

ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИН ПОТОКОВ ПРОТОНОВ ДЛЯ ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА С ПЛАНЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ

© 2024 г. И. С. Саванов*

Федеральное государственное бюджетное учреждение Российской академии наук
Институт астрономии, Москва, Россия

*E-mail: isavanov@inasan.rssi.ru

Поступила в редакцию 10.05.2024 г.

После доработки 06.07.2024 г.

Принята в печать 18.07.2024 г.

Разработанная ранее для Солнца методика оценок параметров потоков протонов по энергии вспышек применена к данным о вспышечной активности звезд солнечного типа. Полученные результаты найдут применение для оценки радиационной обстановки в звездной системе, содержащей экзопланеты. В исследовании были использованы данные каталога о вспышках звезд солнечного типа, полученные по результатам наблюдений телескопа Кеплер. Эмпирическая зависимость между энергией вспышек в рентгеновском диапазоне и потоком протонов для Солнца была распространена на случай звездных вспышек, аналогично тому, как это было сделано ранее в случае анализа корональных выбросов массы (СМЕ). Используемый метод имеет ограничения, вызванные распространением солнечной аналогии на другие звезды, а также неопределенностями, возникающими при применении масштабирования в скорректированном соотношении. Получено, что характерные величины потока протонов для звезд солнечного типа могут на один порядок превышать оценки для Солнца. Отмечены перспективы развития альтернативных методов оценки величин потоков протонов в окрестности звезд поздних спектральных классов (например, по изучению поведения линий излучения Si IV и He II в дальнем ультрафиолетовом диапазоне).

Ключевые слова: звезды, солнечные аналоги, активность, вспышки, потоки протонов

DOI: 10.31857/S0004629924090065 EDN: IAUUVV

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационная обстановка в звездной системе, содержащей экзопланеты, определяется ее центральной звездой [1]. В случае Солнечной системы ее определяет Солнце, которое является источником солнечных энергичных частиц (SEP), а также модулирует поступающий в систему поток галактических космических лучей. Протоны SEP ускоряются как при солнечных вспышках, так и при корональных выбросах массы (СМЕ) [2]. События SEP небольшой продолжительности достигают своей пиковой интенсивности внутри ограниченного конуса излучения; считается, что они связаны со вспышками на Солнце и радиовсплесками III типа (см., напр., [3]). С другой стороны, высокоэнергетические события SEP, которые могут длиться несколько дней и достигают значительных пиковых потоков, имеют широкий конус излучения и, как полагают, связаны с СМЕ и радиовсплесками II типа. Тот факт, что высокоэнергетические протоны могут

ускоряться как во время импульсной фазы вспышек, так и при ударных волнах, вызванных СМЕ (см., напр., [2] и ссылки в ней), усложняет интерпретацию проявлений механизмов, ответственных за ускорение, инжекцию и распространение SEP в межпланетной среде, хотя преобладающие данные свидетельствуют в пользу второго источника (ударных волн, вызванных СМЕ), как доминирующего источника протонов высокой энергии в наиболее интенсивных событиях (см., напр., [4]).

Детальные исследования значительных событий SEP за последние 60 лет были выполнены космическими аппаратами на основе измерений вблизи Земли. В частности, наиболее интенсивное событие SEP, выявленное в современную космическую эру, произошло 4 августа 1972 г., когда пиковый поток протонов с $E > 10$ МэВ достиг 6×10^4 pfu [5]. Из анализа исторических солнечных и геокосмических наблюдений были сделаны попытки дать количественную оценку

одному из самых экстремальных событий, которое когда-либо было зарегистрировано на Солнце, известному, как событие Кэррингтона, произошедшему 1–2 сентября 1859 г. Событие Кэррингтона и соответствующий поток частиц принадлежат к случаям экстремальной радиационной опасности в околоземной среде, которую способно произвести Солнце. Однако с помощью реконструкции солнечной активности, полученной на основе радионуклидных данных в природных архивах (кольцах деревьев, полярных льдах), стало ясно, что на Солнце, вероятно, могло происходить гораздо больше экстремальных событий (например, события A774–775 и др.) [6].

