
**ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
НА ФАЗЕ РОСТА 25-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА:
СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ С 23-М И 24-М СОЛНЕЧНЫМИ ЦИКЛАМИ**
**SOLAR WIND PARAMETERS IN RISING PHASE OF SOLAR CYCLE 25:
SIMILARITIES AND DIFFERENCES WITH SOLAR CYCLES 23 AND 24**

Ю.И. Ермолаев

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, yermol@iki.rssi.ru*

И.Г. Лодкина

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, irina-priem@mail.ru*

А.А. Хохлачев

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, aleks.xaa@yandex.ru*

М.Ю. Ермолаев

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, michaely2@yandex.ru*

М.О. Рязанцева

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, oream@gmail.com*

Л.С. Рахманова

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, rakhnud@gmail.com*

Н.Л. Бородкова

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, nlbor@mail.ru*

О.В. Сапунова

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, sapunova_olga@mail.ru*

А.В. Москалева

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, mos.an.vad@gmail.com*

Y.I. Yermolaev

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, yermol@iki.rssi.ru*

I.G. Lodkina

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, irina-priem@mail.ru*

A.A. Khokhlachev

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, aleks.xaa@yandex.ru*

M.Yu. Yermolaev

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, michaely2@yandex.ru*

M.O. Riazantseva

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, oream@gmail.com*

L.S. Rakhmanova

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, rakhnud@gmail.com*

N.L. Borodkova

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, nlbor@mail.ru*

O.V. Sapunova

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, sapunova_olga@mail.ru*

A.V. Moskaleva

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, mos.an.vad@gmail.com*

Аннотация. Солнечная активность и параметры солнечного ветра существенно снизились в 23–24-м солнечных циклах (СЦ) по сравнению с СЦ 21–22. В данной работе мы анализируем измерения солнечного ветра на фазе роста СЦ 25 и сравниваем их с аналогичными данными в предыдущих циклах. Для этого данные базы OMNI за 1976–2022 гг. были селективированы как по фазам 11-летних солнечных циклов, так и по крупномасштабным типам солнечного ветра (по каталогу [<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni>]) и мы рассчитали средние значения параметров плазмы и магнитного поля для сформированных наборов данных. Полученные результаты свидетельствуют в пользу гипотезы о том, что продолжение этого цикла будет аналогично соответствующим фазам предыдущего цикла 24, т. е. СЦ 25 будет слабее, чем СЦ 21 и 22.

Ключевые слова: солнечный ветер, солнечный цикл.

Abstract. Solar activity and solar wind parameters decreased significantly in solar cycles (SCs) 23–24. In this paper, we analyze solar wind measurements at the rising phase of SC 25 and compare them with similar data from the previous cycles. For this purpose, we simultaneously selected the OMNI database data for 1976–2022, both by phases of the 11-year solar cycle and by large-scale solar wind types (in accordance with catalog [<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni>]), and calculated the mean values of the plasma and magnetic field parameters for the selected datasets. The obtained results support the hypothesis that the continuation of this cycle will be similar to that of cycle 24, i.e. SC 25 will be weaker than SCs 21 and 22.

Keywords: solar wind, solar cycle.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечный ветер (СВ), образующийся при расширении горячей солнечной короны в межпланетную среду, является одним из основных предметов космических исследований. С одной стороны, изучение солнечного ветра позволяет лучше понять свойства солнечной атмосферы и процессы истечения плазмы из нее [Hundhausen, 1972; Schwenn, 2006, 2007]. С другой стороны, солнечный ветер является основным агентом, переносящим возмущения от Солнца к Земле и ответственным за космическую погоду [Gonzalez et al., 1999; Yermolaev et al., 2005; Temmer, 2021].

Прямые измерения солнечного ветра начались в начале космической эры [Gringauz, 1961; Neugebauer, Snyder, 1962] и охватывают 20–25-й циклы солнечной активности (см., например, базу измерений солнечного ветра [https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni; King, Papitashvili, 2005]). Начало этого периода пришлось на эпоху высокой солнечной активности, а в минимуме между 22-м и 23-м солнечными циклами (СЦ) началось снижение солнечной активности, продолжавшееся в 23-м и 24-м СЦ [Feynman, Ruzmaikin, 2011; Zolotova, Ponyavin, 2014; Biswas et al., 2023]. Это падение солнечной активности может иметь большое значение для Земли. Согласно аппроксимации чисел солнечных пятен в максимумах последних 20 СЦ вековыми циклами Гляйсберга (Gleissberg) текущий 25-й СЦ может оказаться ниже уровня Grand minimum, т. е. активность Солнца может снизиться до уровня минимума Дальтона (см. рис. 4 обзора [Petrovay, 2020]). Снижение солнечной активности сопровождалось рядом существенных изменений солнечного ветра, которые привели к изменениям в магнитосфере Земли [McComas et al., 2013; Gopalswamy et al., 2015; Yermolaev et al., 2021a, b, 2022a, b; Mursula et al., 2022]: 1) изменение структуры гелиосферы, например, уменьшение количества выбросов корональной массы (Coronal Mass Ejection, CME) и их проявлений в межпланетной среде при практически неизменном количестве высокоскоростных потоков из корональных дыр и связанных с ними коротирующих областей взаимодействия; 2) уменьшение значений параметров солнечного ветра как в различных типах потоков, так и в разных фазах солнечного цикла; 3) уменьшение возмущенности магнитосферы, в частности уменьшение числа магнитных бурь на Земле почти в десять раз.

