

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ РАСПАДОВ ЯДЕР $^{55}\text{Fe}$ И $^{60}\text{Co}$

*С. Н. Майбуров*<sup>1,\*</sup>, *Е. И. Демихов*<sup>1</sup>, *А. С. Кубанкин*<sup>1,2</sup>,  
*И. А. Кищин*<sup>1,2</sup>, *Ю. Е. Титаренко*<sup>3</sup>, *К. В. Павлов*<sup>3</sup>,  
*В. М. Живун*<sup>3</sup>, *Я. О. Зарицкий*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Белгород, Россия

<sup>3</sup> Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

Темпоральные вариации параметров распадов радиоактивных ядер активно исследуются в последнее время, их обнаружение может быть сигналом о новых физических эффектах космического происхождения, в частности, влияния процессов, происходящих на Солнце. В ряде экспериментов зафиксированы годовые и суточные осцилляции параметров  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов нестабильных ядер на уровне 0,05%. Также наблюдались корреляции интенсивности слабых распадов  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{55}\text{Fe}$  с солнечной активностью, в частности, со вспышками рентгеновского излучения. В работе изучались корреляции с интенсивными солнечными вспышками параметров слабых распадов  $^{60}\text{Co}$  и  $^{55}\text{Fe}$ , измерения производились посредством регистрации распадных  $\gamma$ -квантов полупроводниковыми детекторами. Для распадов  $^{55}\text{Fe}$  было обнаружено восемь значительных отклонений скорости счета распадов от ожидаемой скорости на уровне  $\sim 0,2\%$  в сторону уменьшения, коррелированных со вспышками на Солнце. Для  $^{60}\text{Co}$  обнаружены четыре аналогичных события с отклонениями на уровне  $\sim 0,4\%$ . При этом все обнаруженные отклонения носят опережающий характер и начинаются от 30 до 155 ч до момента солнечной вспышки с достоверностью на уровне 90%.

Temporal variations of nuclei decay parameters have been actively searched now; their detection may be a signal of new physical effects of cosmic origin, in particular, influence of processes occurring on the Sun. A number of experiments have recorded annual and daily oscillations of the parameters of  $\alpha$  and  $\beta$  decays of unstable nuclei at the level of 0.05%. Correlations of intensity of  $^{60}\text{Co}$   $\beta$  decay and  $^{54}\text{Mn}$  and  $^{55}\text{Fe}$  inverse  $\beta$  decays with solar activity, in particular with solar X-ray flares, were also observed. In our study, correlations of intense solar flares with  $^{60}\text{Co}$  and  $^{55}\text{Fe}$  weak decay parameter variations were measured via decay  $\gamma$ -ray detection by semiconductor detectors. For  $^{55}\text{Fe}$  decay, the significant deviations of decay counting

---

\* E-mail: mayburov@sci.lebedev.ru

rate from the expected rate reduce it at the level  $\sim 0.2\%$  correlated with solar flares. For  $^{60}\text{Co}$  decay, four similar events were detected with deviations at a level of  $\sim 0.4\%$ . It was found that all these downward intensity deviations precede solar flare moments from 30 to 155 h at confidence level of 90%.

