

АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 539.165; 523.9.739

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ СОЛНЕЧНЫХ
ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ (ВЫБРОСОВ) И ПАРАМЕТРОВ
РАСПАДОВ ЯДЕР ^{55}Fe**

С. Н. Майбуров

Темпоральные вариации параметров распадов радиоактивных ядер активно исследуются в последнее время, их обнаружение может указывать на существование нового физического эффекта космического происхождения. В ряде экспериментов зафиксированы годовые и суточные осцилляции параметров α - и β -распадов ядер на уровне 0.05 %. Также наблюдались корреляции параметров слабых распадов ^{60}Co , ^{54}Mn и ^{55}Fe с солнечной активностью, в частности, с вспышками рентгеновского излучения. В данной работе изучаются возможные временные корреляции параметров слабых распадов ^{55}Fe с выбросами с поверхности Солнца протонов высоких энергий (СПС). Измерения проводились посредством регистрации γ -квантов, возникающих в процессе распада, полупроводниковыми детекторами. Для распадов ^{55}Fe было обнаружено пять значительных отклонений скорости счёта распадов от ожидаемой скорости в течение 45–90 часов на уровне $\sim 0.2\%$ в сторону уменьшения, коррелированные с выбросами протонов. При этом все обнаруженные отклонения параметров распадов носят опережающий характер и регистрируются от 20 до 90 часов до момента начала выброса с достоверностью на уровне 90%.

Ключевые слова: солнечная активность, выбросы протонов, радиоактивный распад.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: mayburov@sci.lebedev.ru.

Введение. Исследование различных видов солнечной активности и разработка методов их прогнозирования является важнейшей задачей современной астрофизики. Хорошо известно, что Солнце излучает потоки электромагнитного излучения и заряженных частиц переменной интенсивности [1, 2]. В частности, наибольшее изменение интенсивности жесткого электромагнитного излучения происходит в виде солнечных вспышек – коротких (около 30 мин) периодов повышенной интенсивности рентгеновского и гамма-излучения [1]. При этом интенсивность излучения Солнца в диапазоне энергий от 2 до 100 кэВ может возрастать на 4–5 порядков по сравнению с обычной. Вспышки подразделяются на классы А, В, С, М, Х в порядке возрастания интенсивности, для каждого последующего класса интенсивность увеличивается на порядок [1]. Среднее количество вспышек класса Х составляет около 20–30 в год в период высокой солнечной активности, в период солнечного минимума оно снижается практически до нуля [1]. Такие вспышки вызывают геомагнитные бури, нарушения радиосвязи и тому подобные последствия. Кроме того, рентгеновское и гамма-излучение вспышек класса Х может повреждать оборудование искусственных спутников Земли ИСЗ и МКС, и представлять опасность для здоровья космонавтов [1].

Заряженные и нейтральные частицы, генерируемые Солнцем – солнечные космические лучи (СКЛ), – регистрируются исследовательской аппаратурой наряду с галактическими космическими лучами [1, 2]. Интенсивные выбросы частиц со средней энергией менее 100 КэВ – корональные выбросы массы порождают на Земле магнитные бури, нарушение радиосвязи и работы электросетей [2]. Выбросы более высокой энергии, именуемые СПС (солнечные протонные события), с энергией частиц свыше 10 эВ могут представлять опасность для аппаратуры ИСЗ и МКС и здоровья космонавтов. Их количество в среднем составляет около 30 в год в периоды высокой солнечной активности, большая часть интенсивных СПС (около 80%) коррелируют по времени с солнечными вспышками в пределах 140 часов [3, 4]. Основные характеристики отдельного СПС – это средняя энергия частиц и интенсивность их потока в относительных единицах, обозначаемая J_m , которая может варьироваться в интервале от 0.1 до 10^4 [3, 4]. При этом спектр J_m носит падающий характер – только около 25% событий имеет J_m значение более 10, и около 10% более 100. СПС с наибольшей средней энергией частиц – свыше 0.43 ГэВ, обозначаемые аббревиатурой GLE (Ground luminosity enhancement), могут представлять также радиационную опасность для авиапассажиров на высотах более 10 км [3, 4].