Солнце прошло фазу роста 25-го солнечного цикла (см. поведение среднегодовых значений солнечных пятен в период 2019–2022 гг. на рис. 1), и прямые измерения солнечного ветра на этой фазе в настоящее время доступны для исследования. Вместе с солнечными наблюдениями анализ этих измерений позволяет верифицировать модели, предсказывающие развитие текущего солнечного цикла, и, в частности, получать более надежные прогнозы поведения Солнца, гелиосферы и эффектов космической погоды вблизи максимума солнечного цикла [Javaraiah,

2017; Chowdhury et al., 2022; Lamy, Gilardy, 2022; Du, 2023].

В нашей предыдущей статье [Yermolaev et al., 2021a] мы проанализировали, как изменялись средние параметры в различных крупномасштабных потоках солнечного ветра на разных фазах 21–24-го СЦ (1976–2019 гг.). Для этого мы отбирали данные из базы данных OMNI [King, Papitashvili, 2005] как по фазам солнечного цикла, так и по крупномасштабным типам солнечного ветра [Yermolaev et al., 2009] и вычисляли средние значения параметров для полученных наборов данных. В результате было показано, что в СЦ 23 и 24 (1997–2019 гг.) для соответствующих фаз солнечных циклов для всех типов потоков солнечного ветра параметры уменьшились на 20–40 % по сравнению с СЦ 21 и 22. В настоящей работе на основе аналогичного набора данных для фазы роста 25-го СЦ впервые проводится сравнение с аналогичными фазами четырех предыдущих СЦ с целью определения сходства и различия между текущим и предыдущими СЦ и прогнозирования развития 25-го СЦ.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Мы используем те же источники информации, что и в предыдущей нашей работе [Yermolaev et al., 2021a]: 1) среднечасовые данные базы OMNI по измерениям солнечного ветра за 1976–2022 гг. [https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni; King, Papitashvili, 2005]; 2) интервалы разных типов СВ из каталога крупномасштабных явлений с 1976 г. [<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni>; Yermolaev et al., 2009], созданного на основе данных OMNI.

В соответствии с каталогом были выделены следующие крупномасштабные (с размером $>10^6$ км) типы солнечного ветра:

- *Квазистационарные типы*: 1) гелиосферный токовый слой (Heliospheric Current Sheet, HCS); 2) медленные потоки из области корональных стримеров (Slow); 3) быстрые течения из области корональных дыр (Fast).

- *Возмущенные типы*: 4) области сжатия между медленным и быстрым типами течения — коротирующие области взаимодействия (Corotating Interaction Regions, CIR); 5) области сжатия (Sheath) между медленным типом течения и быстрыми межпланетными проявлениями CME (Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME); 6, 7) два варианта ICME: Ejecta и магнитное облако (Magnetic Cloud, MC), MC отличается от Ejecta более высоким и регулярным межпланетным магнитным полем (ММП).

Используемая классификация является общепринятой (подробнее см. [Yermolaev et al., 2021a]), метод идентификации типов солнечного ветра подробно описан в работе [Yermolaev et al., 2009].

Весь временной интервал 1976–2022 гг. был разбит на 18 подынтервалов, соответствующих фазам СЦ 21–25 (см. рис. 1 и табл. 1). В отличие от предыдущих работ [Yermolaev et al., 2021a, b], в данной работе фаза минимума между 24-м и 25-м СЦ включает

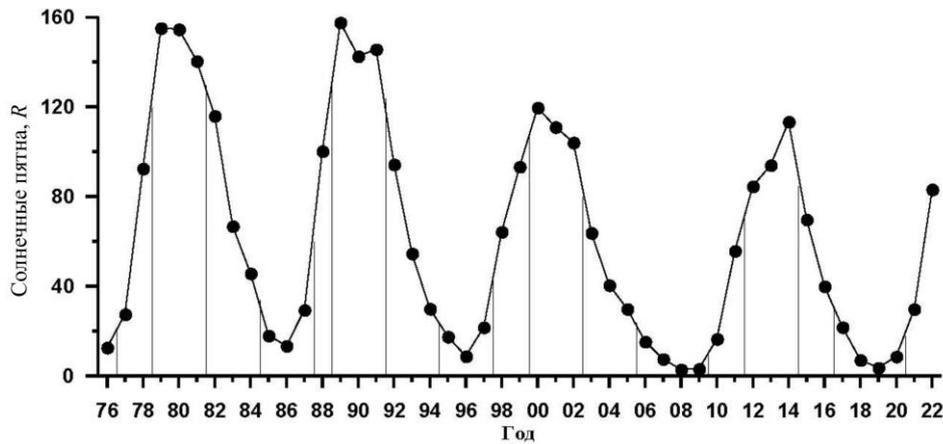


Рис. 1. Годовое количество солнечных пятен R. Цифры и вертикальные линии показывают распределение по фазам 21–25-го солнечных циклов

Таблица 1

Интервалы усреднения по фазам 21–25-го солнечных циклов

№ подынтервала	№ солнечного цикла	Фаза солнечного цикла	Годы
1	21	минимум	1976
2		роста	1977, 1978
3		максимум	1979–1981
4		спада	1982–1984
5		минимум	1985–1987
6	22	роста	1988
7		максимум	1989–1991
8		спада	1992–1994
9	23	минимум	1995–1997
10		роста	1998–1999
11		максимум	2000–2002
12		спада	2003–2005
13	24	минимум	2006–2009
14		роста	2010, 2011
15		максимум	2012–2014
16		спада	2015–2016
17	25	минимум	2017–2020
18		роста	2021–2022

