

УДК 524.1-52:523.9

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 21–24-м ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ КАТАЛОГОВ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

© 2021 г. Г. А. Базилевская^{1, *}, Е. И. Дайбог², Ю. И. Логачёв², Н. А. Власова², Е. А. Гинзбург³,
В. Н. Ишков^{4, 5}, Л. Л. Лазутин², М. Д. Нгуен², Г. М. Сурова², О. С. Яковчук²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), г. Москва, Россия

²НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

³Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ),
г. Москва, Россия

⁴Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

⁵Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: bazilevskayaga@lebedev.ru

Поступила в редакцию 31.03.2020 г.

После доработки 08.05.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Рассмотрены однородные ряды событий солнечных космических лучей за 4 цикла солнечной активности на фоне ее уменьшения в циклах 23 и 24. Число событий солнечных космических лучей с энергией выше 10 МэВ уменьшилось незначительно, тогда как число наземных возрастаний при сравнении циклов 23 и 24 снизилось в 8 раз. Показано, что при переходе от цикла 23 к циклу 24 средний вклад вспышек в генерацию наземных возрастаний уменьшился в 3 раза, а средний вклад корональных выбросов вещества — в 5 раз; средний вклад вспышек в генерацию солнечных космических лучей с энергией >10 МэВ уменьшился в 1.3 раза, а средний вклад корональных выбросов вещества — возрос в 1.4 раза.

DOI: 10.31857/S0016794021010028

1. ВВЕДЕНИЕ

Частицы высокой энергии, которые появляются в межпланетном пространстве в результате взрывных энерговыделений на Солнце, в русскоязычной литературе принято называть солнечными космическими лучами (СКЛ). В мировой литературе явление СКЛ часто называется событиями в солнечных энергичных частицах (Solar Energetic Particles, SEP). Данная статья не обсуждает элементный состав СКЛ, поэтому мы употребляем термин солнечные протонные события (СПС), так как СКЛ на более чем 90% состоят из протонов. Подробнее принятая терминология освещена в работе [Мирошниченко, 2018]. В 1940–1950-х годах события СКЛ могли регистрироваться только наземными установками, в основном с помощью ионизационных камер, т.е. их энергия превышала несколько ГэВ. Они являются достаточно редкими событиями и получили название наземных возрастаний (Ground Level Enhancements, GLE). Развитие сети нейтронных мониторов [Simpson, 1957] не сильно увеличило число

наблюдаемых GLE: до настоящего времени их зарегистрировано всего 72. Измерения на аэростатах [Чарахчян, 1964] удвоили количество наблюдавшихся событий СКЛ, а наблюдения в межпланетном пространстве в 1970-х годах увеличили его на порядок, что связано с уменьшением энергетического порога регистрации частиц. Энергии СКЛ охватывают более 4 порядков величины, а интенсивности — более 8 порядков, поэтому события СКЛ не могут быть зарегистрированы одним инструментом.

Свойства СКЛ настолько многообразны, а связанные с ними проблемы настолько многочисленны, что их изучение в течение более 70 лет после их открытия [Forbush, 1946] приносит не только новую информацию, но поднимает все новые вопросы, касающиеся их происхождения и связи с другими проявлениями солнечной активности. Число публикаций на эту тему не убывает. Ограничиваясь лишь недавними публикациями, можно упомянуть книгу [Malandraki and Crosby, eds., 2018], а также статьи, затрагивающие вопрос

о вкладе вспышек (процессов во вспышечной области, характеризующихся классом рентгеновской вспышки) и корональных выбросов вещества (КВВ) в генерацию СКЛ (например, [Lario et al., 2017; Cliver et al., 2019; Kocharov et al., 2020; Черток, 2018; Струминский и др., 2020]). Не решенным остается вопрос о связи СКЛ с солнечными нейтронами и высокоэнергичным гамма-излучением, генерируемом на Солнце во время мощных энерговыделений [de Nolfo et al., 2019; Muraki et al., 2020]. Изучение СКЛ требует знания изменчивых условий на Солнце и в межпланетной среде, в которых происходит ускорение и распространение частиц. Многочисленность событий и многообразие характеристик СКЛ и условий, в которых происходит ускорение и распространение частиц, сделали неизбежным появление каталогов СКЛ, первый из которых обобщил информацию об СКЛ 1955–1969 гг. [Svestka and Simon, eds., 1975].

В настоящее время существует несколько каталогов СКЛ и статей, содержащих большие списки событий СКЛ с их характеристиками [Kurt et al., 2004; Vainio et al., 2013; Lario and Karelitz, 2014; Papaioannou et al., 2014, 2016; Miteva and Samwell, 2018; Paasilta et al., 2018], а также некоторые электронные базы данных [URL nasa sepe; URL gle.oulu].

