

СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ И ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В ОКП В 20-24 ЦИКЛАХ

М.Н. Назарова, И.Е. Петренко

Приводятся суммарные за год флюенсы протонов СКЛ с $E_p > 10, 30, 60$ МэВ, полученные по наблюдениям на ИСЗ в околоземном космическом пространстве за период 1964-2012 гг. (20-24 циклы солнечной активности). Проведен анализ радиационных характеристик СПС и вариаций среднегодовых значений потоков протонов ГКЛ в эпохи минимумов 20-23 циклов. По данным о динамике числа протонных событий и флюенсов протонов в 20-24 циклах и сравнении радиационных параметров с изменением числа солнечных пятен делается предположение о некотором снижении протонной активности в 24 цикле.

Ключевые слова: солнечные космические лучи (СКЛ), галактические космические лучи (ГКЛ), солнечные протонные события (СПС), флюенсы протонов, солнечные пятна (СП).

ВВЕДЕНИЕ

Данные о радиационных параметрах солнечных протонных событий (СПС) и интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) представляют практический интерес для оценки возмущенности радиационной обстановки (РО) в околоземном космическом пространстве (ОКП). В работе использованы результаты измерений характеристик СПС аппаратурой, установленной на ИСЗ серий МЕТЕОР (1969-1998, 2002, 2003 гг.), IMP (1964-1988 гг.), GOES (1998-2012 гг.). Изменения протонной активности Солнца в период 20-24 циклов солнечной активности и особенности радиационных параметров в эпохи минимумов солнечной активности характеризуют особенности РО в ОКП.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

За период с 1964 г. по 2012 г. в ОКП наблюдалось 586 СПС с пороговой энергией протонов $E_p > 10$ МэВ и потоком протонов в максимуме $J_m > 1$ см⁻²с⁻¹ср⁻¹. Данные представлены в каталогах [1-4] и каталоге (1997-2012 гг.), составленном в Институте прикладной геофизики. Для этих событий рассчитаны флюенсы протонов СКЛ с $E_p > 10, 30, 60$ МэВ – F см⁻² путем численного интегрирования по времени потока протонов за все событие. В случае отсутствия данных о временном распределении потока протонов в событии, но зарегистрированном максимуме СПС, флюенс определялся

по соотношению F и J_m , установленному в работе [5].

Для каждого события проведена оценка возмущенности радиационной обстановки в ОКП. Уровень возмущенности определялся по критериям, принятым в Оперативной службе прогнозов Института прикладной геофизики [6]: слабое возмущение – доза $> 12,5 \cdot 10^2$ мРад/сут., умеренное – $> 10^2 \cdot 10^3$ мРад/сут., сильное – доза $> 10^3$ мРад/сут.

Интенсивность ГКЛ определялась в высокоширотных зонах магнитосферы Земли (широты $\phi > 65^\circ$) по данным ИСЗ «МЕТЕОР».

Число солнечных пятен и их прогноз публикуются в [7].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 1 представлены просуммированные за каждый год флюенсы СПС – F см⁻² с $E_p > 10, 30, 60$ МэВ; число СПС – n с $E_p > 10$ МэВ и $J_m > 1$ см⁻²с⁻¹ср⁻¹; число СПС с возмущенной РО – m ; среднегодовые значения интенсивности ГКЛ с $E_p > 65$ МэВ (1969, 1970 гг.) и с $E_p > 90$ МэВ (1971-1999 гг., 2002-2005 гг.). Приведена величина среднеквадратичного отклонения для каждого значения.

Для сравнения радиационных параметров с активностью Солнца приведены среднегодовые значения относительного числа солнечных пятен – R .

