

УДК 523.9.377

М. И. Рябов¹, С. А. Лукашук²

¹Одеська обсерваторія «УРАН-4» Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України

²Кафедра астрономії фізичного факультету Одеського національного університету ім. І. І. Мечнікова

ХАРАКТЕРИСТИКИ 23-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА И РОЛЬ КОМПЛЕКСОВ АКТИВНОСТИ В РАЗВИТИИ ЕГО ВСПЫШЕЧНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ

Розглянуто основні характеристики динаміки 23-го циклу сонячної активності і роль комплексів активності в розвитку його спалахових проявів. На відміну від традиційного підходу до опису сонячної активності, вважається, що розвиток активності Сонця відбувається незалежно у північній і південній півкулях. У кожній із них формуються «широтні» зони утворення комплексів активності. При цьому найбільш могутні прояви спалахової активності реалізуються з утворенням «довготних» комплексів активності, які «перезамикають» центри активності північної і південної півкуль. На основі окремого розгляду активності північної і південної півкулі визначені основні фази розвитку сонячного циклу. Складено каталог проявів комплексів активності з використанням даних середньомісячних значень чисел Вольфа W , площ S груп плям і спалахового індексу FI .

ВВЕДЕНИЕ

Под комплексом активности (КА) понимается существующая на Солнце в течение многих оборотов совокупность нескольких активных областей, объединенных общим магнитным полем. Особое значение КА состоит в том, что они представляют собой основные звенья цепи связывающей локальные поля с глобальной организацией солнечной активности и общим магнитным полем Солнца [1]. Наличие на Солнце двух комплексов усиливает активность каждого из них. Большой комплекс активности живет на Солнце 10–15 оборотов и захватывает как северное, так и южное полушарие. Практически все протонные вспышки сконцентрированы в нескольких «комплексах протонной активности» [1, 4].

Все явления активности на Солнце связаны между собой наличием комплексов активности и составляют часть единого комплекса активности, который состоит в возникновении и эволюции бъектов на Солнце [4].

Комплекс активности является более высокой единицей организации процесса солнечной

активности, чем активные области, из которых он состоит [1]. Вместе с тем он представляет собой непрерывный процесс, в котором отдельные явления происходят либо одновременно, либо обуславливают друг друга при разновременном их появлении. В таком отношении КА напоминает АО как бы большего пространственного и временного масштаба [1]. Таким образом, комплекс активности представляет совокупность нескольких активных областей, магнитное поле которых образует единую топологическую многосвязанную систему магнитных силовых трубок (рис. 1). Как правило, он располагается в пределах протяженной области повышенной радиояркости в миллиметровом диапазоне радиоволн, внутри которой располагаются комплексы активных областей (КАО) и отдельные источники S -составляющей (рис. 2) [6].

Время жизни КА составляет 4–8 кэррингтоновских оборотов Солнца. В некоторых случаях КА включают в себя АО северного и южного полушария, которые взаимосвязаны как через экватор Солнца, так и, вероятно, через подфотосферную его часть. Вместе с тем рентгеновские петли, которые наблюдаются на орбитальных солнечных телескопах SOHO и TRACE, наиболее отчетливо отражают эти связи, но

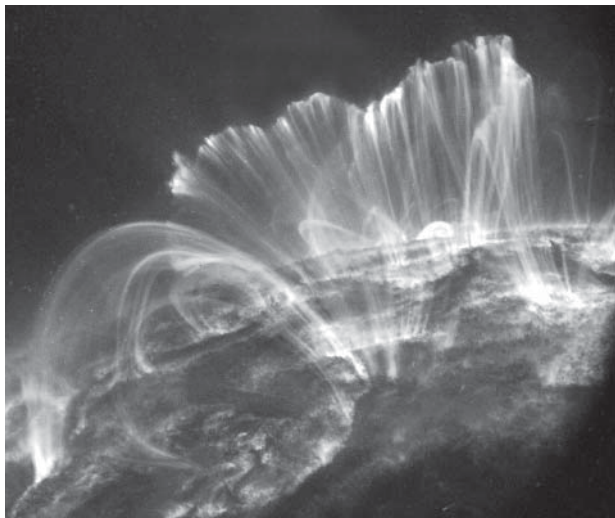


Рис. 1. Комплекс активных областей на Солнце по данным космической обсерватории TRACE