2. ОЦЕНКИ ПИКОВОГО ПОТОКА ПРОТОНОВ

Чтобы количественно оценить величину пикового потока протонов, мы применим эмпирическую зависимость между энергией вспышек в рентгеновском диапазоне и пиковыми протонными потоками (Peak Proton Flux) (PPF), найденную в работе [7], и распространим ее на случай звездных вспышек, аналогично тому, как это было сделано в случае анализа СМЕ авторами работы [8]. Эта зависимость была неоднократно откалибрована на основе наблюдений вспышек от Солнца, регистрируемых, например, спутниками серии GOES. Калибровка охватывает энергии вспышек от $\approx 10^{-7} \text{ W} / \text{m}^2$ до $10^{-2} \text{ W} / \text{m}^2$, которые соответствуют потокам протонов от 1 до 10^4 rfu [7]. Как и выражение из работы [8], это эмпирическое соотношение применимо к энергии, которая излучается в рентгеновских лучах, тогда как для звезд чаще приходится использовать сведения о болометрической энергии [9]. Чтобы применить его к данным каталогов звездных вспышек, как и в [9], мы использовали допущение о том, что рентгеновское излучение составляет 1% от болометрического. Как указывалось выше, наблюдаемые солнечные потоки рентгеновского излучения составляют величину около $10^{-4} \text{ W} / \text{m}^2$ [7, 8], что соответствует энергиям рентгеновского излучения 10^{29} эрг [8] и болометрического – 10^{31} эрг [10]. В нашем дальнейшем анализе для оценки потока протонов PPF будет применяться следующее уравнение из работы [7]: $I_p = 10^{7.5} \times E^{5/6}$. Используемый метод имеет ограничения, прежде всего, вызванные принципиальным распространением солнечной аналогии на звезды других

спектральных классов, а также неопределенностями, конкретно возникающими при применении скорректированного соотношения с масштабирующим множителем.

В нашей работе для оценки величин потока протонов для звезд солнечного типа мы использовали данные каталога [11]. Авторы каталога [11] сообщили о полученных ими результатах анализа супервспышек на звездах солнечного типа (конкретно – звездах главной последовательности спектрального класса G с эффективной температурой 5100–6000 K) по всем данным основной миссии Kepler. Авторами был обновлен метод обнаружения вспышек на основе применения высокочастотной фильтрации данных для устранения вариаций блеска, вызванных звездными пятнами. Существенным достоинством исследования является то, что объем выборки звезд солнечного типа и солнцеподобных звезд с супервспышками возрос примерно в 4 и 12 раз, соответственно, по сравнению с предшествующими базами данных. В результате авторы [11] обнаружили 2341 супервспышку на 265 звездах солнечного типа и 26 супервспышек на 15 солнцеподобных звездах. Это позволило получить более четкое представление о статистических свойствах супервспышек. Было показано, что наблюдаемый верхний предел энергии этих вспышек уменьшается с увеличением периода вращения для звезд солнечного типа, при этом частота супервспышек уменьшается с увеличением периода вращения звезды. Максимальная энергия, которую авторы [11] обнаружили у молодых быстровращающихся звезд солнечного типа (с периодами в несколько суток), доходит до 10^{36} эрг, а в случае медленно вращающихся звезд с периодами вращения 20–40 сут и возрастом порядка возраста Солнца составляет около 4×10^{34} эрг. Диапазон энергии вспышек [11] согласуется с физическими оценками звездных и солнечных вспышек [12]. Анализ звезд такого типа указывает, что активность Солнца может проявляться в виде супервспышек класса X700 с энергией 7×10^{33} эрг и класса X1000 с энергией 1×10^{34} эрг один раз в 3000 лет и 6000 лет, соответственно. На основе данных работы [11] об энергиях вспышек звезд солнечного типа мы определили вероятные величины соответствующих потоков протонов для 2341 вспышки 265 рассматриваемых объектов.

На верхней части рис. 1 представлена зависимость величин энергий супервспышек от площади пятен на поверхности объектов из каталога [11]. Вертикальная пунктирная линия соответствует максимальной площади активной области (группы пятен), наблюдаемой за последние 150 лет (6132 м.д.п.) 8 апреля 1947 г. [4]. На нижней панели рис. 1 изображена зависимость величин PPF, установленных по приводимому выше соотношению, от эффективной температуры объектов из каталога [11]. Диапазон изменений оценок PPF для Солнца может быть оценен по данным из работы [7] и составляет от единиц до 1.4×10^4 pfu (единичное максимальное измерение), среднее значение составляет около 1000 (показано горизонтальной пунктирной линией). Диапазон изменений оценок PPF для Солнца представлен на рисунке вертикальной светлой полосой. Характерные величины PPF, полученные для звезд солнечного типа, примерно на 3 порядка превышают оценки для Солнца (см. [7]) и на один порядок оценки для максимального потока солнечных протонов [13].

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашем исследовании мы применили разработанную ранее для Солнца методику оценок параметров потоков протонов PPF по энергии вспышек к данным о вспышечной активности звезд солнечного типа. Полученные результаты могут служить для оценки радиационной обстановки в звездной системе, содержащей экзопланеты, которая определяется ее центральной звездой.