Таблица 1. Максимальные значения флюенсов протонов в 20-23 циклах солнечной активности

№ цикла	Год макс. флюенса	R	n	m	Флюенс протонов ΣF , см ⁻²		
					>10 МэВ	>30 МэВ	>60 МэВ
20	1972	68,9	17	3	$9,1 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^9$
21	1982	116	23	10	$8,9 \cdot 10^9$	$3,5 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^7$
22	1989	158	36	15	$1,6 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^9$
	1991	146	28	10	$6,0 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$3,8 \cdot 10^8$
23	2000	120	21	5	$1,4 \cdot 10^{10}$	$4,8 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^9$

Таблица 2. Радиационные характеристики СПС в годы минимумов солнечных циклов

№ цикла	Год минимума	Число пятен - R_z	n	m	Флюенс протонов $-\Sigma F$, см ⁻²		
					>10 МэВ	>30 МэВ	>60 МэВ
19	1964	10,2	1	-	$2,3 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
20	1976	12,6	4	1	$1,5 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^7$
21	1986	13,4	9	3	$1,1 \cdot 10^9$	$7,0 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^6$
22	1996	8,6	-	-	-	-	-
23	2009	2,2	-	-	-	-	-

За период наблюдения солнечных протонных событий, охватывающий 1964-2012 г.г. наиболее высокие значения флюенса протонов, как видно из рисунка 1 для энергий >10 и >30, 60 МэВ отмечены в 1972 г.(20 цикл) и в 1989, 1991 г.г. (22 цикл), для протонов с энергиями >60 МэВ еще и в 2000 г. (23 цикл). В этот же период в ~ 30% СПС (172 из 586) наблюдалась возмущенная РО. Наибольшее число СПС с возмущенной РО отмечено в 1989 г. В таблице 1 приведены соответствующие значения флюенсов протонов СКЛ.

Т. о. видно, что в 20 и 21 циклах солнечной активности (с.а.) максимальные значения флюенсов протонов приходятся на эпохи спада с.а., а в 22 и 23 циклах – на эпохи максимумов с.а. Больше число СПС и больше число периодов возмущенной РО наблюдалось в 22 цикле (1989 год).

По изменению солнечной активности (данные о солнечных пятнах СП-параметр R) выделены эпохи минимумов для 19-23 циклов и проведен анализ радиационных характеристик СПС в эти периоды. Основные радиационные характеристики СПС для эпох минимумов солнечной активности приведены в таблице 2.

Из рисунка 1 и таблицы 2 видно, что в годы минимумов солнечной активности 19-21 циклов наблюдаются СПС со значительными потоками протонов СКЛ, вплоть до энергий $E_p > 60$ МэВ. В минимуме 21 цикла в 3-х из 9-и СПС зарегистрированы возмущения РО: 6.02 и

7.02.1986 г. – умеренные, 14.02.1986 г. – слабое. В эпоху минимума 22 цикла с ноября 1995 г. по октябрь 1997 г. СПС в ОКП не наблюдались. В 23 цикле первое событие с $J_m > 1$ см⁻²с⁻¹сп⁻¹ ($E_p > 10$ МэВ) зарегистрировано только 4.11.1997 г. Минимум 23 цикла и по R, и по протонной активности Солнца более глубокий и продолжительный (2007-2009 годы). Последнее событие 23 цикла наблюдалось 14.12.2006 г.; первое СПС 24 цикла зарегистрировано 3.08.2010 г.

По данным о флюенсах протонных событий за 2010 -2013 годы 24 цикла можно сделать предварительное заключение, что текущий цикл по интенсивности, вероятно, будет относиться к средним циклам [8].

Если предположить, что число солнечных протонных событий примерно пропорционально числу солнечных пятен, то используя прогноз солнечных пятен на 2013-2019 г.г. [7] можно рассчитать число СПС ($E_p > 10$ МэВ, $J_m > 1$ см⁻²с⁻¹сп⁻¹) на этот период по коэффициенту, полученному из сопоставления имеющихся одномоментных данных о СП и СПС. На рис.2 представлено число СПС за год с 2000 г. по 2012 г. – данные эксперимента и с 2013 по 2019 г. – прогнозируемые значения СПС. Видно, что по данному прогнозу 24 цикл предполагается ниже предыдущего 23 цикла и сделанное выше заключение о том, что текущий цикл не превысит предыдущий – справедливо.