С начала 1980-х годов неформальная группа экспертов по физике Солнца, физике частиц и геофизике собирает данные о наблюдениях солнечных частиц и сопутствующих явлений и пытается сформировать однородные ряды данных — Каталоги солнечных протонных событий (СПС), которые являются продолжением Каталога [Svestka and Simon, eds., 1975]. Группа работает под руководством проф. Ю.И. Логачёва из МГУ им. М.В. Ломоносова. Каталог компилирует данные о событиях СКЛ с потоком протонов с энергией $E \geq 10$ МэВ в максимуме временного профиля события $J10 \geq \geq 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ (1 pfu). Далее мы называем этот ряд серией *J10*. Аналогичный ряд для протонов с энергией $E \geq 100$ МэВ мы называем серией *J100*. Все доступные данные с различных космических аппаратов, аэростатов и нейтронных мониторов были включены в выпуски Каталога [Логачёв, ред., 1982, 1986, 1990а, б, 1998; Логачёв и др., 2016].

Каталоги, охватывающие данные с 1970 по 1996 гг., содержат табличные данные о потоках протонов разных энергий в максимуме временного профиля события, сведения о возможных источниках частиц с указанием вероятности их вклада, таблицы сопутствующих электромагнитных излучений, а также, схематически, временные профили события, график энергетического спектра частиц в максимуме временного профиля с оценкой показателя спектра в степенном представлении. Для событий СКЛ с 1970 по 1986 гг.,

помимо вышеуказанного, представлены синоптические карты Солнца: активной области и схемы соответствующей группы пятен, где произошли родительские вспышки. Кроме того, показана динамика долготы соединения вспышки и наблюдателя. В каталоге событий СКЛ солнечного цикла 23 и в готовящемся к публикации каталоге цикла 24 добавлена новая информация. Существенно расширен ряд инструментов, наблюдающих СКЛ, представлены графики их временных профилей и временных рядов сопутствующего мягкого рентгеновского излучения, скорости солнечного ветра, индукции межпланетного магнитного поля и *Dst*-индекса [URL omni]. Все каталоги снабжены подробными описаниями и объяснениями. В данной работе, основываясь на информации, представленной в этой серии каталогов, мы сравниваем ряды событий СКЛ малых энергий (серия *J10*) и наземных возрастаний (GLE) в течение солнечных циклов 21–24 и сопоставляем их с предполагаемыми источниками СКЛ.

2. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СКЛ В ЦИКЛАХ 21–24

Единый подход к сбору данных позволяет нам сравнивать активность Солнца в генерации солнечных протонов в последних солнечных циклах. Каталоги под редакцией Ю.И. Логачёва начинаются с января 1970 г., т.е. с середины 20-го солнечного цикла. Поэтому мы взяли для сравнения три полных солнечных цикла 21–23 и последний цикл 24, в котором последние события СКЛ были зарегистрированы в 2017 г. В этой работе мы рассматриваем изменения в генерации солнечных протонов во время последних солнечных циклов, сопровождающихся ослаблением солнечной активности. В частности, мы сосредоточимся на общем количестве событий СКЛ с протонами $E \geq \geq 10$ МэВ (серия *J10*) и числе самых мощных событий, GLE, зарегистрированных наземными нейтронными мониторами. Рисунок 1 демонстрирует временной ход годовых значений числа событий СКЛ для протонов с энергией $E \geq 10$ МэВ, $E \geq 100$ МэВ и GLE, а также числа солнечных пятен в 1970–2018 гг. Ряд событий с $E \geq 100$ МэВ (серия *J100*) до 1987 г. нельзя считать однородным, так как измерения не были постоянными.

Подход, реализованный здесь, представляет собой анализ накопленного числа различных рассматриваемых параметров для каждого солнечного цикла: данные за каждый месяц солнечного цикла суммируются с начала цикла. Рисунок 2 демонстрирует накопленные значения числа солнечных пятен *Rz* и числа событий СКЛ как функцию порядкового номера месяца в солнечном цикле. Также показан временной ход *Rz* (серая кривая) для сравнения с накопительным методом. Накопленные величины удобны для изуче-

