Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 127–130.

УДК 523.62–726, 524.1
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-127

ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ОТ КООРДИНАТ ВСПЫШЕК-ИСТОЧНИКОВ В 21–25 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

Д.Д. Пинигин-Сосин[1], С.И. Петухов[1], И.С. Петухов[1]

[1]Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия, piniginsosin@ikfia.ysn.ru

DEPENDENCE OF TIME DELAYS OF SOLAR PROTON EVENTS ON COORDINATES OF FLARE SOURCES IN SOLAR CYCLES 21–25

D.D. Pinigin-Sosin[1], S.I. Petukhov[1], I.S. Petukhov[1]

[1]Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia,
piniginsosin@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Время задержки между приходом солнечных космических лучей (СКЛ) на Землю и вспышкой на Солнце, считающейся их источником, является важным параметром при изучении распространения частиц в межпланетном пространстве. Цель работы — выявить зависимость времени задержки СКЛ (протоны > 10 МэВ) от гелиокоординат источника на Солнце. Особенностью подхода можно считать разделение распределения источников по широте и долготе с учетом времени распространения частиц в межпланетном пространстве, а также изучение отдельных циклов. В анализе использовались каталоги солнечных протонных событий для 21–25-го циклов солнечной активности (с 1976 по 2025 г.). За этот период отобрано и проанализировано 425 солнечных протонных событий. Для каждого события из каталога определены гелиодолгота и гелиоширота источника, а также время задержки частиц. В результате подтверждено существование ранее известной широтной асимметрии в каждом 11-летнем солнечном цикле. Важным результатом можно считать полученные распределения источников по гелиодолготе в зависимости от времени распространения протонов: быстрее всего частицы приходили из источников, расположенных в западной полусфере Солнца, что можно объяснить расположением там силовых линий межпланетного поля, связывающих эти области с Землей. Чем больше была задержка, тем равномернее распределялись источники. При задержке около 12 часов число источников в восточной и западной полусферах примерно одинаково.

Ключевые слова: солнечные космические лучи (СКЛ), гелиоширота, гелиодолгота, время задержки.

Abstract. The time delay between the arrival of solar cosmic rays (SCRs) at Earth and the solar flare considered to be their source is an important parameter when studying the propagation of particles in interplanetary space. The aim of this report is to identify the dependence of the SCR time delay (protons > 10 MeV) on the heliocoordinates of the source on the Sun. A distinctive feature of the approach is the separation of source distributions by latitude and longitude, taking into account the particle propagation time in interplanetary space, as well as the study of individual cycles. The analysis used catalogs of solar proton events for solar cycles 21–25 (from 1976 to 2025). Over this period, 425 solar proton events have been selected and analyzed. For each event, the heliolongitude and heliolatitude of the source, as well as the particle time delay, were determined from the catalog. As a result, the existence of a previously known latitudinal asymmetry during each 11-year solar cycle was confirmed. An important result is the obtained distributions of sources by heliolongitude depending on the proton propagation time: particles arrived fastest from sources located in the western hemisphere of the Sun, which can be explained by the arrangement of interplanetary magnetic field lines connecting these regions with Earth. The longer the delay, the more evenly the sources were distributed. For a delay of about 12 hours, the number of sources in the eastern and western hemispheres was approximately equal.

Keywords: solar cosmic rays (SCRs), heliolatitude, heliolongitude, time delay.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что пространственно-временное распределение солнечных протонных событий (СПС) и солнечных космических лучей (СКЛ) может зависеть от фазы солнечного цикла, гелиоширотного и гелиодолготного [Kahler, 2016] положения активной области, а также от условий распространения заряженных частиц в межпланетной среде. Асимметрия между северным и южным полушариями Солнца хорошо известна, особенностью нашего подхода является систематический анализ смены доминирующего полушария на протяжении последовательных циклов 21–25 до настоящего времени. Кроме того, остаются недостаточно изученными связь времени задержки прихода СКЛ на Землю после вспышки с параметрами источника, а также особенности гелиодолготного распределения событий.

Целями работы являются: проверка гипотезы о том, что в первой половине солнечного цикла СПС возникают преимущественно в северном полушарии, а во второй половине — в южном; анализ времени задержки прихода СКЛ на Землю после солнечной вспышки; исследование распределения источников СПС по гелиодолготам.

ГЕЛИОШИРОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВСПЫШЕК-ИСТОЧНИКОВ

Были отобраны 425 солнечных протонных (с энергией > 10 МэВ) событий из каталогов Базилевской и Акиньян с 21-го по 25-й солнечный цикл [Акиньян и др., 1982; Базилевская и др., 1990; Sladkova et al., 1998; Logachev et al., 2016, 2022], данные которых собраны околоземными спутниками GOES, IMP, «Метеор» и «Прогноз». Результаты анализа представлены в виде гистограмм на рис. 1. Синим цветом обозначена северная часть полусферы Солнца, красным — южную часть.