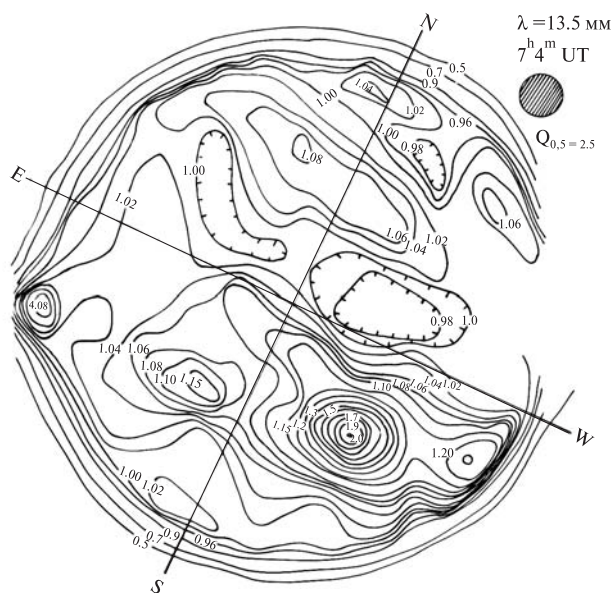


Рис. 2. Карта миллиметрового излучения комплексов активности на Солнце, полученная на РТ-22 КраО в апреле 1979 г.

претерпевают сильные изменения со временем и сохраняются не более суток. Эти изменения были синхронными с изменениями фотосферных магнитных полей лежащих в основании петель. Особенно важным является изучение КА для решения проблемы области реализации солнечных вспышек.

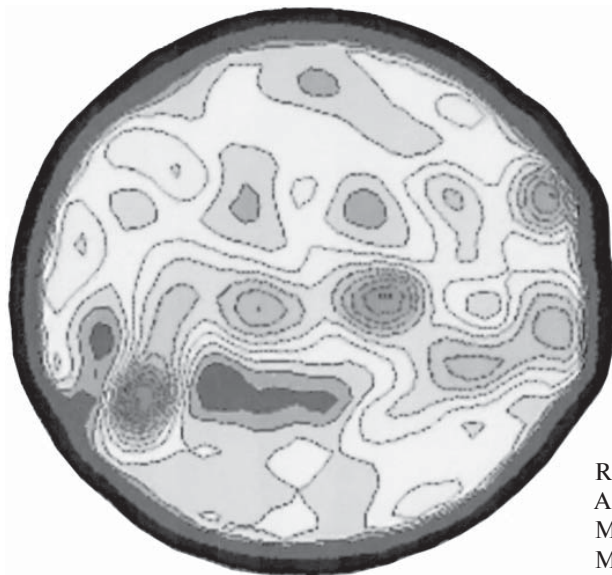


Рис. 3. Карта миллиметрового излучения комплекса активности на Солнце, полученная на РТ-14 Хельсинского университета в мае 2002 г.

КОМПЛЕКСЫ АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ ПО ДАННЫМ МИЛЛИМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Продолжительный мониторинг наблюдений миллиметрового радиоизлучения Солнца проводился на РТ-22 КраО в период с 1967 по 1983 г. на волнах 2, 3, 4, 6, 8, 13 и 17 мм. На картах радиоизображений Солнца на этих длинах волн отчетливо выделяются комплексы активности и комплексы активных областей (КАО) как области повышенного радиоизлучения заполняющего все пространство между активными областями. Пример такого изображения показан на рис. 2. В дальнейшем картографирование Солнца на мм-волнах проводилось на РТ-14 Хельсинского университета в период с 1987 по 2003 г. Пример таких изображений показан на рис. 3.