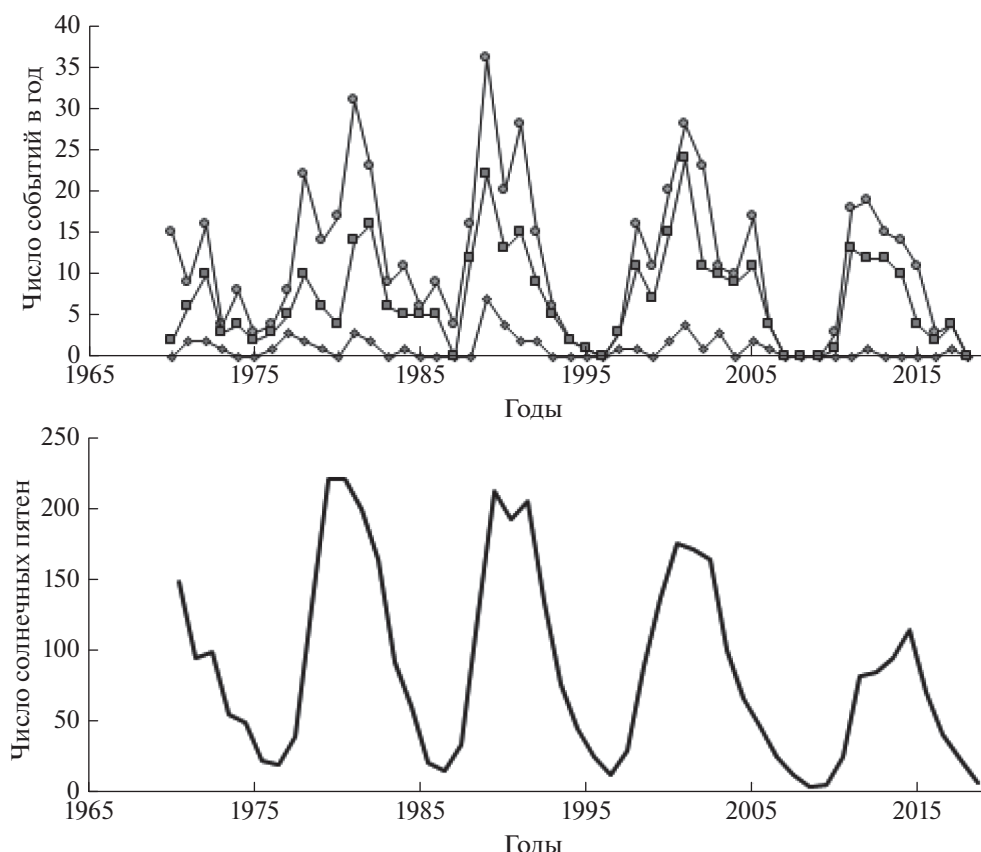


Рис. 1. Верхняя панель — годовые значения числа событий СКЛ: с энергией $E \geq 10$ МэВ — кружки, ≥ 100 МэВ — квадраты, GLE — ромбы. Нижняя панель — число солнечных пятен (URL R_z).

ния суммарных значений параметров солнечной активности, длительности циклов солнечных пятен и активных периодов, во время которых генерировались СКЛ. Число солнечных пятен постоянно уменьшалось от 21-го к 24-му циклу, а продолжительность солнечных циклов упала в цикле 22 (9.58 лет), по сравнению с циклом 21 (10.25 лет), резко выросла в переходном между эпохами солнечной активности цикле 23 (самый длинный по времени среди достоверных циклов — 12.7 лет). Текущий цикл 24, на момент написания статьи, еще продолжается, но его длительность на апрель 2020 г. (11.3 года), вряд ли превысит длительность цикла 23 (12.3 года).

Число событий СКЛ в цикле 24 было наименьшим среди циклов 21–24. Отметим, что этот параметр не повторяет поведение числа солнечных пятен. Максимальное число и наибольшая продолжительность $J10$ были в цикле 21, а GLE — в цикле 23, который для $J10$ был вторым по накопленному числу событий и продолжительности генерации СКЛ. Накопленное число событий $J10$ уменьшалось с 21-го до 24-го цикла слабее, чем число солнечных пятен R_z . В то же время число событий GLE практически не уменьшалось в

течение циклов 21–23 и скачком уменьшилось в цикле 24. Этот вывод не изменится, если прибавить к числу GLE (всего два за цикл) три близких к ним события sub-GLE [Mishev et al., 2017]. Продолжительность временного интервала, в котором наблюдались GLE, в цикле 24 была 65 месяцев, что больше, чем в цикле 22 (41 месяцев) и меньше, чем в циклах 23 (110 месяцев) и 21 (95 месяцев).

Учитывая ослабление солнечной активности, интересно взглянуть на относительные значения параметров СКЛ, т.е. отношение накопленного числа событий СКЛ к накопленным значениям R_z . В противоположность абсолютным значениям, относительное число событий $J10$ увеличилось на 20% от циклов 21–22 до цикла 24. В то же время относительное число событий GLE снизилось с 5–7% в циклах 21–22 до менее чем 1.5% в цикле 24. В циклах 21–23 общее количество событий $J10$ было в ~9–12 раз больше, чем событий GLE. В цикле 24 это соотношение составляло ~55.

Средняя частота событий СКЛ в месяц может быть определена как отношение их накопленного числа к продолжительности цикла R_z или к продолжительности периода генерации СКЛ в цикле.