PACS: 90.60-j; 21.10-k

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время предполагается, что параметры распада радиоактивных ядер не зависят от времени и практически не подвержены влиянию окружающей среды [1]. Тем не менее в некоторых экспериментах наблюдались временные модуляции констант  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов радиоактивных изотопов на уровне порядка  $10^{-3}$  и с периодами в 1 год, 1 сут или несколько месяцев [2–7]. В большинстве таких публикаций сообщалось о периодических вариациях скорости счета  $\beta$ -распада различных тяжелых ядер от Si до Ra с периодом в один астрономический год, для большинства из них амплитуда колебаний составляет примерно  $5 \cdot 10^{-4}$  от средней скорости счета с максимумом около середины февраля [2, 3]. Вариации энергетического спектра электронов с периодом 6 мес. были обнаружены также при  $\beta$ -распаде трития [4]. В эксперименте «Tau-2» измерялось среднее время жизни ядер при  $\alpha$ -распаде короткоживущих изотопов  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{213}\text{Po}$  [6]. Годовые и суточные осцилляции времени жизни с амплитудой порядка  $6 \cdot 10^{-4}$  с годовыми максимумами в середине марта и суточными максимумами около 6 часов утра обнаружены для этих типов изотопов. Такие же годовые осцилляции обнаружены для изотопа  $^{212}\text{Po}$  [7]. Такие виды периодичности позволяют предположить, что подобные вариации могут иметь космофизическое происхождение. Теоретические модели, описывающие подобные эффекты, рассматриваются в [3, 8]. Отметим также, что некоторые другие эксперименты исключают для  $\beta$ -распада и обратного  $\beta$ -распада тяжелых ядер столь значительные годовые модуляции констант распада [9, 10].

Другие исследования в этой области касаются возможного влияния солнечной активности на параметры ядерного распада, в частности, корреляции солнечных вспышек со скоростью распада радиоактивных изотопов [11, 12]. Солнечные вспышки — это короткие (около 30 мин) периоды повышенной электромагнитной активности Солнца [13]. При этом интенсивность рентгеновского излучения Солнца в диапазоне значений энергии от 2 до 200 кэВ может возрасть на 4–5 порядков. Вспышки подразделяются на классы А, В, С, М, Х в порядке возрастания интенсивности, для каждого последующего класса интенсивность увеличивается на порядок [13, 14]. Интенсивность каждой вспышки выражается соответствующим численным коэффициентом, например Х4.6. 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 [14]. Такие вспышки вызывают геомагнит-

ные бури, нарушения радиосвязи и тому подобные последствия. Кроме того, рентгеновское излучение вспышек класса X может повреждать оборудование искусственных спутников Земли (ИСЗ) и представлять опасность для здоровья космонавтов [13]. В настоящее время надежных методов прогнозирования солнечных вспышек не существует, поэтому разработка новых методик предупреждения имеет важное прикладное значение.

Впервые опережающая корреляция скорости распада ядра и солнечных вспышек, по-видимому, наблюдалась для последовательности интенсивных солнечных вспышек в декабре 2006 г. [3, 12]. В эксперименте измерялась скорость счета гамма-квантов, образующихся в обратном  $\beta$ -распаде изотопа  $^{54}\text{Mn}$ . Получившиеся в процессе распада гамма-кванты с энергией 980 кэВ регистрировались сцинтилляционным детектором. В процессе измерений были обнаружены значительные, длительные снижения скорости счета распадов, которые были коррелированы с моментами солнечных вспышек [12]. В частности, для вспышки класса X3.1 13 декабря 2006 г. резкое снижение скорости счета гамма-квантов началось за 40 ч до момента вспышки, минимум его снижения практически совпадал по времени с моментом вспышки, максимальное снижение скорости счета составляло около  $3 \cdot 10^{-3}$  от среднего значения. В наших экспериментах при помощи полупроводниковых детекторов измерялась скорость счета распадов в  $\beta$ -распаде  $^{60}\text{Co}$  и обратном  $\beta$ -распаде  $^{55}\text{Fe}$ . В ходе измерений были обнаружены четыре периода значительного снижения скорости счета распадов  $^{60}\text{Co}$  порядка  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  от среднего значения и два аналогичных периода снижения скорости счета для распадов  $^{55}\text{Fe}$  [12]. Такие заметные снижения начинались от 24 до 62 ч до момента вспышек класса M, что указывает на возможность предсказания таких событий по значениям скорости счета распадов изотопов. В данной работе приводятся результаты мониторинга процессов распада  $^{60}\text{Co}$  и  $^{55}\text{Fe}$  в 2021–2024 гг. и их корреляции с поведением солнечной активности в рентгеновском диапазоне.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В установке для измерения параметров распада  $^{55}\text{Fe}$  детектирование  $\gamma$ -квантов 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 гамма-квантов 5,9 и 6,5 кэВ, возникающих при распаде  $^{55}\text{Fe}$ . Чувствительная область детектора имеет диаметр 6 мм и изолирована от окружающей атмосферы тонким бериллиевым окном. Источник излучения  $^{55}\text{Fe}$  и детектор находятся внутри внешнего термостата, в котором поддерживается постоянная температура 293 К. Расстояние между источником и входным окном детектора составляет 5 мм. При наборе статистики в измерениях установлен порог

регистрации по энергии гамма-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 мес. и оказалось практически постоянным, оно составляло  $(39,1 \pm 1,2)$  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 м над уровнем земли.