2017–2020 гг., а также добавлен период 2021–2022 гг., соответствующий фазе роста. В каждом из восемнадцати подынтервалов и по каждому из восьми типов СВ (семь перечисленных выше плюс их сумма) данные усреднялись. Все параметры в интервалах усреднения имеют большой статистический разброс, а их стандартное отклонение близко к среднему значению. Однако из-за большого ($\sim 10^3$) числа точек в наборах усреднения для всех типов СВ (кроме МС, где статистика невелика [Yermolaev et al., 2021a]) статистическая ошибка (т. е. стандартное отклонение, деленное на корень квадратный числа точек измерения) оказывается небольшой, и обсуждаемые ниже тенденции в поведении этих параметров имеют достаточную статистическую значимость [Bendat, Piersol, 1971]. Типичные значения стандартных отклонений и статистических ошибок параметров плазмы и магнитного поля для рассматриваемых наборов данных представлены в таблицах в наших статьях [Yermolaev et al., 2021a, b]. Следует отме-

тить, что наибольший разброс значений наблюдается для температуры протонов T , и, поскольку она имеет логнормальное распределение [Burlaga, Lazarus, 2000; Dmitriev et al., 2009], мы усреднили значение $\lg T$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2–7 представлены временные профили параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, усредненные по фазам солнечных циклов (см. табл. 1): минимум — черные кружки; фаза роста — синие треугольники; максимум — фиолетовые квадраты; фаза спада — зеленые треугольники основанием вверх; без выделения фаз (среднее по СЦ) — красные квадраты. Крайние правые синие треугольники на всех панелях соответствуют фазе роста 25-го СЦ, и эти значения представляют собой основной результат этой работы. Данные для магнитных облаков имеют сильный разброс на всех рисунках из-за малого количества событий.

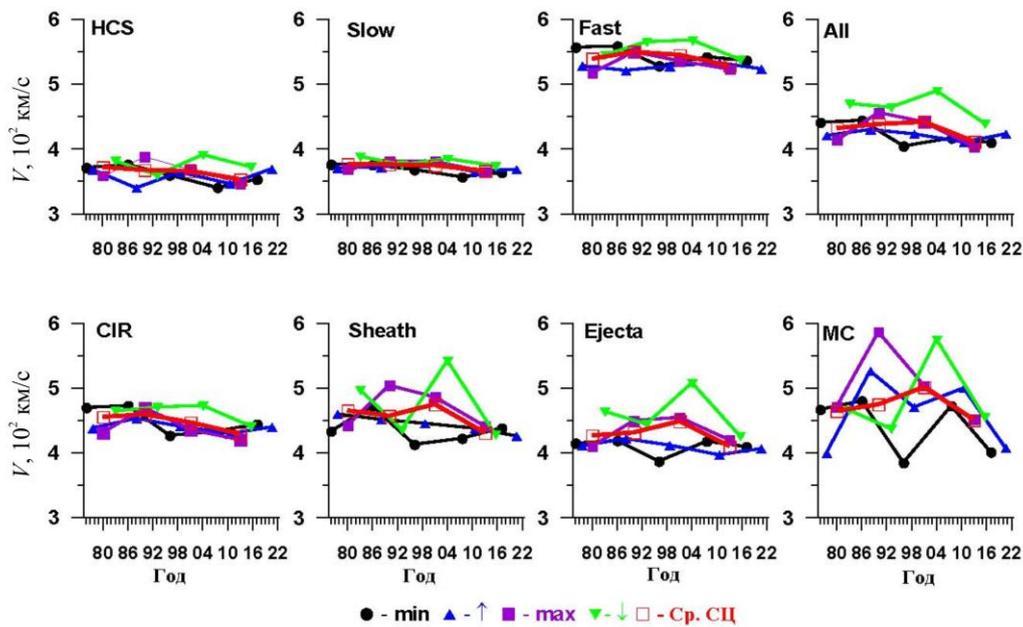


Рис. 2. Временные профили переносной скорости V в семи различных типах СВ (HCS, Slow, Fast, CIR, Sheath, Ejecta и MC) и без выбора типа СВ (панель All)