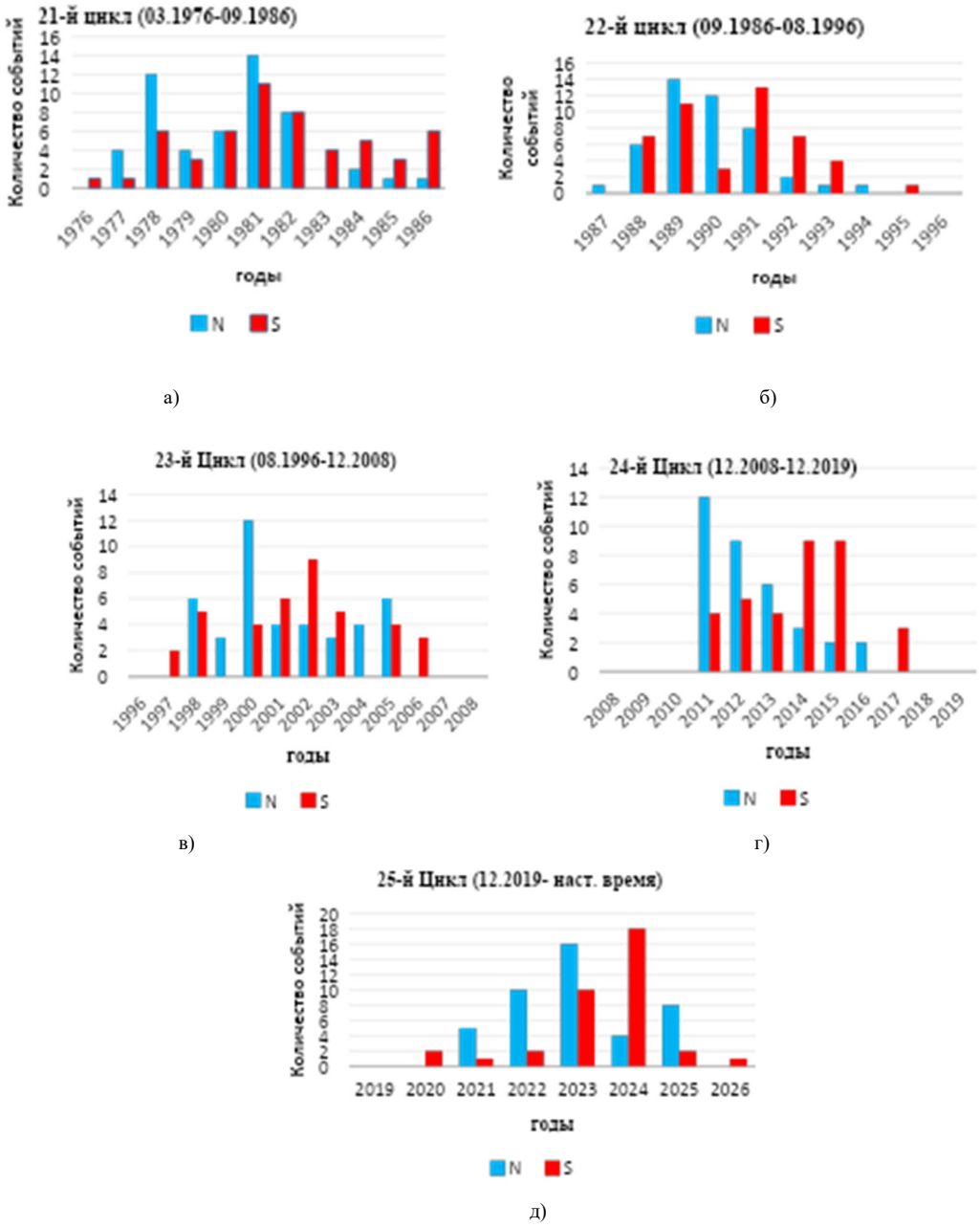

Рис. 1. Гелиоширотная асимметрия 21–25-го солнечных циклов

Выявлена известная гелиоширотная зависимость в течении каждого солнечного цикла. В первой половине каждого из рассматриваемых циклов преобладали события, источники которых регистрировались из северного полушария Солнца, тогда как во второй половине солнечного цикла основная часть СПС была связана с южным полушарием. Следует отметить, что 24-й солнечный цикл был одним из самых слабых за последние десятилетия. Этот результат не является статистически надежным и не противоречит общей тенденции.