Коаксиальный германиевый детектор Н-типа из германия высокой чистоты (HPGe) использовался для регистрации гамма-квантов, возникающих в распаде  $^{60}\text{Co}$  с основными энергетическими линиями 1,173 и 1,332 МэВ. Детектор охлаждается до температуры 77,4 К, он подключен к стандартному спектрометрическому тракту и имеет разрешение 1,8 кэВ для линии 1,173 МэВ. Порог регистрации по энергии гамма-квантов установлен на уровне 100 кэВ, при таком пороге скорость счета фоновых событий была незначительна. Установка расположена на цокольном этаже кирпичного здания. Детектор находится в низкофоновой ( $< 50$  Бк/кг) свинцовой камере с толщиной стенки 100 мм и внутренним медным экраном для подавления вторичного характеристического рентгеновского излучения. Расстояние между установками для измерения распадов  $^{55}\text{Fe}$  и  $^{60}\text{Co}$  составляет 3 км. Для описания данных использовано московское время (МТ), относительно мирового времени определяемое по формуле  $\text{MT} = \text{UTC} + 3$ , т. е. имеющее сдвиг в 3 ч. Характеристики солнечных вспышек приводятся из каталога NASA [13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Статистика для скорости счета распадов  $^{55}\text{Fe}$  записывалась с 20 октября 2021 г. по 13 апреля 2024 г., за исключением перерывов, вызванных техническими проблемами и проведением калибровок. Статистика для распадов  $^{60}\text{Co}$  записывалась с 14 ноября 2023 г. по 7 марта 2024 г., также с определенными перерывами. В среднем наблюдаемые скорости счета гамма-квантов уменьшались в соответствии с известными для  $^{55}\text{Fe}$  и  $^{60}\text{Co}$  значениями времени жизни этих изотопов 2,7 и 5,3 года с ожидаемой экспоненциальной зависимостью от времени. В данный период 11-летнего солнечного цикла солнечная активность была высокой, что позволило изучить корреляции скорости счета распадов с солнечными вспышками X-класса.

Набранная статистика для распадов  $^{55}\text{Fe}$  позволила проанализировать предполагаемые корреляции для 8 событий вспышек X-класса. В качестве примера такой корреляции на рис. 1 показан график отклонения скорости счета гамма-квантов от ожидаемой экспоненциальной кривой в зависимости от времени для вспышки класса X1.1. 2 октября 2022 г. полная скорость счета детектора составляла в среднем около

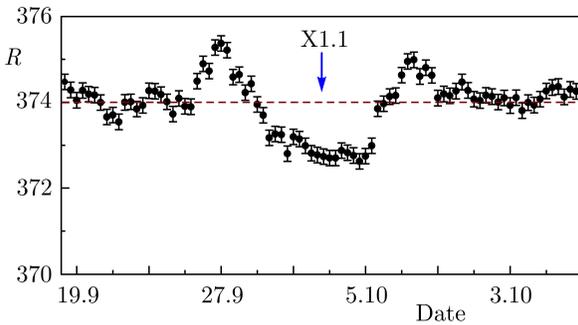


Рис. 1. Скорость счета гамма-квантов от распадов  $^{55}\text{Fe}$  с 18.09.2022 г. по 17.10.2022 г., момент солнечной вспышки обозначен стрелкой

370 гамма-квантов в секунду. Как видно на графике, после вычитания экспоненциальной зависимости это отклонение привело сначала к существенному повышению скорости счета, начавшегося за 150 ч до момента вспышки, а затем за 96 ч до момента вспышки перешло к значительному снижению относительно ожидаемого значения для стандартной зависимости. Наблюдаемое максимальное увеличение составляет около 0,4 %, а уменьшение около 0,35 %. Для наглядности к этим значениям добавлена ожидаемая для экспоненциальной зависимости скорость счета в момент вспышки, в данном случае это 374 события в секунду.