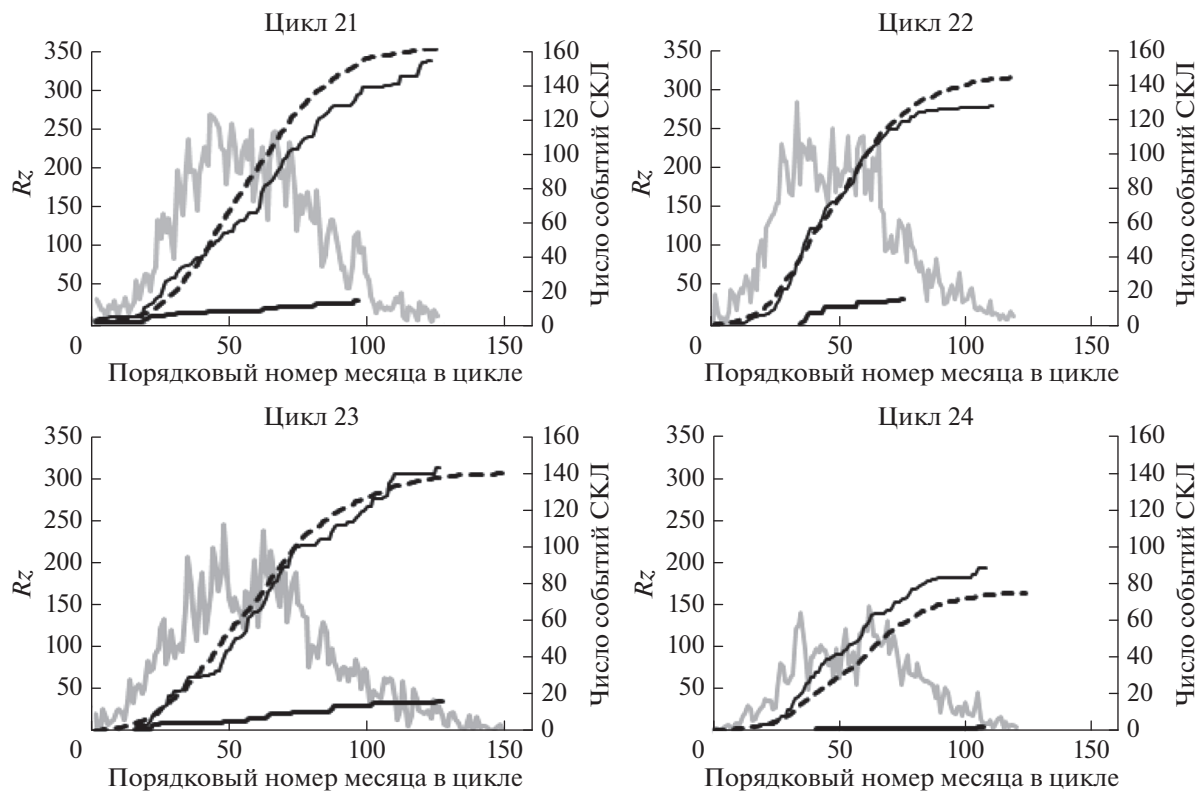


Рис. 2. Временной ход числа солнечных пятен, R_z (серая линия) и накопленные значения R_z (штриховая линия), числа событий СКЛ серии $J10$ (тонкая линия) и числа событий GLE (нижняя толстая линия).

В первом случае частота $J10$ медленно уменьшалась от цикла 21 до цикла 24, в то время как частота GLE была постоянной в циклах 21–23 и сильно уменьшилась в цикле 24. Во втором случае частота $J10$ оставалась постоянной в циклах 21–23 и слегка уменьшилась в цикле 24; частота GLE была максимальной в цикле 22 и резко упала в цикле 24.

3. ИСТОЧНИКИ СОБЫТИЙ СКЛ В 21-м–24-м ЦИКЛАХ

Самым впечатляющим явлением в 24-м цикле является резкое падение частоты событий GLE, что естественно влечет за собой необходимость исследования источников GLE, а именно, рентгеновских вспышек и корональных выбросов вещества (КВВ) (например, [Klein and Dalla, 2017]). Во внимание были приняты только достоверные источники согласно работам [Логачёв, ред., 1982, 1986, 1990а, б, 1998], Логачёв и др. [2016]. Связь между событиями GLE и рентгеновскими вспышками была рассмотрена для 1971–2017 гг. [URL вспышки]. Всего за этот период было 52 GLE, в 49 из них вспышка была надежным источником СКЛ. Два события (28 мая 1990 г. и 18 апреля 2001 г.) с залимбовыми источниками были исключены из рассмотрения. Около 81% GLE произошли от рентгеновских вспышек класса X,

15% — от вспышек класса M. Число вспышек класса X относительно класса M в циклах 21–24 было практически постоянным — 7.8%, 7.6%, 8.7% и 6.8% соответственно. Рисунок 3 демонстрирует аккумулярованное число рентгеновских всплесков класса X и аккумулярованное число GLE для циклов 21–24. В циклах 21 и 22 обе серии идентичны. Однако в 23-м цикле количество GLE увеличивалось быстрее, чем число вспышек класса X, в то время как в цикле 24 ситуация была противоположной. Количество вспышек X-класса, приходящихся на одно событие GLE в циклах 23 и 24, было ~8 и 24 соответственно.