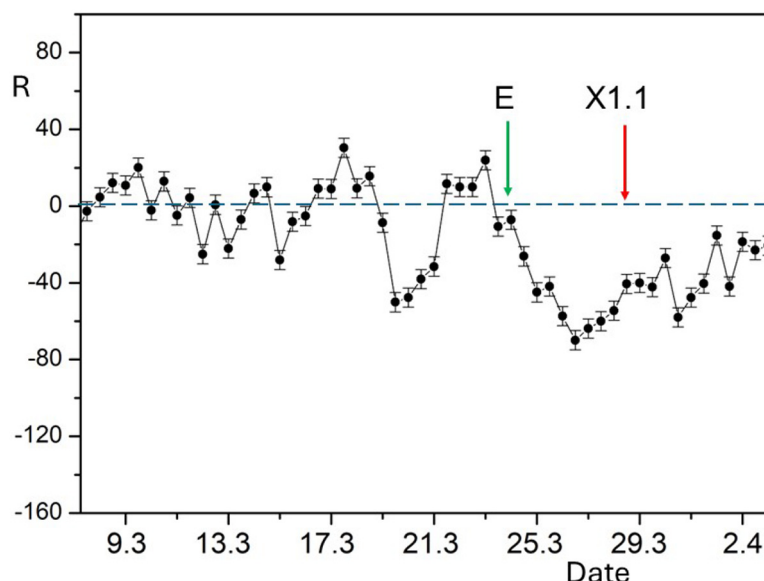


Рис. 1: Отклонение скорости счёта γ -квантов от распадной экспоненты для распадов ^{55}Fe с 8.03.2024 по 03.04.2024 г., момент E начала СПС обозначен зеленой стрелкой, момент солнечной вспышки обозначен красной стрелкой.

В настоящее время общепризнанных методов прогнозирования солнечных вспышек не существует, поэтому разработка новых методик предупреждения имеет важное прикладное значение. При этом около 20 лет назад было выявлено наличие корреляции между параметрами радиоактивного распада ядер в наземных условиях и солнечными вспышками. Так, в декабре 2006 г. снижение скорости слабого распада изотопа ^{54}Mn на 0.5% наблюдалось, начиная с момента за 70 часов до интенсивной вспышки класса X [5, 6]. В настоящее время существование аналогичной опережающей корреляции, соответствующей снижению скорости счёта распадов до 0.5%, доказано также для слабых распадов изотопов ^{55}Fe и ^{60}Co [7, 8]. Разрабатывается практический инструмент для прогнозирования солнечных вспышек на основе данной методики в земных и космических условиях. В данной работе исследуются возможные временные корреляции СПС событий и параметров распадов изотопа ^{55}Fe , аналогичных обнаруженным для солнечных вспышек. Данные по распадам ^{55}Fe , использованные ранее для изучения влияния солнечных вспышек, были обработаны для изучения возможного влияния СПС на параметры распадов.

Экспериментальная часть. В установке для измерения параметров распада ^{55}Fe детектирование γ -квантов, возникающих в процессе распада, осуществляется Si-PIN

полупроводниковым детектором, охлаждаемым до температуры 212 К в вакууме. Энергетическое разрешение детектора составляет 200 эВ, что позволяет эффективно разрешать две измеряемые спектральные линии γ -квантов 5.9 и 6.5 кэВ, возникающих при распаде ^{55}Fe . Чувствительная область детектора имеет диаметр 6 мм и изолирована от окружающей атмосферы тонким бериллиевым окном. Источник излучения ^{55}Fe и детектор находятся внутри внешнего термостата, в котором поддерживается постоянная температура 293 К. Расстояние между источником и входным окном детектора составляет 5 мм, влияния величины атмосферного давления на скорость счёта распадов не обнаружено. При наборе статистики в измерениях установлен порог регистрации по энергии γ -квантов 4 кэВ, все события с более высокой энергией записывались в память компьютера. Количество фоновых событий выше этого порога измерялось в отдельных наборах статистики раз в 3 месяца и оказалось практически постоянным, оно составляло 39.1 ± 1.2 событий в сутки, по сравнению с $6.5 \cdot 10^7$ регистрируемых событий распадов в сутки. Количество и энергетический спектр фоновых событий совместим с гипотезой, что основная масса фоновых событий обусловлена космическими мюонами. Установка находится в кирпичном здании на высоте 8 метров над уровнем земли.