На основе данных картографирования Солнца на миллиметровых волнах был составлен каталог двух тысяч источников S-составляющей. Расчет множественных корреляционных моделей зависимости параметров источников S-составляющей от соответствующих им групп пятен показал существенную зависимость от числа пятен в группе, площади всей группы пятен

и его головного пятна и градиента продольной составляющей магнитного поля вблизи нулевой линии. Анализ спектров источников построенный на базе этих моделей выявил наибольшую деформацию спектра в диапазоне 13—17 мм в условиях роста градиента магнитного поля перед мощными вспышками [5, 6]. Таким образом, на картах миллиметрового радиоизлучения Солнца возможно выделение крупномасштабных структур (КА и КАО) и определение области накопления энергии, предшествующей солнечной вспышке. Однако данные миллиметрового излучения получались эпизодически, и для выяснения общей картины формирования и развития комплексов активности необходимо использовать более длительные наблюдения интегральных показателей солнечной активности — чисел Вольфа, суммарной площади групп пятен и вспышечного индекса.

АССИМЕТРИЯ АКТИВНОСТИ В РАЗНЫХ ПОЛУШАРИЯХ СОЛНЦА

Анализ рядов чисел Вольфа и суммарной площади групп пятен по каждому полушарию Солнца в отдельности показывает различие форм проявлений их активности. Показатель «асимметрии активности» полушарий определяется как отношение показателей индексов отдельных полушарий или как их разность. Кроме того, оказалось, что в одном цикле активности у одного полушария кривая изменения ежедневной суммарной величины площади пятен одновершинная, а у другого полушария — двухвершинная. Как правило, происходит смена этих кривых в разных полушариях. Так, одновершинные кривые наблюдались в северном полушарии в 14, 15, 17 и 19-м циклах, а в южном в 12, 13, 16, 17, 18-м циклах. Двухвершинные показывают обратную картину. Более того, в пределах одного цикла кривые изменения индекса в разных полушариях смещены один относительно другого. Так, в 20-м цикле развитие цикла в южном полушарии началось на 1.5 года позднее, чем в северном. Различаются отдельные полушария значениями средней широты групп пятен и скоростей вращения полушарий. Так, южное полушарие в 16—18 циклах вращалось на 0.3—0.4° в сутки быстрее,

чем северное. Также несинхронным является изменение знака магнитного поля в полярных шапках вблизи эпохи максимума. Здесь временная задержка может составлять 1—2 года. Причем моменты «переполусовок» сопровождаются появлением максимума на циклической кривой изменения суммарной площади пятен [1].

Установлена связь асимметрии полушарий Солнца с вековым циклом. При этом обнаруживаются такие закономерности:

- на ветви роста векового цикла солнечная активность доминирует в северном полушарии, а на ветви спада — в южном;
- в эпохи максимума и минимума векового цикла асимметрия мала;
- в эпоху максимума векового цикла максимум 11-летнего цикла наступает раньше в южном полушарии, а в эпоху минимума — в северном полушарии.

Однако в 19-м и 20-м циклах северное полушарие было более активным. Таким образом, отмечалась длительная устойчивая асимметрия одного типа, что есть некоторым отклонением от указанных выше закономерностей.

В течение длительного времени с 15-го по 21-й цикл северное полушарие было более активным, чем южное [1, 4]. Природа северо-южной асимметрии остается совершенно неясной. Исследование ее является актуальной задачей [4].

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА 23-ГО ЦИКЛА АКТИВНОСТИ

Основные свойства 23-го цикла рассмотрены нами на основе широко известных индексов солнечной активности — чисел Вольфа W , суммарной площади групп пятен S (измеряется в миллионных долях поверхности Солнца), вспышечного индекса FI .