Дополнительным источником релятивистских СКЛ являются КВВ [см. каталог Логачёва и др., 2016], информация о которых доступна для циклов 23 и 24 [URL CME]. В этот период было 18 GLE, информация о КВВ для 17 из них доступна. Более 94% КВВ, связанных с GLE, имели скорость $V > 1000$ км/с, более 76% — $V > 1500$ км/с. Более 82% КВВ, связанных с GLE, были типа гало. Мы изучили накопленное количество КВВ типа гало со скоростью более 1000 км/с и сравнили их с числами GLE (см. рис. 4). Числа КВВ типа гало с $V \geq 1000$ км/с на одно GLE в циклах 23 и 24 было 11 и 55 соответственно. По сравнению с аналогичными значениями для вспышек класса X

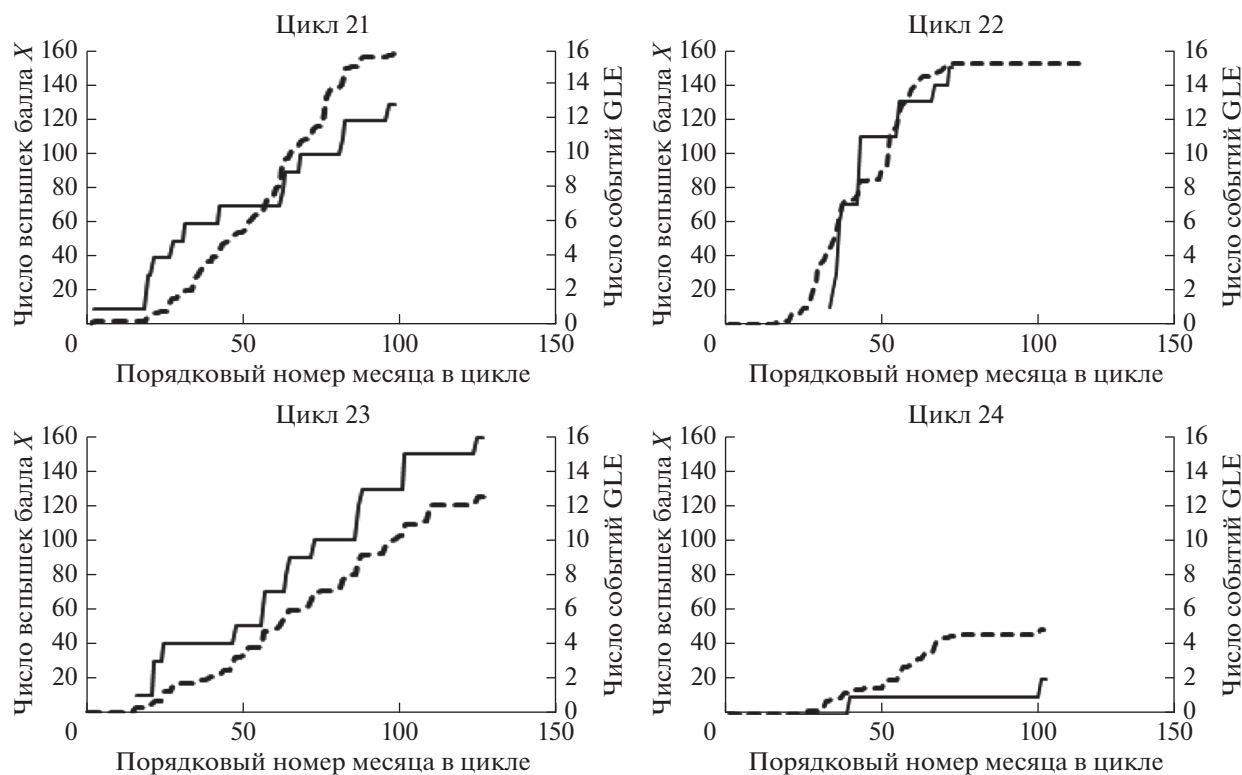


Рис. 3. Накопленное число вспышек класса X (штриховая линия) и накопленные значения числа событий GLE (сплошная линия).

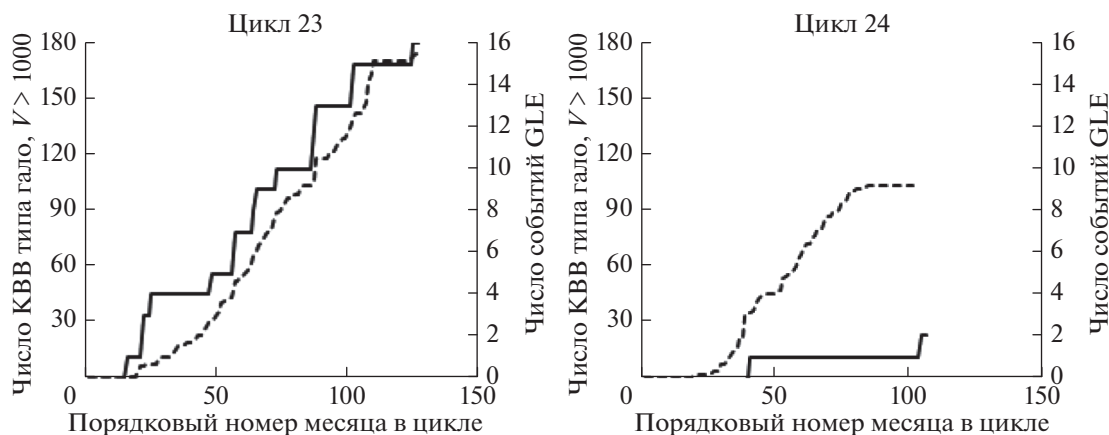


Рис. 4. Накопленное число КВВ (штриховая линия) и накопленные значения числа событий GLE (сплошная линия).