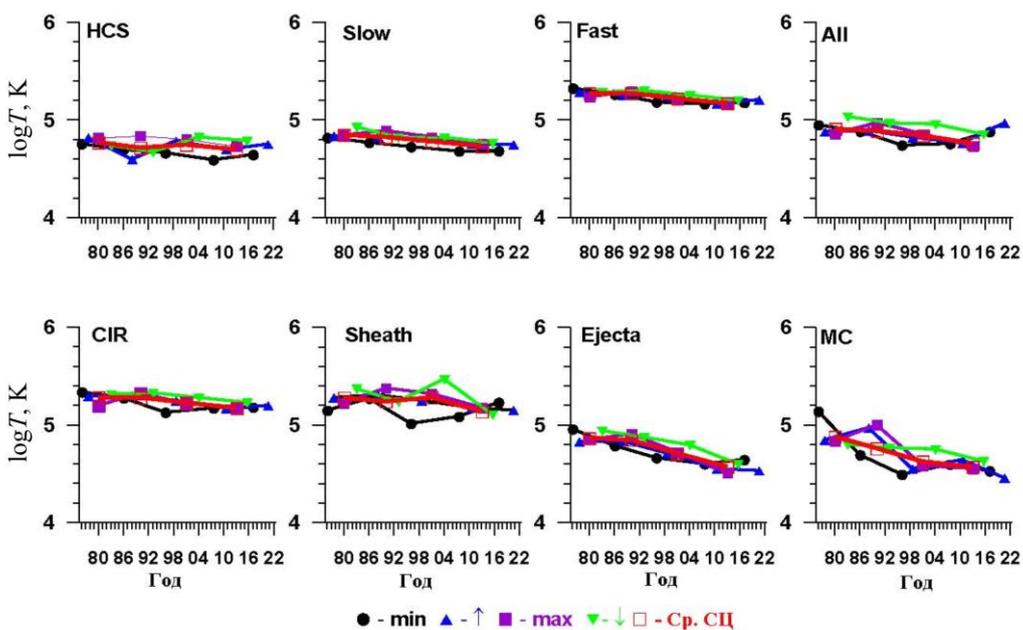


Рис. 3. Временные профили логарифма температуры протонов T

Начнем анализ с переносной скорости солнечного ветра, которая, как было показано ранее [Yermolaev et al., 2021a], оказалась наименее затронутой ослаблением солнечной активности в СЦ 23–24. На рис. 2 видно, что скорость солнечного ветра достаточно стабильна и слабо зависит как от фазы и номера СЦ, так и от типа СВ. Единственное кратковременное увеличение средней скорости наблюдалось для событий, генерируемых СМЕ (Sheath, Ejecta и MC) на фазе спада СЦ 23, и оно связано с кратковременным повышением солнечной активности (в частности, экстремальные события в октябре и ноябре 2003 и 2004 гг.). Отклонения средней скорости на фазе

роста СЦ 25 от предыдущей фазы минимума для разных типов СВ составляет менее 20 км/с, это значение заметно ниже стандартных отклонений и соответствует поведению скорости в начале СЦ 24. Таким образом, никаких особенностей фазы роста СЦ 25 по сравнению с фазой роста СЦ 24 не наблюдается.

На рис. 3 показаны изменения логарифма температуры протонов $\lg T$. Несмотря на большой разброс температур, усредненные по фазам солнечных циклов в логарифмическом масштабе профили имеют достаточно плавные формы с выраженной тенденцией к тому, что на фазах максимума и спада СЦ 22–24 температура выше, чем на фазах минимума и роста:

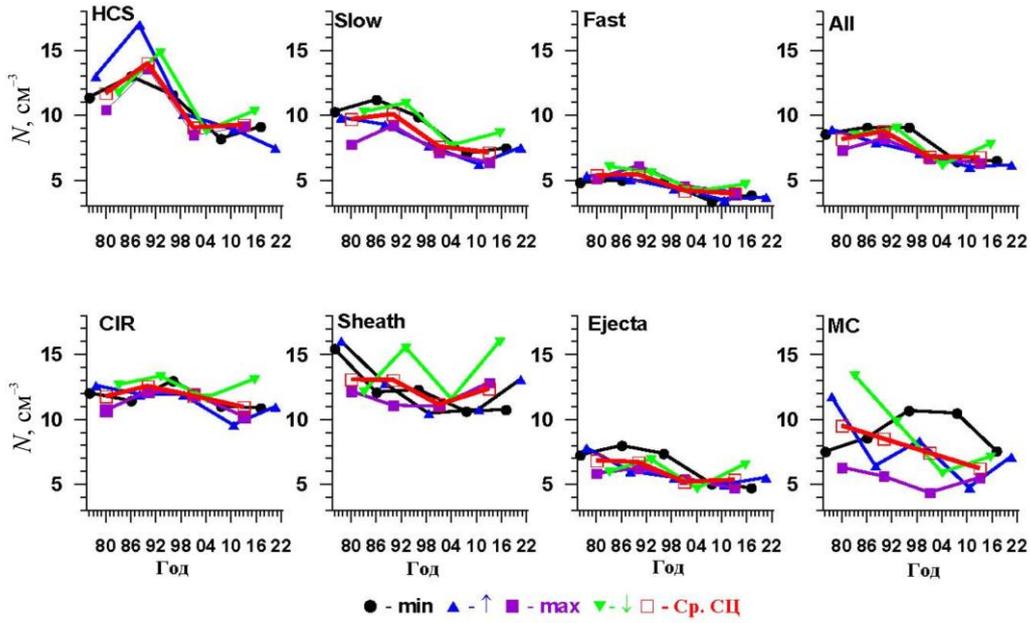


Рис. 4. Временные профили плотности N

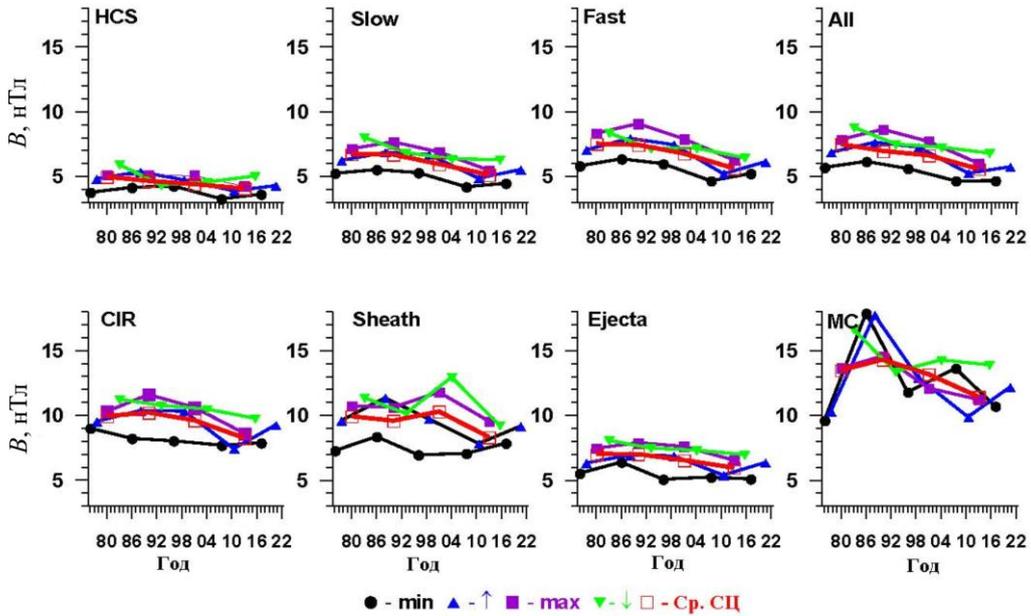


Рис. 5. Временные профили величины ММП B

линии для фаз максимума и спада в большинстве случаев располагаются над остальными линиями. Можно отметить, что тенденция к увеличению T на фазе роста 25-го СЦ наблюдается только для квазистационарных типов СВ (HCS, Slow и Fast) и не наблюдается для возмущенных типов СВ (CIR, Sheath, Ejecta и MC). Поскольку доля возмущенных типов СВ в этот период мала (см., например, [Yermolaev et al., 2023]), то поведение T для суммы всех типов (All) аналогично поведению для квазистационарных типов СВ.

На рис. 4 представлены вариации плотности N . Несмотря на большой разброс значений (немного меньший, чем разброс температуры), кривые N для квазистационарных типов СВ достаточно гладкие и демонстрируют тенденцию к более высоким зна-

чениям на фазах максимума и спада. Плотность после минимума между 22-м и 23-м СЦ заметно падает на всех фазах СЦ и для всех типов СВ (при малой статистике и большом разбросе данных по MC падение плотности видно при усреднении по полной продолжительности цикла — красные квадраты на панели для MC). Динамика плотности при переходе от фазы минимума к фазе роста 25-го СЦ аналогична динамике в соответствующий период предыдущего 24-го СЦ.

Временные профили величины межпланетного магнитного поля B представлены на рис. 5. Для разных типов СВ кривые показывают более высокие значения B на фазах максимума и спада, а после минимума между 22-м и 23-м СЦ наблюдается уменьшение магнитного поля. Для квазистационарного СВ (HCS, Slow и Fast) и без селекции по типам

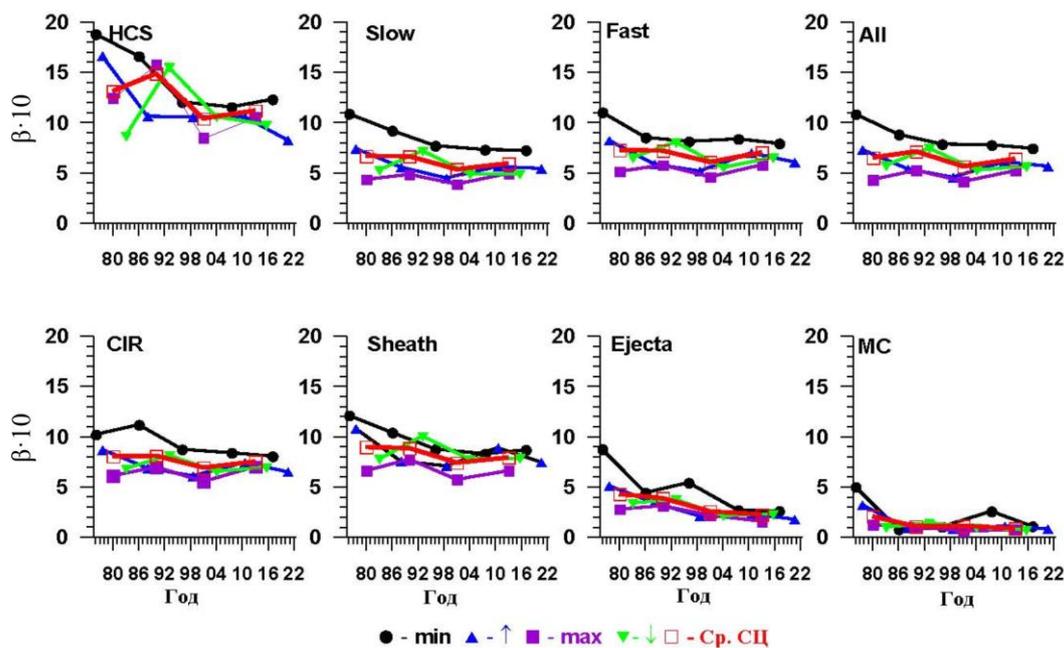


Рис. 6. Временные профили протонного β -параметра

СВ (панель All) параметр B остается неизменным или несколько увеличивается по сравнению с предыдущей фазой минимума и фазой роста СЦ 24.

Интересно сравнить временные профили безразмерной величины β , отношения теплового давления протонов к магнитному давлению (рис. 6). Для всех типов СВ, в отличие параметров, показанных на предыдущих рисунках, параметр β высок на фазах минимума и низок на фазах максимума за общий период и демонстрирует незначительное уменьшение в эпоху спада солнечной активности 23-го и 24-го СЦ. На фазе роста 25-го СЦ поведение параметра β аналогично поведению на соответствующей фазе предыдущего 24-го СЦ. В отличие от 24-го СЦ на фазе роста 25-го СЦ заметна слабая тенденция к снижению параметра β в возмущенных типах СВ (CIR, Sheath, Ejecta и MC). Можно предположить, что это связано с появлением большего числа достаточно возмущенных типов СВ в этот период, чем в аналогичный период 24-го СЦ.