Следует отметить, что значительное начальное повышение скорости счета распадов наблюдалось лишь для двух событий из девяти, для остальных оно мало, как видно из графиков для распадов  $^{55}\text{Fe}$  на рис. 3 и 4, поэтому в качестве основной характеристики корреляции выбрано уменьшение числа событий по сравнению с ожидаемым в области снижения скорости счета, в данном случае начинающееся за 96 ч до момента вспышки. Для определения вероятности случайного отклонения скоростей счета необходимо вычислить разницу между ожидаемым числом событий  $N_e$  и наблюдаемым числом событий  $N_m$  за период данного отклонения. Предполагалось, что систематические ошибки скорости счета распадов незначительны, и только статистические ошибки должны учитываться согласно распределению Пуассона для числа независимых событий со статистической дисперсией  $\sigma$ , равной корню квадратному из числа событий в данном интервале времени [1]. В результате за 120 ч полное уменьшение числа событий  $N_e - N_m$  составляет 705 620, это соответствует статистическому отклонению  $E$  в  $45,6\sigma$ , т. е. вероятности случайного отклонения на уровне  $10^{-166}$ .

В табл. 1 приведены характеристики корреляций отклонения скорости счета распадов  $^{55}\text{Fe}$  для событий солнечных вспышек. Помимо статистического отклонения, это разница по времени  $\Delta T$  между временем появления отклонения более чем на  $3\sigma$  наблюдаемой скорости счета

**Таблица 1. Параметры отклонения скорости счета распадов  $^{55}\text{Fe}$  при солнечных вспышках**

Дата	Интенсивность вспышки	$\Delta T$ , ч	$\Delta I$ , %	$E(\sigma)$
28.10.2021	X1.0	128	0,18	9,5
17.04.2022	X1.2	116	0,43	44,1
2.10.2022	X1.1	150	0,35	45,6
6.01.2023	X1.1	56	0,17	23,3
14.12.2023	X2.7	36	0,11	8,1
1.01.2024	X4.8	124	0,15	12,4
23.03.2024	X1.1	32	0,13	17,1
29.03.2024	X1.2	80	0,14	28,2

**Таблица 2. Параметры отклонения скорости счета распадов  $^{60}\text{Co}$  при солнечных вспышках**

Дата	Интенсивность вспышки	$\Delta T$ , ч	$\Delta I$ , %	$E(\sigma)$
14.12.2023	X2.7	72	0,85	89,1
1.01.2024	X4.8	142	0,42	45,6
29.01.2024	M7.2	140	0,33	34,7
23.02.2024	X6.6	64	0,38	37,6

от ожидаемой и моментом вспышки, ее максимальное отклонение  $\Delta I$  от ожидаемой на протяжении не менее 24 ч. Такие же характеристики использованы и в табл.2 для описания отклонений для распадов  $^{60}\text{Co}$  для событий солнечных вспышек. Ошибка измерений как для распадов  $^{55}\text{Fe}$ , так и  $^{60}\text{Co}$  для  $\Delta T$  не превышает 4 ч, для  $\Delta I$  не превышает 0,01 %.