можно заключить, что при переходе от цикла 23 к циклу 24 средний вклад вспышек в генерацию GLE уменьшился в 3 раза, а средний вклад КВВ уменьшился в 5 раз.

При рассмотрении источников событий СКЛ $J10$, события GLE были исключены из анализа. В циклах 23 и 24 более 95% вспышек, связанных с $J10$, относятся к классу $>M$, различия между циклами 23 и 24 довольно малы. Более 95% событий

$J10$, ассоциированных с КВВ, имели скорость V выше 500 км/с, и более 70% КВВ были типа гало. Рисунок 5 показывает сравнение между накопленным числом событий СКЛ $J10$ и накопленной суммой вспышек классов M и X (верхние панели), а также между числами событий $J10$ и КВВ типа гало со скоростью $V > 500$ км/с (нижние панели). С 23-го по 24-й циклы количество мощных солнечных вспышек уменьшилось сильнее, чем ко-

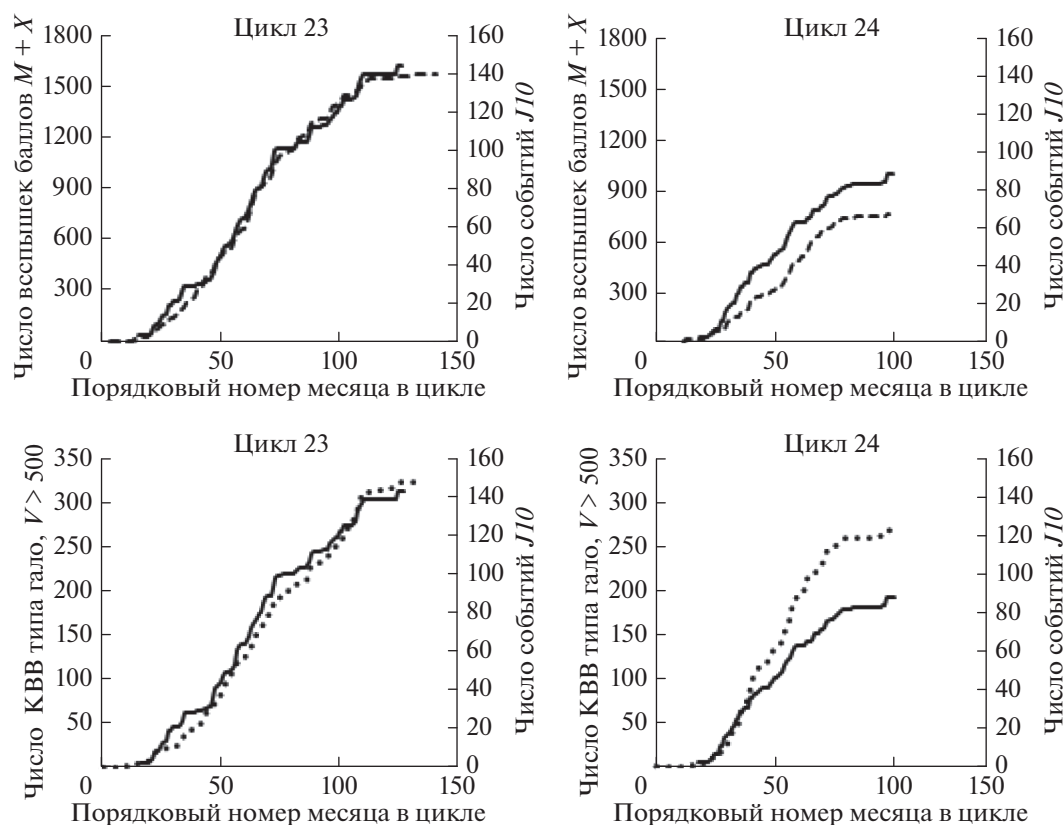


Рис. 5. Верхние панели: накопленное число вспышек классов $M + X$ (штриховая линия) и накопленные значения числа событий $J10$ (сплошная линия). Нижние панели: накопленное число КВВ типа гало и скоростью $V > 500$ км/с (точки) и накопленные значения числа событий $J10$ (сплошная линия).