Относительная плотность альфа-частиц N_α/N_p представлена на рис. 7, на котором видно, что для всех типов СВ параметр N_α/N_p максимален в фазу максимума и минимален в фазу минимума, а в эпоху низкой солнечной активности в СЦ 23–24 он упал в ~ 1.5 раза. Важно отметить, что если плотность протонов N_p упала на $\sim 40\%$, то абсолютная плотность альфа-частиц N_α упала в ~ 2 раза. Для всех типов СВ на фазе роста величина N_α/N_p увеличивается по сравнению с фазой предыдущего минимума и на фазе роста 25-го СЦ поведение N_α/N_p аналогично поведению на фазе роста 24-го СЦ.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В представленной работе мы рассчитали средние значения параметров для наборов данных, получен-

ных путем сортировки данных базы OMNI [King, Papitashvili, 2005] за 1976–2022 гг. как по фазам 11-летнего солнечного цикла, так и по крупномасштабным типам солнечного ветра из каталога [http://www.iki.rssi.ru/pub/omni; Yermolaev et al., 2009]. В отличие от предыдущей работы [Yermolaev et al., 2021a], здесь мы впервые таким образом рассчитали средние значения параметров на фазе роста СЦ 25 и сравнили со значениями на аналогичных фазах предыдущих циклов низкой солнечной активности 23-го и 24-го.

В табл. 2 обобщено поведение параметров V , T , N , B , β и N_α/N_p при переходе солнечной активности от фазы минимума к фазе роста для предыдущего и текущего солнечных циклов: аналогичное поведение отмечено знаком «плюс», а разница отмечена знаком «минус». Поведение всех параметров одинаково для данных без выбора типа солнечного ветра (All), Fast и Ejecta. Различие по одному параметру наблюдается для HCS (для N), Slow (для N) и CIR (для B). Различие по наибольшему числу параметров наблюдается для Sheath и MC. Как мы уже отмечали, наименьшая статистическая значимость наблюдается для MC из-за малого числа событий. Этот анализ показывает, что нет существенных оснований полагать, что начало текущего 25-го СЦ отличается от начала предыдущего цикла, и, скорее всего, продолжение этого цикла будет аналогично соответствующим фазам предыдущего 24-го цикла, т. е. СЦ 25 будет слабее, чем СЦ 21 и 22.

Наше определение временных рамок фазы роста 25-го СЦ довольно условно, поскольку это трудно сделать для еще не закончившегося цикла. Для того чтобы анализируемые данные обладали достаточной статистической достоверностью, мы при первоначальном отборе используем данные нашего каталога, усредненные за год. Поэтому выбранные интервалы

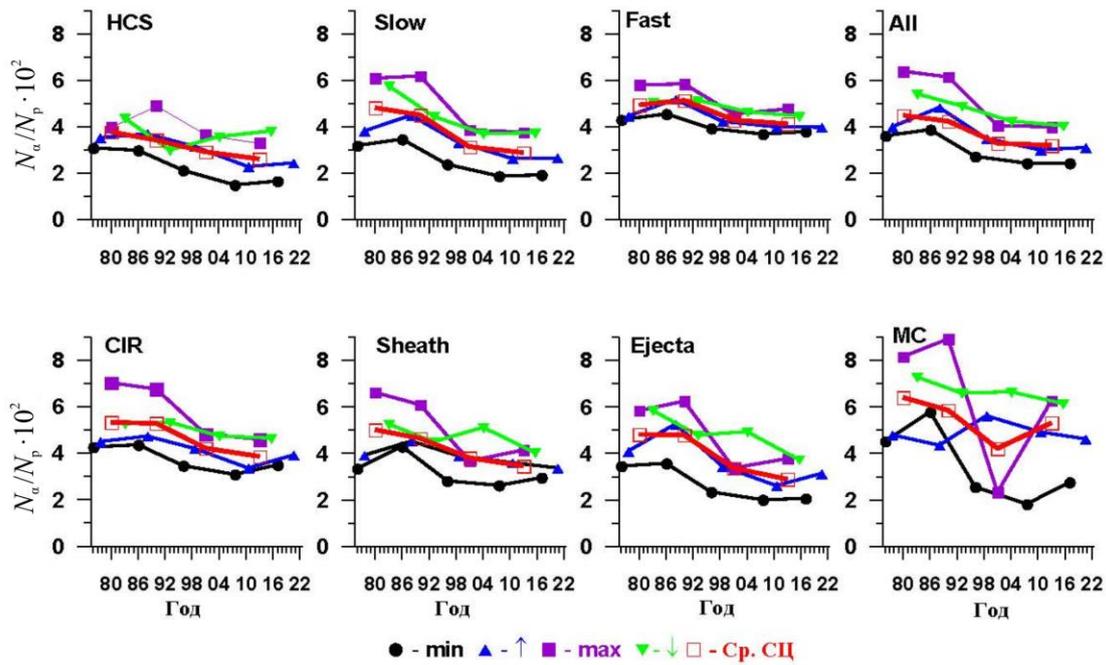


Рис. 7. Временные профили относительного содержания гелия N_a/N_p

Таблица 2

Сравнение поведения параметров на интервалах перехода фаз от минимума к возрастанию для 23/24-го и 24/25-го СЦ (рис. 2–7)

	HCS	Slow	Fast	All	CIR	Sheath	Ejecta	MC
V	+	+	+	+	+	–	+	+
T	+	+	+	+	+	–	+	–
N	–	–	+	+	+	–	+	–
B	+	+	+	+	–	+	+	–
β	+	+	+	+	+	–	+	+
N_a/N_p	+	+	+	+	+	+	+	+