Как показывают предшествующие измерения СПС, в основном они возникают в периоды максимальной солнечной активности, в последнем солнечном цикле этот период выпадает на 2023–2026 гг. [9]. Статистика для скорости счёта распадов ^{55}Fe записывалась с 11 сентября 2023 г. по 30 октября 2025 г. за исключением перерывов, вызванных проведением контрольных калибровок установки в периоды с 7 по 24 февраля и с 10 по 22 мая 2024 г. В среднем, наблюдаемая скорость счёта γ -квантов – около $2.5 \cdot 10^4$ событий за 30 сек уменьшалась в соответствии с известными для ^{55}Fe , и значения времени жизни этих изотопа 2.7 года, и в соответствии с известной экспоненциальной зависимостью от времени [10].

За данный период произошло 57 событий, квалифицированных как СПС, со значениями J_m , превышающими 0.1, из них 6 событий с величиной J_m , более 100 [9]. Именно такие, наиболее интенсивные события могут представлять наибольшую угрозу для космонавтики [4]. При этом нашей установкой зарегистрировано 6 значительных отклонений скорости счёта распадов от ожидаемой зависимости, которые коррелируют по времени с СПС, из них 5 коррелируют именно с указанными, наиболее интенсивными СПС с J_m , более 100, причём также как для солнечных вспышек рентгеновского излучения они в основном характеризуются падением скорости счёта детектора.

Т а б л и ц а 1

Параметры отклонения скорости счёта распадов ^{55}Fe от расчётной для СПС

Дата	Интенсивность СПС (J_m)	ΔT (час)	ΔI (%)	Отклонение $E(\sigma)$
23.03.2024	656	54	0.16	22.4
8.06.2024	1030	82	0.19	24.1
9.10.2024	1040	19	0.13	14.6
21.11.2024	125	8	0.12	12.3
30.03.2025	147	46	0.15	18.1

Для определения вероятности случайного отклонения скорости счёта распадов необходимо вычислить разницу между ожидаемым числом событий N_e и наблюдаемым числом событий N_m за период данного отклонения. Так как события распадов статистически независимы, то распределение числа событий в данном интервале времени описывается распределением Пуассона. Предполагалось, что систематические ошибки скорости счёта распадов незначительны, и только статистические ошибки должны учитываться для числа независимых событий со статистической дисперсией σ , равной корню квадратному из числа событий в данном интервале времени.

В качестве примера такого отклонения на рис. 1 показан график скорости счёта после вычитания распадной экспоненты для СПС 23.03.2024 г., интенсивность данного СПС весьма велика и соответствует $J_m = 656$. При этом начало падения скорости счёта достоверно опережает начало СПС выброса на 94 часа. Наблюдаемое снижение скорости счёта, ассоциируемое с СПС, в среднем составляет $0.16 \pm 0.15\%$ и продолжается в течение 48 часов. Также через 122 часа после начала СПС 28.03.2024 г. произошла вспышка X1.1, на графике также показано отклонение, вероятно связанное с этой вспышкой, данное отклонение скорости счёта также носит опережающий характер, достоверно опережая момент вспышки на 60 часов. В результате для данного СПС за 48 часов полное уменьшение числа событий $N_e - N_m$ по сравнению с ожидаемой для экспоненциальной зависимостью составляет 128 410 событий, что соответствует отклонению E от экспоненциальной зависимости на уровне 22.4σ . Это соответствует вероятности случайного отклонения на уровне $2.5 \cdot 10^{-37}$, что показывает высокую степень статистической достоверности наблюдаемого отклонения. Напомним, что любой наблюдаемый эффект рассматривается как статистически достоверный, если вероятность его наблюдения в результате случайного отклонения составляет менее 10^{-6} , что соответствует отклонению в 5σ [11].