Для корреляций распадов  $^{60}\text{Co}$  были зарегистрированы четыре события солнечных вспышек, три вспышки X-класса и одна вспышка M-класса с интенсивностью M7.2, корреляции отклонений скорости счета для них приводятся в табл.2. На рис.2 показан график скорости счета распадов для солнечной вспышки 23.02.2024 г. с интенсивностью X6.6. Это максимальное значение интенсивности вспышек за последние 6 лет. Полная скорость счета детектора в данный период составляла в среднем около 230 гамма-квантов в секунду. Как видно на графике, после вычитания экспоненциальной зависимости это отклонение приводит сначала к некоторому повышению скорости счета, начавшегося за 85 ч до момента вспышки, а затем за 40 ч до момента вспышки переходит к значительному снижению относительно ожидаемого значения для стандартной зависимости, наблюдаемое максимальное уменьшение составляет около 0,45 %. Для наглядности к этим значениям добавлена ожидаемая для экспоненциальной зависимости скорость счета в момент вспышки, в данном случае это 228,1 событий в секунду. Статистический эффект данного отклонения количества регистрируемых гамма-квантов составляет 37,6 $\sigma$ , что соответствует вероятности случайного отклонения

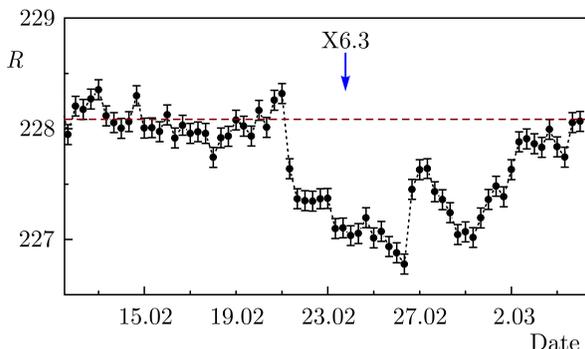


Рис. 2. Скорость счета гамма-квантов от распадов  $^{60}\text{Co}$  с 12.02.2024 г. по 5.03.2024 г., момент солнечной вспышки обозначен стрелкой

на уровне  $10^{-93}$ . Следует отметить, что для каждого зарегистрированного отклонения в распадах  $^{55}\text{Fe}$  и  $^{60}\text{Co}$  вероятность случайного отклонения скорости счета меньше  $10^{-12}$ .

Важно отметить, что в ходе измерений два события вспышек X-класса удалось зарегистрировать одновременно, как для скорости счета распадов  $^{55}\text{Fe}$ , так и для  $^{60}\text{Co}$ , графики для них приводятся на рис. 3 и 4 в относительных единицах. Полная скорость счета детектора для распадов  $^{60}\text{Co}$  в данный период составляла в среднем около 230 гамма-квантов в секунду, а для детектора распадов  $^{55}\text{Fe}$  — около 340 гамма-квантов в секунду. Для этих событий изменения скорости счета начались практически синхронно более чем за 36 ч до вспышки. Такая совместная регистрация корреляций повышает достоверность существования данного эффекта, минимизируя вероятность присутствия каких-либо систематических факторов влияния на показания детекторов. Важно указать

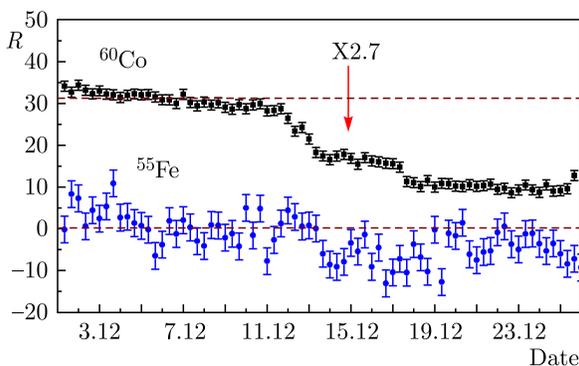


Рис. 3. Скорость счета гамма-квантов от распадов  $^{55}\text{Fe}$  и  $^{60}\text{Co}$  с 1.12.2023 г. по 25.12.2023 г., момент солнечной вспышки обозначен стрелкой