Фаз солнечных циклов являются компромиссом между границами фаз, определенными по солнечным данным и установленными по наблюдениям солнечного ветра из нашего каталога. Задачей данной работы является качественная оценка поведения 25-го цикла на основе сравнения результатов аналогичного анализа данных солнечного ветра за предыдущие циклы, и, на наш взгляд, полученные результаты позволяют (со всеми сделанными оговорками) качественно ответить на поставленный вопрос о дальнейшем развитии 25-го СЦ. Учитывая сделанный выше вывод о слабом 25-м СЦ, нельзя исключить, что интервал 2021–2022 гг. включает измерения, относящиеся к максимальной фазе 25-го СЦ. Однако их включение в анализ только усилило бы эти тенденции, а полученные зависимости были бы настолько слабыми, что не позволили бы сделать вывод об отличии восходящей ветви 25-го СЦ от аналогичной ветви предшествующего 24-го СЦ. Поэтому принятые в данной работе границы фазы роста 25-го СЦ, возможно частично охватывающие фазу максимума, не могут существенно повлиять на сделанные выводы.

Прогноз развития солнечной активности в ближайшие годы и, в частности, в 25-м СЦ остается дискуссионным и широко обсуждается в специаль-

ной литературе [Du, 2023; Peguero, Carrasco, 2023; Coban et al., 2021; Nagovitsyn, Ivanov, 2023; Prasad et al., 2023; Zharkova et al., 2023; Javaraiah, 2023]. Мы надеемся, что результаты, представленные в этой статье, прольют дополнительный свет на развитие солнечной активности в текущем солнечном цикле и далее.

Авторы благодарны создателям баз данных [https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni] и [http://www.iki.rssi.ru/pub/omni] за возможность их использования в данном исследовании.

Работа была поддержана грантом Российского научного фонда (проект 22-12-00227).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bendat J.S., Piersol A.G. *Measurement and Analysis of Random Data*. New York: Wiley-Interscience, 1971. P. 139–258.

Biswas A., Karak B.B., Usoskin I., Weisshaar E. Long-term modulation of solar cycles. *Space Sci Rev.* 2023. Vol. 219, 19. DOI: 10.1007/s11214-023-00968-w.

Burlaga L.F., Lazarus A.J. Lognormal distributions and spectra of solar wind plasma fluctuations: Wind 1995–1998. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, iss. A2. P. 2357–2364. DOI: 10.1029/1999ja900442.

Ю.И. Ермолаев, И.Г. Лодкина, А.А. Хохлачев,
М.Ю. Ермолаев, М.О. Рязанцева, Л.С. Рахманова,
Н.Л. Бородкова, О.В. Сапунова, А.В. Москалева

Y.I. Yermolaev, I.G. Lodkina, A.A. Khokhlachev,
M.Yu. Yermolaev, M.O. Riazantseva, L.S. Rakhmanova,
N.L. Borodkova, O.V. Sapunova, A.V. Moskaeva

Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Veselovsky I.S. Statistical characteristics of the heliospheric plasma and magnetic field at the Earth's orbit during four solar cycles 20–23. *Handbook on Solar Wind: Effects, Dynamics and Interactions*. New York: Nova Science Publishers, 2009. P. 81–144.

Du Z.L. The solar cycle: predicting the maximum amplitude of the smoothed highest 3-hourly aa index in 3 d for cycle 25 based on a similar-cycle method. *Astrophys. Space Sci.* 2023. Vol. 368, 11. DOI: [10.1007/s10509-023-04167-5](https://doi.org/10.1007/s10509-023-04167-5).

Feynman J., Ruzmaikin A. The Sun's strange behavior: Maunder minimum or Gleissberg cycle? *Solar Phys.* 2011. Vol. 272. P. 351–363. DOI: [10.1007/s11207-011-9828-0](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9828-0).

Chowdhury P., Sarp V., Kilcik A., et al. A non-linear approach to predicting the amplitude and timing of the sunspot area in cycle 25. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. Vol. 513, iss. 3. P. 4152–4158. DOI: [10.1093/mnras/stac1162](https://doi.org/10.1093/mnras/stac1162).

Coban G.C., Raheem A.-u., Cavus H., Asghari-Targhi M. Can solar cycle 25 be a new Dalton minimum? *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, 156. DOI: [10.1007/s11207-021-01906-1](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01906-1).

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 88. P. 529–562. DOI: [10.1023/A:1005160129098](https://doi.org/10.1023/A:1005160129098).

Gopalswamy N., Yashiro S., Xie H., et al. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds during solar cycles 23 and 24. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120, iss. 11. P. 9221–9245. DOI: [10.1002/2015JA021446](https://doi.org/10.1002/2015JA021446).

Gringauz K.I. Some results of experiments in interplanetary space by means of charged particle traps on Soviet space probes. *Proceedings of the Second International Space Science Symposium*. Florence, Italy, 10–14 April 1961. P. 339–553.

Hundhausen A.J. *Coronal Expansion and Solar Wind*; Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1972. XII, 238 p. DOI: [10.1007/978-3-642-65414-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-65414-5).

Javaraiah J. Will solar cycles 25 and 26 be weaker than cycle 24? *Solar Phys.* 2017. Vol. 292, 172. DOI: [10.1007/s11207-017-1197-x](https://doi.org/10.1007/s11207-017-1197-x).

Javaraiah J. Prediction for the amplitude and second maximum of solar cycle 25 and a comparison of the predictions based on strength of polar magnetic field and low-latitude sunspot area. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2023. Vol. 520, iss. 4. P. 5586–5599. DOI: [10.1093/mnras/stad479](https://doi.org/10.1093/mnras/stad479).