личество событий СКЛ $J10$. Наоборот, количество КВВ уменьшились слабее, чем число событий СКЛ $J10$. Количество вспышек классов $M + X$ на одно событие $J10$ было 10.9 в цикле 23 и 8.5 в цикле 24. Аналогичные значения для КВВ типа гало с $V > 500$ км/с были 2.3 и 3.0. Это означает, что при переходе от цикла 23 к циклу 24 средний вклад вспышек в генерацию СКЛ $J10$ уменьшился в 1.3 раза, а средний вклад КВВ — возрос в 1.4 раза.

Отсюда можно заключить, что роль КВВ существенно выше для частиц СКЛ малых энергий. Этот результат согласуется с выводом [Dierckxens et al., 2015].

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно классификации, предложенной в работе [Ишков, 2018], солнечные циклы 21–22 относятся к эпохе повышенной солнечной активности, цикл 23 — к переходному периоду между эпохами повышенной и пониженной солнечной активности, а цикл 24 открывает эпоху пониженной солнечной активности. Мы пытались уловить общие тенденции в ослаблении солнечной активности в тех ее проявлениях, которые влияют

на генерацию СКЛ. Наш анализ показывает, что наибольшие изменения произошли между циклами 23 и 24. В таблице показаны основные параметры и их отношения R для циклов 23 и 24, рассмотренные в этой работе.

Статистические ошибки приведенных отношений довольно велики, особенно для событий GLE, но это не отменяет того факта, что падение числа GLE в цикле 24 было экстраординарным. Из таблицы следует, что более энергичные явления (GLE, вспышки класса X , КВВ с $V > 1000$ км/с) сильнее деградируют с уменьшением солнечной активности. Кроме того, R для серии $J10$ ближе к значениям для КВВ, что подтверждает большую роль КВВ в генерации СКЛ малых энергий. Драматическое уменьшение числа GLE лучше всего коррелирует с изменением числа наиболее мощных вспышек класса X , и это свидетельствует о большей роли вспышек в генерации GLE. Таким образом, наш анализ показывает, что при увеличении энергии частиц роль вспышек в генерации СКЛ возрастает, тогда как, в подтверждение результатов [Dierckxens et al., 2015], для СКЛ малых энергий существенным является вклад КВВ.

Таблица 1. Сравнение накопленных величин параметров циклов 23 и 24. Отношение числа событий в цикле 23 к числу событий в цикле 24, R

	R_z	Вспышки M	Вспышки X	КВВ $V > 500$ км/с	КВВ $V > 1000$ км/с	События СКЛ $J10$	События СКЛ GLE
Цикл 23	12209	1440	125	324	175	143	16
Цикл 24	6496	701	48	267	110	88	2
R	1.9 ± 0.03	2.1 ± 0.1	2.6 ± 0.4	1.2 ± 0.1	1.6 ± 0.2	1.6 ± 0.2	8.0 ± 6.0

Следует отметить, что результаты работы носят статистический характер и не касаются сложных физических процессов и условий ускорения и распространения СКЛ.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим всех исследователей, представляющих через Интернет свои данные о солнечной активности и параметрах межпланетной среды: R_z — (<http://www.sidc.be/silso/datafiles>); вспышки — (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>); КВВ — (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Ссылки на многочисленные источники СКЛ приведены в публикации [Логачёв и др., 2016]. Г.А. Базилевская благодарна за обсуждения в рамках проекта ISSI HEROIC “Анализ событий СКЛ высокой энергии” под руководством доктора А. Папаиоанну.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 19-02-00264.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ишков В.Н. Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 50. № 8. С. 785–800. 2018.
- Логачёв Ю.И., ред. Каталог солнечных протонных событий. 1970–1979 гг. М.: ИЗМИРАН, 184 с. 1982. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>
- Логачёв Ю.И., ред. Каталог энергетических спектров солнечных протонных событий 1970–1979 гг. М.: ИЗМИРАН, 236 с. 1986. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>
- Логачёв Ю.И., ред. Солнечные протонные события. Каталог, 1980–1986 гг. /Данные наблюдений частиц и электромагнитных излучений. М.: МГКАН СССР, 160 с. 1990а. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>
- Логачёв Ю.И., ред. Солнечные протонные события. Каталог, 1980–1986 гг. Временные профили интенсивности и энергетические спектры протонов, синоптические карты и схемы групп пятен. М.: МГКАН СССР, 204 с. 1990б. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>