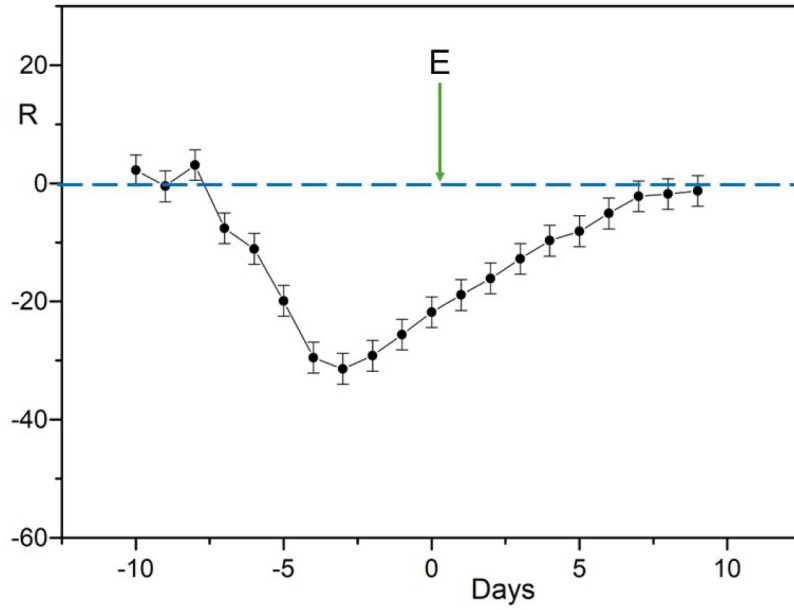


Рис. 2: График наложения эпох для скоростей счёта γ -квантов от распадов ^{55}Fe , момент начала СПС обозначен зелёной стрелкой.

В табл. 1 приведены характеристики отклонений скорости счёта после вычитания распадной экспоненты для пяти СПС, имеющих $J_m > 100$. Помимо величины J_m , в табл. 1 приведены также разница по времени ΔT между временем появления отклонения более чем на 3σ наблюдаемой скорости счёта от ожидаемой и моментом вспышки, её максимальное отклонение ΔI от ожидаемой на протяжении не менее 24 часов и отклонение от расчетной кривой E . Ошибка измерений как для распадов ^{55}Fe , так и для ΔT не превышает 4 часов, для ΔI не превышает 0.01%.

График наложения эпох (усреднения) относительно момента выброса для этих событий приводится на рис. 2. Этот график демонстрирует, что итоговые статистические ошибки весьма малы, и существование данного эффекта выглядит статистически обоснованным. Единственное значительное отклонение скорости счёта распадов, нарушающее условие $J_m > 100$, коррелирует с СПС 19.12.2024 г. с величиной $J_m = 4$, график скорости счёта для него показан на рис. 3. При этом данное СПС, по всей видимости также коррелирует по времени с солнечной вспышкой 23.12.2024 г. с интенсивностью M8.9. Важно указать, что за весь описанный период измерений скорости счёта распадов ^{55}Fe длительностью около 6 лет, никаких значительных отклонений скорости счёта детекторов, некоррелированных с солнечной активностью не зарегистрировано.

