.L. et al.* // Astron. Rep. 2017. V. 61. No. 12. P. 1073.
13. *Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 161; *Daibog E.I., Kecskemety K., Lazutin L.L., Logachev Yu I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 136.

Spectrum of Jovian electrons at the minimum of Solar activity 2007–2008

E. I. Daibog^{a,*}, Yu. I. Logachev^a

^a*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^{*}*E-mail: qamilldaibog@srd.sinp.msu.ru*

Spectra of 27-day increases in electrons of MeV energies during the period of minimum solar activity in 2007–2008 can be represented by a combination of two power laws with $\gamma \approx 1.5–1.6$ at energies above 0.7 MeV, which indicates their Jovian origin, and $\gamma \geq 3.5$ at lower energies, which, together with short (2–3 days) bursts of the intensity of electrons and protons with energies of the order of hundreds of keV indicates the possibility of accelerating low-energy particles in closed structures of the interplanetary magnetic field.