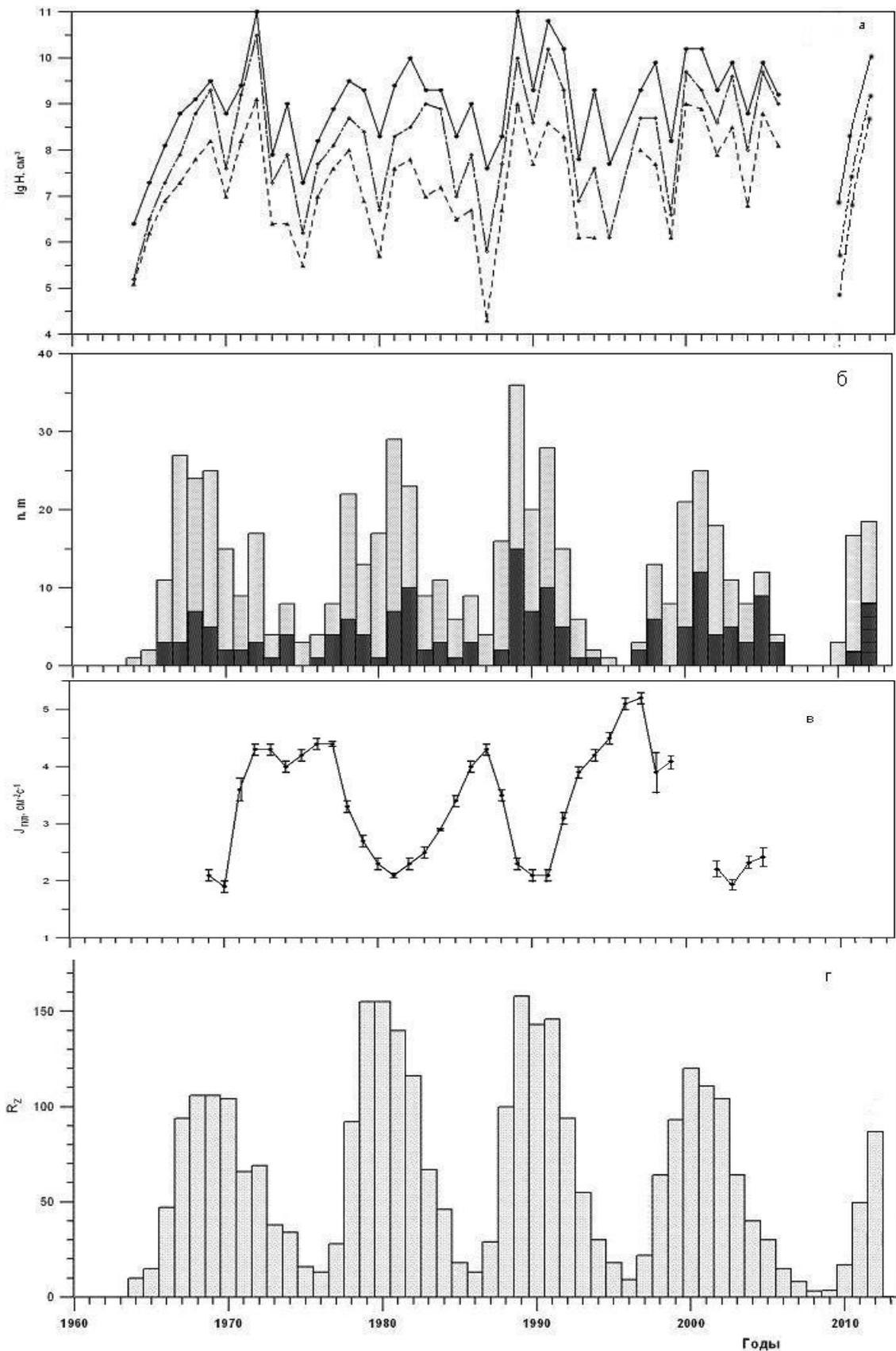


Рис.1. Вариации радиационных параметров СПС, интенсивности ГКЛ и солнечной активности в 20-24 циклах суммарные за год: а – флюенсы протонов СКЛ с $E_p > 10$ МэВ (светлые кружки), $E_p > 30$ МэВ (темные кружки), $E_p > 60$ МэВ (крестики); б – число СПС, затемненные столбики – с возмущением РО; в – среднегодовая интенсивность ГКЛ; г – среднегодовые числа СП.

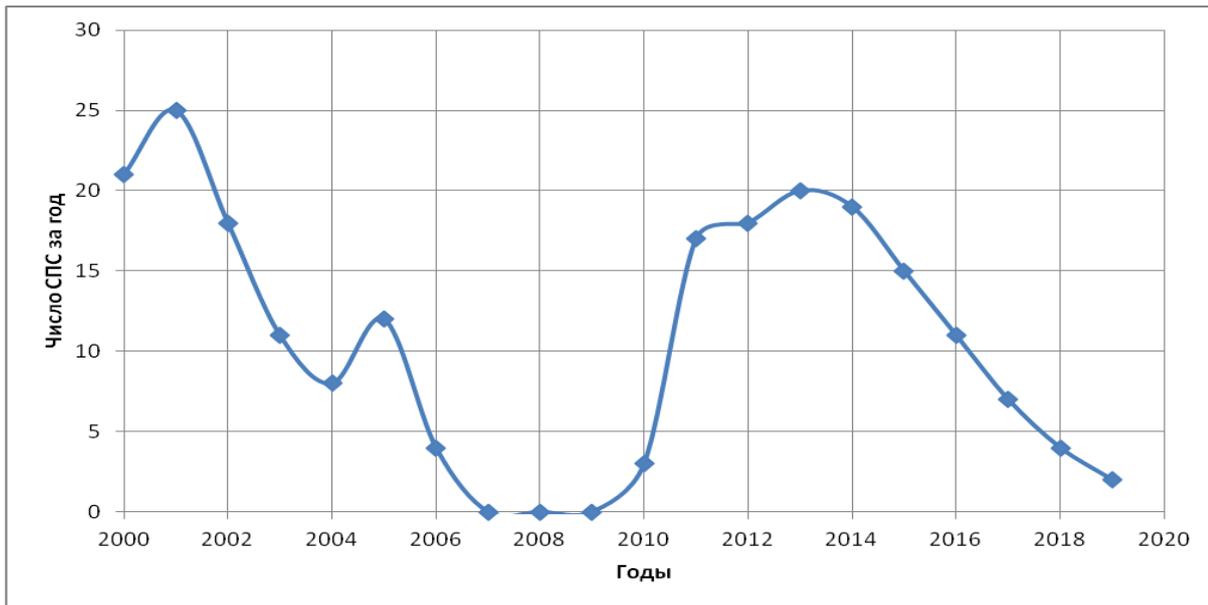


Рис.2. Зависимость числа СПС от времени: 2000-2012 годы – данные измерений на спутниках, 2013-2019 гг. – данные прогноза, основанные на прогнозе СП.

ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В ЭПОХИ МИНИМУМОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ 20-22 ЦИКЛОВ

Наибольшие вариации солнечных и галактических космических лучей обусловлены циклическостью солнечной активности. Максимальные значения интенсивности ГКЛ отмечаются в эпохи минимумов солнечной активности в 1976, 1987 и в 1996-1997 гг. Минимальные значения интенсивности ГКЛ наблюдались в 1970 г. ($E_p > 65$ МэВ), в 1981 и 1990-1991 г.г. ($E_p > 90$ МэВ). Наибольшая амплитуда 11-летних вариаций ГКЛ по среднегодовым данным составила ~150% в 22 цикле; в 20 и 21 циклах – 136% и 104%, соответственно.