Сравнение времени задержки между северным и южным полусферами в циклах 21–25 представлено в табл. 1. Под временем задержки понимается интервал Δt между регистрацией солнечной вспышки (например, по данным в рентгеновском диапазоне) и моментом начала повышения интенсивности потока протонов с энергией >10 МэВ на орбите Земли. Было подобрано 361 СПС с наличием двух временных составляющих.

Таблица 1. Время задержки прихода солнечных космических лучей (СКЛ) на землю для событий из северного (N) и южного (S) полушарий в 21–25-м солнечных циклах

	21(68 СПС)	22(67 СПС)	23(82 СПС)	24(66 СПС)	25(78 СПС)
N (все)	7.24 ч	6.54 ч	7.36 ч	4.1 ч	9.5 ч
S (все)	6.05 ч	5.29 ч	3.28 ч	4.07 ч	5.2 ч
N (Δt <12)	2.49 ч	4. ч	3.59 ч	2.93 ч	2.93 ч
S (Δt <12)	2.93 ч	2.63 ч	2.68 ч	3.24 ч	3.51 ч

N (Δt <24)	2.58 ч	5.78 ч	4.72 ч	4.1 ч	3.66 ч
S (Δt <24)	4.06 ч	3.32 ч	3.28 ч	4.07 ч	4.5 ч

Для циклов 21, 22, 23 и 25 характерно более быстрый приход СКЛ из южного полушария: отношение N/S варьируется от 1.20 до 2.24. Красным цветом выделено 1.5-часовое различие между южной и северной полусферами Солнца с наибольшей временной задержкой в сторону северной части полусферы, а зеленым — в сторону южной части полусферы. Наиболее выраженное различие наблюдается в 23-м цикле (7.36 ч против 3.28 ч).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВСПЫШЕК-ИСТОЧНИКОВ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ПО ГЕЛИОДОЛГОТЕ

Проведен анализ временных задержек СКЛ и выявлена связь с гелиодолготой источника-вспышки. Было отобрано 226 событий в 23–25-м солнечных циклах. Эти события были разделены на шесть разных промежуток времени: менее 1 ч (51 событий), 1–2 ч (42 событий), 2–4 ч (52 событий), 4–12 ч (52 событий), 12–24 (18 событий) и более 24 ч (11 событий). Результаты представлены на рис. 2 в виде гистограмм.