King J.H., Papitashvili N.E. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2005. Vol. 110, A02209. DOI: [10.1029/2004JA010649](https://doi.org/10.1029/2004JA010649).

Lamy P., Gilardy H. The state of the white-light corona over the minimum and ascending phases of solar cycle 25 – comparison with past cycles. *Solar Phys.* 2022. Vol. 297, 140. DOI: [10.1007/s11207-022-02057-7](https://doi.org/10.1007/s11207-022-02057-7).

McComas D.J., Angold N., Elliott H.A., et al. Weakest solar wind of the space age and the current “Mini” solar maximum. *Astrophys. J. Lett.* 2013. Vol. 779, 2. DOI: [10.1088/0004-637X/779/1/2](https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/2).

Mursula K., Qvick T., Holappa L., Asikainen T. Magnetic storms during the space age: Occurrence and relation to varying solar activity. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. Vol. 127, iss. 12, e2022JA030830. DOI: [10.1029/2022JA030830](https://doi.org/10.1029/2022JA030830).

Nagovitsyn Y.A., Ivanov V.G. Solar cycle pairing and prediction of cycle 25. *Solar Phys.* 2023. Vol. 298, 37. DOI: [10.1007/s11207-023-02121-w](https://doi.org/10.1007/s11207-023-02121-w).

Neugebauer M., Snyder C.W. The mission of Mariner 2: Planetary observation, solar plasma experiment. *Science*. 1962. Vol. 138. P. 1095–1097.

Peguero J.C., Carrasco V.M.S. A critical comment on “Can Solar Cycle 25 Be a New Dalton Minimum?”. *Solar Phys.* 2023. Vol. 298, 48. DOI: [10.1007/s11207-023-02140-7](https://doi.org/10.1007/s11207-023-02140-7).

Petrovay K. Solar cycle prediction. *Living Reviews in Solar Physics*. 2020. DOI: [10.1007/s41116-020-0022-z](https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z).

Prasad A., Roy S., Sarkar A., et al. An Improved Prediction of Solar Cycle 25 Using Deep Learning Based Neural Network. *Solar Phys.* 2023. Vol. 298, 50. DOI: [10.1007/s11207-023-02129-2](https://doi.org/10.1007/s11207-023-02129-2).

Schwenn R. Solar wind sources and their variations over the solar cycle. *Space Sci. Rev.* 2006. Vol. 124. P. 51–76. DOI: [10.1007/s11214-006-9099-5](https://doi.org/10.1007/s11214-006-9099-5).

Schwenn R. Solar wind sources and their variations over the solar cycle. *Solar Dynamics and Its Effects on the Heliosphere and Earth*. New York: Springer, 2007. P. 51–76. (Space Sciences Series of ISSI. Vol. 22). DOI: [10.1007/978-0-387-69532-7_5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-69532-7_5).

Temmer M. Space weather: The solar perspective. *Living Rev. Solar Phys.* 2021. Vol. 18, 4. DOI: [10.1007/s41116-021-00030-3](https://doi.org/10.1007/s41116-021-00030-3).

Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Zastenker G.N., et al. Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: F review. *Planetary and Space Science*. 2005. Vol. 53, iss. 1-3. P. 189–196. DOI: [10.1016/j.pss.2004.09.044](https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.044).

Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. Catalog of large-scale solar wind phenomena during 1976–2000. *Cosm. Res.* 2009. Vol. 47, no. 2. P. 81–94.

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., et al. Drop of solar wind at the end of the 20th century. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021a. Vol. 126, e2021JA029618. DOI: [10.1029/2021JA029618](https://doi.org/10.1029/2021JA029618).

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., Yermolaev M.Y. Decrease in solar wind parameters after a minimum of 22–23 solar cycles. *Proceedings of the Thirteenth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”*. Primorsko, Bulgaria, 13–17 September 2021. 2021b. Vol. 13. P. 117–121.

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., Yermolaev M.Y. Peculiarities of the heliospheric state and the solar-wind/magnetosphere coupling in the era of weakened solar activity. *Universe*. 2022a. Vol. 8, 495. DOI: [10.3390/universe8100495](https://doi.org/10.3390/universe8100495).

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., et al. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis: 5. Influence of the solar activity decrease. *Universe*. 2022b. Vol. 8, 472. DOI: [10.3390/universe8090472](https://doi.org/10.3390/universe8090472).

Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A. Will solar cycle 25 be similar to cycle 24 according to solar wind observations? *15th Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”*. 5–9 June 2023, Bulgaria. 2023. DOI: [10.13140/RG.2.2.28430.54082](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28430.54082).

Zharkova V., Vasilieva I., Shepherd S., Popova E. Periodicities in solar activity, solar radiation and their links with terrestrial environment. *Natural Science*. 2023. Vol. 15. P. 111–147. DOI: [10.4236/ns.2023.153010](https://doi.org/10.4236/ns.2023.153010).

Zolotova N.V., Ponyavin D.I. Is the new Grand minimum in progress? *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119. P. 3281–3285. DOI: [10.1002/2013JA019751](https://doi.org/10.1002/2013JA019751).

URL: <http://www.iki.rssi.ru/pub/omni> (дата обращения 26 июня 2023 г.).

URL: https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni (дата обращения 26 июня 2023 г.).

Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Хохлачев А.А., Ермолаев М.Ю., Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Бородкова Н.Л., Сапунова О.В., Москалева А.В. Параметры солнечного ветра на фазе роста 25-го солнечного цикла: сходства и различия с 23-м и 24-м солнечными циклами. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 63–70. DOI: [10.12737/szf-94202307](https://doi.org/10.12737/szf-94202307).