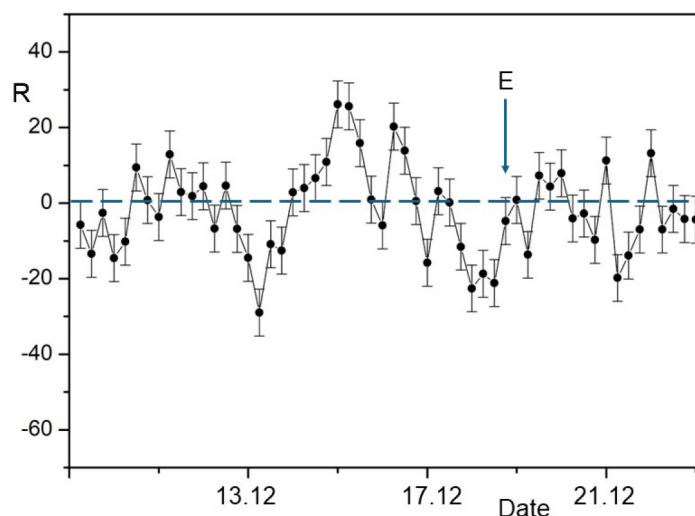


Рис. 3: Отклонение скорости счёта γ -квантов от распадной экспоненты для распадов ^{55}Fe с 6.12 по 25.12.2024 г., момент E начала СПС обозначен синей стрелкой.

Заключение. Изложенные результаты наблюдений свидетельствуют о наличии опережающей временной корреляции между статистикой отсчётов распадов изотопа ^{55}Fe и интенсивными выбросами протонов (СПС), при этом механизм такого влияния в настоящее время неизвестен. Важно, однако, что наблюдаемый эффект может иметь практическое применение для предупреждения о приближении экстремальных солнечных событий, прогнозирование которых важно как для космонавтики, так и для гражданской авиации. Наблюдаемый эффект во многом аналогичен найденной ранее корреляции между вспышками солнечного рентгеновского излучения и параметрами слабых распадов [5–8]. Этот вывод можно понять, так как ранее предполагалось наличие глубокой динамической связи между двумя этими типами явлений [3, 4].

В данной работе представлены результаты, с высокой степенью достоверности демонстрирующие наличие корреляции между скоростью счёта распада изотопов ^{55}Fe и солнечной активностью в виде выбросов протонов высоких энергий. Возможная природа таких корреляций весьма неясна, предложенные до сих пор модели не выглядят убедительными [5, 6]. Однако нельзя полностью исключить, что некоторые частицы или поля (возможно неизвестные), генерируемые Солнцем, могут влиять на скорость распада нестабильного ядра. Кроме того, сам по себе механизм солнечной активности весьма слабо изучен, и изучение его влияния на ядерные распады может принести дополнительную информацию и в этом отношении.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] К. J. H. Phillips, *Guide to the Sun* (Cambridge, Cambridge University Press, 1995).
- [2] T. Howard, *Astrophysics Space Sciences Library* **376** (New York, Springer, 2011).
- [3] J. M. Ryan, J. A. Lockwood, H. Debrunner, *Space Sci. Rev.* **93**, 35 (2000). DOI: 10.1051/0004-6361:20065252.
- [4] L. Miroshnichenko, *Solar Cosmic Rays: Fundamentals and Applications* (New York, Springer, 2014).
- [5] E. Fischbach, J. B. Buncher, J. T. Guenwald, et al., *Space Sci. Rev.* **145**, 285 (2009). DOI : 10.1007/s11214-009-9518-5.
- [6] J.H. Jenkins, E. Fischbach, *Astropart. Phys.* **31**, 407 (2009). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2009.04.005.
- [7] S. A. Bogachev, A. G. Kharlamov, I. A. Kishin, et al., *J. Phys. Conf. Series* **1690**, 012028 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1690/1/012028.
- [8] С. Н. Майбуров, Е. И. Демихов, А. С. Кубанкин и др., *ЭЧАЯ* **56**, 861 (2025). DOI: 10.1134/S1063779624701909.
- [9] https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/.
- [10] B. R. Martin, *Nuclear and particle physics: An introduction* (John Wiley & Sons, New-York, 2004).
- [11] D. J. Hudson, *Mathematical statistics* (CERN, Geneva, 1964).

Поступила в редакцию 27 июля 2026 г.

После доработки 10 сентября 2026 г.

Принята к публикации 11 сентября 2026 г.