- Логачёв Ю.И., ред. Каталог солнечных протонных событий. 1987–1997 гг. М.: МГУ, 246 с. 1998. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>
- Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др., Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.). М., 2016. http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/katalog_SPS_23_cikla_SA.pdf
- Мирошниченко Л.И. Солнечные космические лучи: 75 лет исследований // УФН. Т. 188. № 4. С. 345–376. 2018.
- Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачёв Ю.И., Садовский А.М. Солнечные электроны и протоны в событиях 4–10 сентября 2017 года и сопутствующие явления // Физика плазмы. Т. 46. № 2. С. 139–153. 2020.
- Чарахчян А.Н. Исследование флуктуаций интенсивности космических лучей в стратосфере, вызываемых процессами на Солнце // УФН. Т. 83. № 1. С. 35–62. 1964.
- Черток И.М. Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радио-всплескам // Геомагнетизм и аэронавигация Т. 58. № 4. С. 471–478. 2018.
- Cliver E.W., Kahler S.W., Kazachenko M., Shimojo M. The disappearing solar filament of 2013 September 29 and its large associated proton event: Implications for particle acceleration at the Sun // Astrophys. J. V. 877: 11. 17 p. 2019. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0e032019>
- de Nolfo G.A., Bruno A., Ryan J.M. et al. Comparing long-duration gamma-ray flares and high-energy solar energetic particles // Astrophys. J. V. 879:90. 17 p. 2019. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab258f>
- Dierckx M., Tziotziou K., Dalla S. et al. Relationship between solar energetic particles and properties of flares and CMEs: statistical analysis of solar cycle 23 events // Solar Phys. V. 290. P. 841–874. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11207-014-0641-4>
- Forbush S.E. Three unusual cosmic-ray increases possibly due to charged particles from the Sun. Phys. Rev. V. 70. P. 771–772. 1946. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.70.771>
- Klein K.-L., Dalla S. Acceleration and propagation of solar energetic particles // Space Sci. Rev. V. 212. P. 1107–1136. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0382-4>
- Kocharov L., Pesce-Rollins M., Laitinen T. et al. Interplanetary protons versus interacting protons in the 2017 10 solar eruptive event // Astrophys. J. V. 890:13. 13 p. 2020. doi.org/10.3847/1538-4357/ab684e
- Kurt V., Belov A., Mavromichalaki H., Gerontidou M. Statistical analysis of solar proton events // Ann. Geophysicae. V. 22. P. 2255–2271. 2004.

- *Lario D., Karelitz A.* Influence of interplanetary coronal mass ejections on the peak intensity of solar energetic particle events // *J. Geophys. Res.–Space*. V. 119. P. 4185–4209. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2014JA019771>
- *Lario D., Kwon R.-Y., Richardson I.G., Raouafi N.E. et al.* The solar energetic particle event of 2010 August 14: Connectivity with the solar source inferred from multiple spacecraft observations and modeling // *Astrophys. J.* V. 838:51. 24 p. 2017. doi.org/10.3847/1538-4357/aa63e4
- *Malandraki O., Crosby N.B., eds.* Solar particle radiation storms forecasting and analysis The HESPERIA HORIZON 2020 Project and Beyond. Springer. 203 p. 2018.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-60051-2>
- *Mishev A., Poluianov S., Usoskin I.* Assessment of spectral and angular characteristics of sub-GLE events using the global neutron monitor network // *J. Space Weather Spac.* V. 7. A28. 17 p. 2017.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2017026>
- *Miteva R., Samwel S.W.* Radio and space-based observations. The Wind/EPACT Proton Event Catalog (1996–2016) // *Solar Phys.* V. 293:27. 24 p. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11207-018-1241-5>
- *Muraki Y., Valdes-Galicia J.F., Gonz'alez L.X. et al.* Possible detection of solar gamma-rays by ground-level detectors in solar flares on 2011 March 7 // *Publ. Astron. Soc. Jpn.* V. 72. P. 1–17. 2020.
<https://doi.org/10.1093/pasj/psz141>
- *Paassilta M., Papaioannou A., Dresing N., et al.* Catalogue of >55 MeV wide-longitude Solar Proton Events observed by SOHO, ACE, and the STEREOs at ≈ 1 AU during 2009–2016 // *Solar Phys.* V. 293:70. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11207-018-1284-7>
- *Papaioannou A., Sandberg I., Anastasiadis A. et al.* Solar flares, coronal mass ejections and solar energetic particle event characteristics // *J. Space Weather Spac.* V. 6. A42. 2016.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2016035>
- *Papaioannou A., Malandraki O. E., Dresing N. et al.* SEP-Server catalogues of solar energetic particle events at 1 AU based on STEREO recordings: 2007–2012 // *Astron. Astrophys.* V. 569. A96. 17 p. 2014.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201323336>
- *Simpson J.A.* Cosmic-radiation neutron intensity monitor // *Annals of the IGY*. V. 4. P. 351–373. 1957.
- *Svestka Z., Simon P., eds.* Catalog of Solar Particle Events 1955–1969. Ed. Reidel, 430 p. 1975.
- URL gle.oulu: <http://gle.oulu.fi>
- URL flares: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>
- URL CME: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/
- URL nasa sepe: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/sepe/
- URL omni: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>
- URL Rz: <http://www.sidc.be/silso/datafiles>
- *Vainio R., Valtonen E., Heber B. et al.* The first SEP-Server event catalogue ~68-MeV solar proton events observed at 1 AU in 1996–2010 // *J. Space Weather Spac.* V. 3. A12. 17 p. 2013.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2013030>