Необычное возрастание интенсивности ГКЛ наблюдалось на фазе спада солнечной активности 20 цикла в 1972-1973 гг. [9] и по величине среднегодового значения сравнимо с интенсивностью ГКЛ в эпоху минимума 20 цикла.

Среднегодовое значение ГКЛ от минимума 21 цикла, ($4,02 \pm 0,05 \text{ см}^2 \text{с}^{-1}$) в 1986 г. возросло к минимуму 22 цикла ($5,06 \pm 0,08 \text{ см}^2 \text{с}^{-1}$) в 1996 г. примерно на 26%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным мониторинга протонной активности Солнца эпохи минимумов 11-летних солнечных циклов существенно отличаются:

так в минимумах 19-21 циклов в ОКП наблюдались СПС со значительными потоками протонов, а в 20-21 циклах регистрировались СПС, вызвавшие возмущения РО. В минимуме 22 цикла (1996 г.) и в течение трех лет (2007-2009 гг.) минимума 23 цикла потоков протонов в ОКП не зарегистрировано. Сравнение протонной активности Солнца и потоков ГКЛ показало, что минимум перед 24 циклом существенно глубже, чем перед 23 и предыдущими циклами.

О тенденции долговременного снижения солнечной активности говорится в работах [10, 11]. Так, в работе [10] показано, что 2007 год отличается аномально низкой солнечной и геомагнитной активностью и не имеет аналогов в регулярных наблюдениях за Солнцем, а авторы работы [11] отмечают существенное уменьшение и сложную структуру крупномасштабного открытого магнитного поля Солнца в минимуме 23 цикла по сравнению с минимумом 22 цикла.

Таким образом, полученные нами данные по динамике протонной активности Солнца в 19-23 циклах и изменениям интенсивности ГКЛ, свидетельствуют об общем уменьшении солнечной активности в 24 цикле.

Авторы выражают благодарность доктору ф.-м. наук Белоусову А.С. за представленные материалы и активное обсуждение возможности использования прогноза числа солнечных пятен для прогнозирования числа СПС на 2013-2019 гг. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №13-02-00612.

ЛИТЕРАТУРА

1. Catalog of Solar Particle Events 1955-1969./ Ed. by Z.Svestka, P.Simon. Dordrecht-Holland. Boston-USA: D. Reidel Publ. Company, 1975. 430 p.
2. Каталог солнечных протонных событий 1970-1979 г.г./ Под ред. Ю.И.Логачева. М.: ИЗМИРАН 1983. 184 с.
3. Каталог солнечных протонных событий 1980-1986 г.г./ Под ред. Ю.И.Логачева. М.: МГК-АН СССР – МЦД-Б2. 1990. Т.1-2. 365 с.
4. Catalogue of solar proton events 1987-1996./ Ed. Yu.I.Logachev. M.: Lomonosov Moscow State Univ. 1998. 246 p.
5. Беловский М.Н., Очелков Ю.П. // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т.21. №5. С.792-797.
6. Переяслова Н.К., Назарова М.Н., Петренко И.Е. // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т.45. №3. С.1-7.
7. WWW.Spaceweather.com – NOAA Space Weather Prediction Center – Solar Cycle Predictions – Table of Predicted Values With Excited Ranges.
8. Ишков В.Н.//Астрономический вестник, 2005, т.39. №6. С.507-516.
9. Авдюшин С.И., Переяслова Н.К. // Изв.АН СССР. Сер. Физ. 1983. Т.47. №9. С. 1805-1809.
10. Белов А.В., Гайдаш С.П. // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т.49. №5. С. 595-602.
11. Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т.48. №3. С. 291-296.