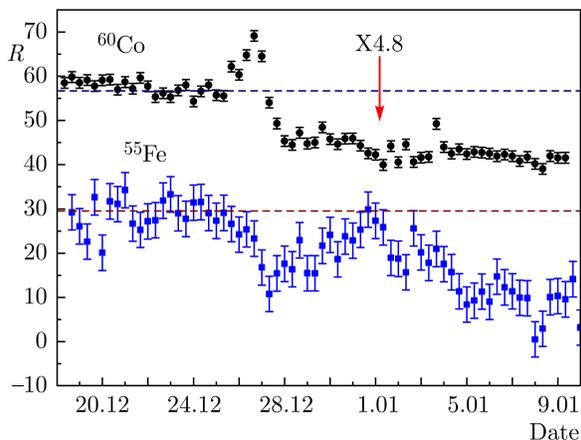


Рис. 4. Скорость счета гамма-квантов от распадов  $^{55}\text{Fe}$  и  $^{60}\text{Co}$  с 19.12.2023 г. по 9.01.2024 г., момент солнечной вспышки обозначен стрелкой

также, что за весь описанный период измерений скорости счета распадов  $^{55}\text{Fe}$  длительностью около 6 лет и  $^{60}\text{Co}$  — около 5 мес. никаких значительных отклонений скорости счета детекторов, некоррелированных с солнечной активностью, не зарегистрировано.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изложенные экспериментальные результаты вместе с опубликованными ранее [12] свидетельствуют о наличии опережающей временной корреляции между статистикой отсчетов слабых распадов и интенсивными солнечными вспышками, при этом механизм такого влияния в настоящее время неизвестен. Как указывалось, солнечные вспышки порождают электромагнитное излучение в широком диапазоне частот; соответственно, такое излучение может оказывать различное воздействие на наземные объекты, включая изменения магнитного поля Земли и возможные скачки напряжения в электрических сетях. Таким образом, можно было бы предположить, что наблюдаемые отклонения скорости счета в распадах  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  могли бы возникнуть из-за реакции наших систем детектирования гамма-квантов не непосредственно на солнечную вспышку, а на вызываемые ею внешние эффекты. Самый убедительный аргумент против такого объяснения полученных данных заключается в том, что почти во всех проанализированных событиях скорость счета распадов начала уменьшаться более чем за 1 сут до того момента, когда вспышка была зарегистрирована аппаратурой, установленной на ИСЗ. Поскольку кажется маловероятным, что какой-либо другой вид электромагнитного излучения от солнечной вспышки может достичь Земли существенно раньше, чем рентгеновские кванты, можно исключить любое

объяснение полученных данных для распадов  $^{55}\text{Fe}$  и  $^{60}\text{Co}$  как следствие влияния обычного электромагнитного излучения Солнца при солнечной вспышке. В частности, наиболее значительное влияние на геомагнитное поле Земли возникает с приходом потока заряженных частиц, излучаемых Солнцем при вспышке, однако этот поток в среднем достигает Земли через 2 сут после регистрации рентгеновских квантов от вспышки приборами ИСЗ [10]. Рассматривая возможное влияние случайно флуктуирующих внешних магнитных полей на наши детекторные системы, надо указать, что их единственным чувствительным элементом являются полупроводниковые детекторы, однако их характеристики не меняются даже в магнитных полях в диапазоне вплоть до нескольких тесла [1].

Между тем измерения, проведенные для слабых распадов некоторых ядер в других экспериментах, не выявили заметных временных корреляций параметров распадов с солнечными вспышками [16–19]. Следует отметить, однако, существенные отличия условий проведения этих экспериментов от использованных нами. Во-первых, значительная часть экспериментов проводилась в подземной лаборатории на глубине около 2 км, в частности это относится к единственному измерению, в котором использовался полупроводниковый детектор [16]. При этом нельзя исключить экранирования данного фактора солнечного влияния таким слоем грунта. В наземных экспериментах использовались только сцинтилляционные детекторы, возможно, эта методика менее чувствительна к изучаемым эффектам. Между тем из-за чрезвычайно важного практического значения прогнозирования солнечных вспышек представляется разумным продолжать подобные исследования для различных изотопов и методик детектирования. Следует напомнить, что в процессе обратного  $\beta$ -распада ядра  $^{55}\text{Fe}$  электрон с L- или K-оболочки захватывается ядром и испускается электронное нейтрино, после чего электрон из верхней оболочки атома занимает свободную вакансию на K- или L-оболочке. В результате вследствие такого перехода могут испускаться гамма-кванты, компенсируя энергию перехода. При распаде  $^{55}\text{Fe}$  испускаются гамма-кванты с энергией 5,9 и 6,5 кэВ с вероятностью 25 и 3,4% соответственно. В итоге полная вероятность распада  $^{55}\text{Fe}$  с испусканием гамма-квантов составляет 28,5%, остальные каналы распада порождают оже-электроны, не регистрируемые стандартными детекторами гамма-излучения. Следовательно, для такого типа распада гипотетическое внешнее влияние можно идентифицировать, даже если оно влияет не на время жизни ядер, а на изменение вероятности мод распада. Необходимо отметить также, что для распада  $^{55}\text{Fe}$  различие энергии между начальным и конечным состояниями ядра как минимум на два порядка меньше, чем для других слабых распадов, использованных для исследования корреляций их параметров с уровнем солнечной активности. Вследствие этого данный распад может быть более чувствителен к некоторым факторам такого солнечного влияния.