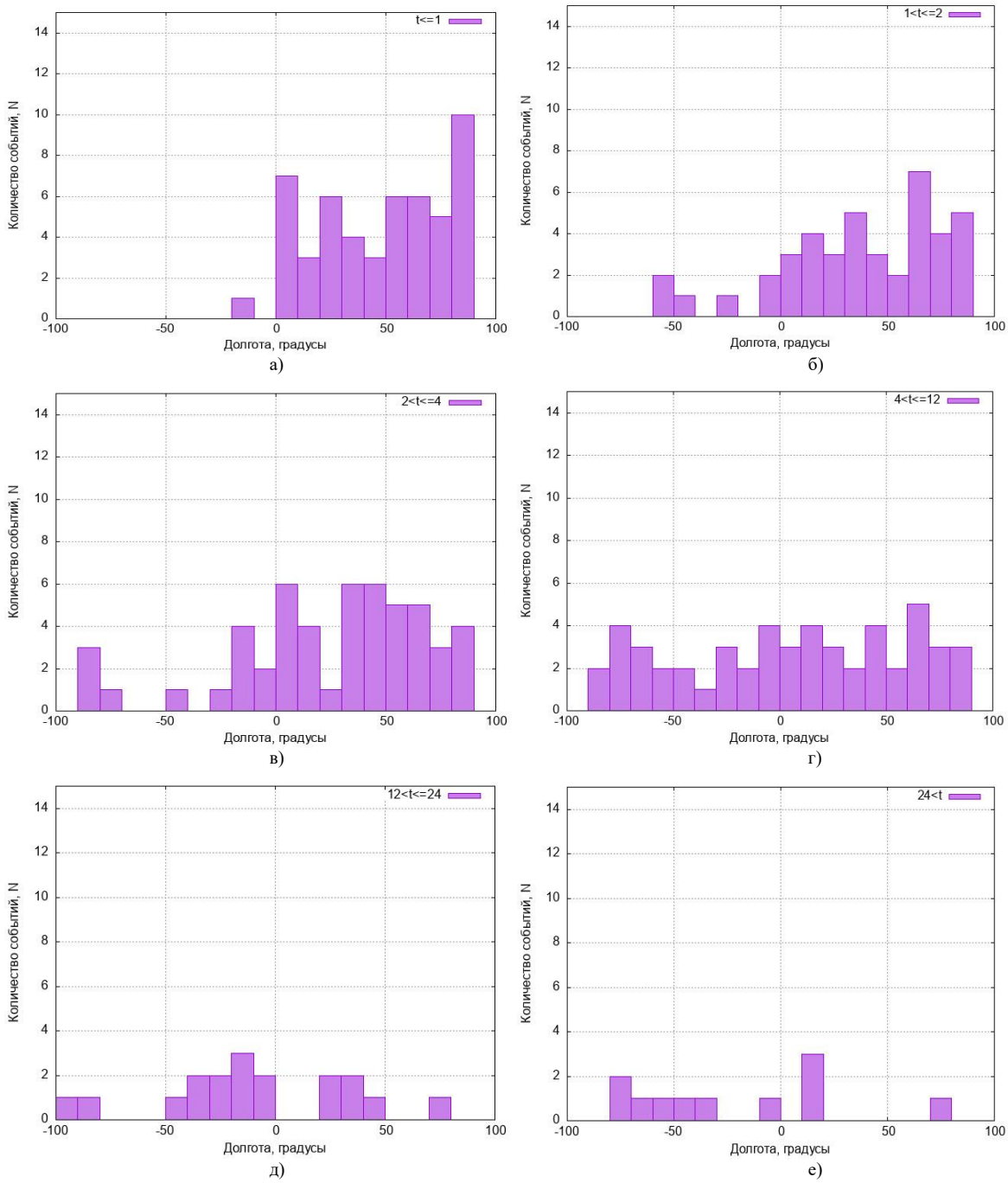

Рис. 2. Распределения вспышек-источников по гелиодолготам с учетом времени задержки: а) меньше 1 ч; б) 1–2 ч; в) 2–4 ч; г) 4–12 ч; д) 12 – 24 ч; е) больше 24 ч

События с наименьшей задержкой по времени $\Delta t < 1$ сконцентрированы на западной части полусферы Солнца (долготы 10°–90°). Это объясняется тем, что линии магнитного поля, по которым движутся СКЛ, на западной части Солнца соединяются с Землей, вследствие чего отсутствует существенная задержка по времени между вспышкой на Солнце и началом повышения интенсивности СКЛ на Земле.

По мере увеличения задержки гелиодолготное распределение размывается. Для событий с задержками в интервалах 1–2, 2–4 ч эта закономерность по-прежнему сохраняется, но становится менее выраженной и смещенной в восточной части Солнца. При задержке 4–12 ч распределение источников-вспышек по гелиодолготе приобретает симметричный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Наличие гелиоширотной асимметрии подтверждается тем, что в первой половине каждого из рассмотренных циклов источники СПС располагались преимущественно в северном полушарии Солнца, а во второй половине — в южном полушарии. Эта закономерность прослеживается для всех циклов с 21-го по 25-й.

Обнаружено, что для событий в южной полусфере Солнца время задержки в среднем меньше, чем для событий в северной полусфере. Наиболее ярко это выражено в 23-м цикле: 3.28 ч (юг) по сравнению 7.36 ч (север). В 24-м цикле различия во временных задержках не наблюдается. Возможно, на это повлияло незначительное количество СПС.

Анализ гелиодолготного распределения вспышек-источников показал, что СПС с минимальной временной задержкой наблюдаются на гелиодолготах от 10° до 90° в западной части Солнца, что согласуется с моделью магнитного соединения по спирали Паркера.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 126021217279-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акиньян С.Т., Базилевская Г.А., Ишков В.Н. и др. Каталог солнечных протонных событий 1970–1979 гг. М.:ИЗМИРАН, 1982. 184 с.

Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В., Ишков В.Н. и др. Солнечные протонные события. Каталог 1980–1986 гг. Данные наблюдений частиц и электромагнитных излучений // Материалы мирового центра данных Б. М., 1989.

Kahler S.W. Solar energetic particle event onsets: Far backside solar sources and the east–west hemispheric asymmetry // Astrophys. J. 2016. V. 819, 105. 6 p.

Logachev Yu.I., Bazilevskaya G.A., Vashenyuk E.V., et al. Catalog of Solar Proton Events in the 23rd Cycle of Solar Activity (1996 – 2008). Moscow, 2016.

Logachev Yu.I., Bazilevskaya G.A., Vlasova N.A., et al. Catalog of solar proton events in the 24 th cycle of solar activity (2009–2019). Moscow, 2022.

Sladkova A.I., Bazilevskaya G.A., Ishkov V.N., et al. Catalogue of solar proton events 1987–1996. Moscow University Press, 1998.