В отличие от нашего современного Солнца, его молодые аналоги обладают более значительной магнитной активностью, которая проявляется в наличии сильных поверхностных магнитных полей мощностью до нескольких сотен Гаусс, крупных звездных пятен, покрывающих до 10% поверхности звезды, плотной и горячей яркой рентгеновской короны, мощных быстрых ветров и частых вспышек, включая супервспышки (см., напр., [11]).

В нашем исследовании были использованы данные каталога [11] о вспышках звезд солнечного

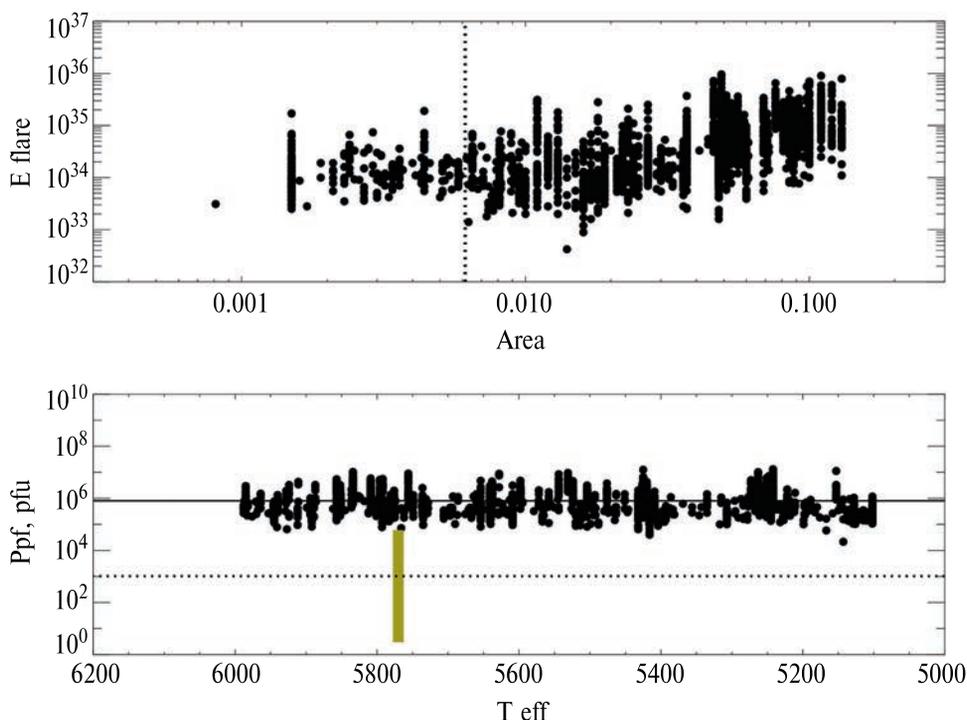


Рис. 1. Верхняя панель: зависимость величин энергий супервспышек от площади пятен на поверхности объектов из каталога [11]. Вертикальная пунктирная линия соответствует максимальной наблюдаемой за последние 150 лет площади активной области (группы пятен) (см. текст). Внизу: зависимость величин PPF, установленных по масштабируемому соотношению, от эффективной температуры объектов из каталога [11]. Диапазон изменений оценок PPF для Солнца согласно работе [7] представлен на рисунке вертикальной светлой полосой. Пунктирной линией представлено среднее значение оценок PPF для Солнца. Горизонтальная сплошная линия – средняя величина PPF, полученная для звезд солнечного типа из каталога [11].

типа, полученные по результатам наблюдений телескопа Кеплер. Чтобы количественно оценить величину пикового потока протонов, мы применили эмпирическую зависимость из работы [7] между энергией вспышек в рентгеновском диапазоне и потоком протонов, которая была распространена на случай звездных вспышек, аналогично тому, как это было сделано ранее в случае анализа корональных выбросов массы СМЕ [8, 14]. Отметим, что исходная зависимость была неоднократно откалибрована на основе наблюдений вспышек от Солнца, регистрируемых, например, спутниками серии GOES [7]. Используемый метод имеет ограничения, прежде всего, вызванные распространением солнечной аналогии на звезды других спектральных классов, а также неопределенностями, возникающими при применении масштабирования в скорректированном соотношении. Предварительные оценки показали, что характерные величины потока протонов, полученные для звезд солнечного типа, могут примерно на 3 порядка превышать оценки для Солнца. Необходимо отметить, что плотность энергии в потоке $\approx 10^7$ pfu соответствует величине равновесного магнитного поля солнечного ветра более 200 нТл, которые никогда не наблюдались. Возможность реализации таких величин магнитного поля в звездном ветре остается под вопросом и автором не рассматривается.