В данной работе представлены результаты, с высокой степенью достоверности демонстрирующие наличие корреляции между скоростями распада изотопов  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и солнечной активностью. Возможная природа таких корреляций весьма неясна, предложенные до сих пор модели не выглядят убедительными [3, 8]. Однако нельзя полностью исключить, что некоторые частицы или поля (возможно, неизвестные), генерируемые Солнцем, могут влиять на скорость распада нестабильного ядра. Кроме того, сами по себе механизмы солнечной активности весьма плохо изучены, и изучение их влияния на ядерные распады может принести дополнительную информацию и в этом отношении [13]. Суммарно проведенные измерения скорости распада  $^{55}\text{Fe}$  в течение 2017–2024 гг. охватывают переходный период от стадий перехода Солнца к минимуму солнечного цикла в конце 2019 г. до его максимума, наблюдаемого с 2023 г. При этом для скорости счета распада  $^{55}\text{Fe}$  с середины 2017 г. до конца 2018 г. периодически наблюдались длительные снижения на уровне до 5% [12].

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части государственного задания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020-0032(2019-1569).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Martin B.R.* Nuclear and Particle Physics: An Introduction. New York: John Wiley & Sons, 2011.
2. *Alburger D. et al.* // *Earth Plan. Sci. Lett.* 1986. V. 78. P. 168.
3. *Fischbach E. et al.* // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 145. P. 285.
4. *Ellis K. et al.* // *Phys. Med. Biol.* 1990. V. 35. P. 1079.
5. *Lobashev V.M. et al.* // *Phys. Lett. B.* 1999. V. 460. P. 227.
6. *Alekseev E. et al.* // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47. P. 1803.
7. *Alekseev E. et al.* // *Phys. Part. Nucl.* 2018. V. 49. P. 557.
8. *Mayburov S.* // *Phys. Part. Nucl.* 2020. V. 51. P. 458.
9. *Kossert K., Nahle O.J.* // *Astropart. Phys.* 2014. V. 55. P. 33.
10. *Belotti E. et al.* // *Phys. Lett. B.* 2018. V. 780. P. 61.
11. *Jenkins J.H., Fischbach E.* // *Astropart. Phys.* 2009. V. 31. P. 407.
12. *Bogachev S.A. et al.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1690. P. 012028.
13. *Phillips K.J.H.* Guide to the Sun. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995.
14. *Howard T.* Coronal Mass Ejections. An Introduction. Astrophysics Space Sciences Library. V. 376. New York: Springer, 2011.
15. NOAA Solar Flare Catalogue. <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs>.
16. *Belotti E. et al.* // *Phys. Lett. B.* 2013. V. 720. P. 116.
17. *Belotti E. et al.* // *Astropart. Phys.* 2015. V. 61. P. 215.
18. *Belotti E. et al.* // *Phys. Lett. B.* 2018. V. 780. P. 61.
19. *Agevaare J.R. et al.* // *Astropart. Phys.* 2018. V. 103. P. 62.