Помимо подхода, рассмотренного выше, в настоящее время начинают развиваться альтернативные методы оценки величин потоков протонов в окрестности звезд поздних спектральных классов. Например, авторы работы [15] представили новую методику оценки потока мягкого рентгеновского излучения и протонов с энергией превышающей 10 МэВ во время вспышек звезды по изучению поведения линий излучения в дальнем ультрафиолетовом диапазоне (например, Si IV и He II). В качестве примера следует упомянуть результаты анализа нескольких вспышек карлика M4 GJ 876 [15], наблюдаемых с помощью аппаратов HST и Чандра в рамках программы исследования MUSCLES Treasury. Согласно [15], планеты обитаемой зоны, вращающиеся вокруг GJ 876, могут быть подвержены воздействию сильных вспышек с возможным потоком протонов $\approx 10^2 - 10^3$ pfu, и с частотой примерно на четыре порядка чаще, чем у Солнца. Несомненно, все развиваемые

методы найдут широкое применение при оценке величин потоков протонов для звезд с экзопланетами и позволят изучить эволюцию атмосфер экзопланет при воздействии внешних факторов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке программы 10 “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика” Национального центра физики и математики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V. S. Airapetian, R. Barnes, O. Cohen, G. A. Collinson, et al.*, Intern. J. Astrobiology **19**(2), 136 (2020).
2. *A. Papaioannou, I. Sandberg, A. Anastasiadis, A. Kouloumvakos, et al.*, J. Space Weath. and Space Climat **6**, id. A42 (2016).
3. *D. V. Reames*, Space Sci. Rev. **217**(6), id. 72 (2021).
4. *E. W. Cliver, C. J. Schrijver, K. Shibata, and I. G. Usoskin*, Liv. Rev. Solar Physics **19**(1), id. 2 (2022).
5. *V. Kurt, A. Belov, H. Mavromichalaki, and M. Gerontidou*, Ann. Geophysicae **22**(6), 2255 (2004).
6. *I. G. Usoskin, B. Kromer, F. Ludlow, J. Beer, M. Friedrich, G. A. Kovaltsov, S. K. Solanki, and L. Wacker*, Astron. and Astrophys. **552**, id. L3 (2013).
7. *A. Papaioannou, K. Herbst, T. Ramm, E. W. Cliver, D. Lario, and A. M. Veronig*, Astron. and Astrophys. **671**, id. A66 (2023).
8. *A. N. Aarnio, S. P. Matt, and K. G. Stassun*, **760**(1), id. 9 (2012).
9. *M. N. Günther, Z. Zhan, S. Seager, P. B. Rimmer, et al.*, Astron. J. **159**(2), id. 60 (2020).
10. *K. Namekata, T. Sakaue, K. Watanabe, A. Asai, et al.*, **851**(2), id. 91 (2017).
11. *S. Okamoto, Y. Notsu, H. Maehara, K. Namekata, S. Honda, K. Ikuta, D. Nogami, and K. Shibata*, **906**(2), id. 72 (2021).
12. *A. Struminsky and A. Sadovski*, in Stars: From Collapse to Collapse, Proc. of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhыз, Russia 3–7 October 2016; edited by Yu. Yu. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2017), **510**, 105 (2017).
13. *L. I. Miroshnichenko*, Physics Uspekhi **61**(4), 323 (2018).
14. *I. S. Savanov*, Astron. Letters **46**(12), 831 (2020).
15. *A. Youngblood, K. France, R. O. P. Loyd, A. Brown, et al.*, **843**(1), id. 31 (2017).

PROTON FLUXES OF SOLAR-TYPE STARS WITH PLANETARY SYSTEMS

I. S. Savanov*

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: isavanov@inasan.rssi.ru*

The previously developed method for estimating of the parameters of proton fluxes from flare energies for the Sun was applied to data on the flare activity of solar-type stars. The results obtained will be used to assess the radiation situation in a stellar system containing exoplanets. In our analysis we used catalog data on flares of solar-type stars obtained from observations with Kepler telescope. The empirical relations between the energy of X-ray flares and the proton flux for the Sun was extended to the case of stellar flares, similar to what was done previously in the case of coronal mass ejections (CMEs). The method used has limitations caused by the extension of the solar analogy to other stars as well as the uncertainties that arise when applying scaling methods. It was found that the characteristic values of the proton flux for solar-type stars can be one order of magnitude higher than the estimates for the Sun. Prospects for the development of alternative methods for estimating proton fluxes in the vicinity of stars of late spectral types are discussed (for example, by studying the behavior of Si IV and He II emission lines in the far ultraviolet range).

Keywords: stars, solar analogs, activity, flares, proton fluxes