Для выявления основных характеристик вспышечной активности использовались данные каталога вспышек NGDC (National Geophysical Data Center). Ежедневный вспышечный индекс FI для каждой вспышки определяет величину

$$Q = i \cdot t,$$

где t — продолжительность вспышки в минутах, i — весовой множитель, зависящий от балла вспышки. Для субвспышки и вспышек баллов

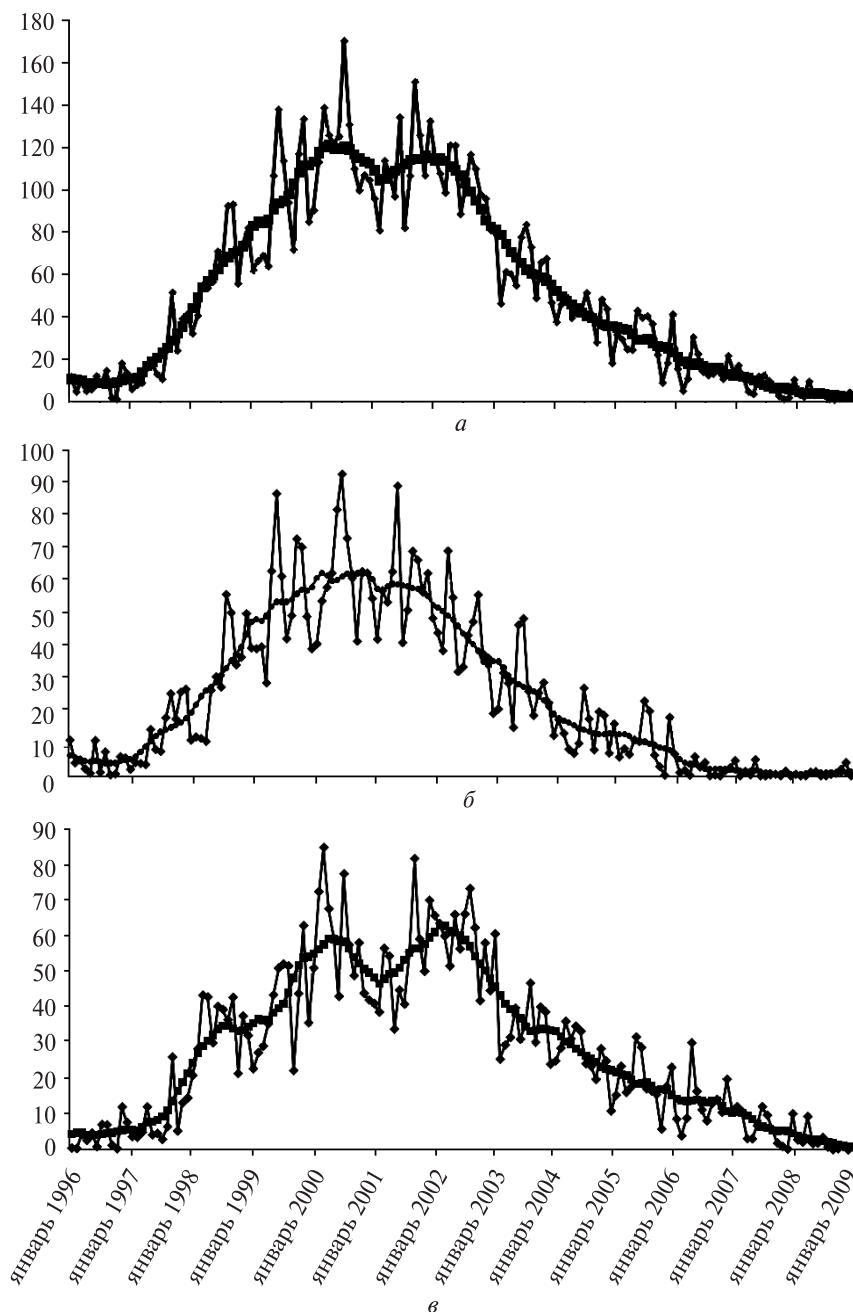


Рис. 4. Вариации среднемесячных чисел Вольфа W и их сглаженных значений на протяжении 23-го цикла солнечной активности: *a* — традиционное представление, *б* — для северного полушария, *в* — для южного полушария

1—4 множитель i равняется 0,5, 1,0—1,5, 2,0—2,5, 3,0—3,5 и 4,0 соответственно. В обсерватории Кандилли (Турция) проводятся расчеты ежедневных и среднемесячных величин вспыхивающего ин-

декса как для всего диска Солнца, так и отдельно для северного и южного полушария [7].

В большинстве центров прогнозов солнечной активности используется представление о

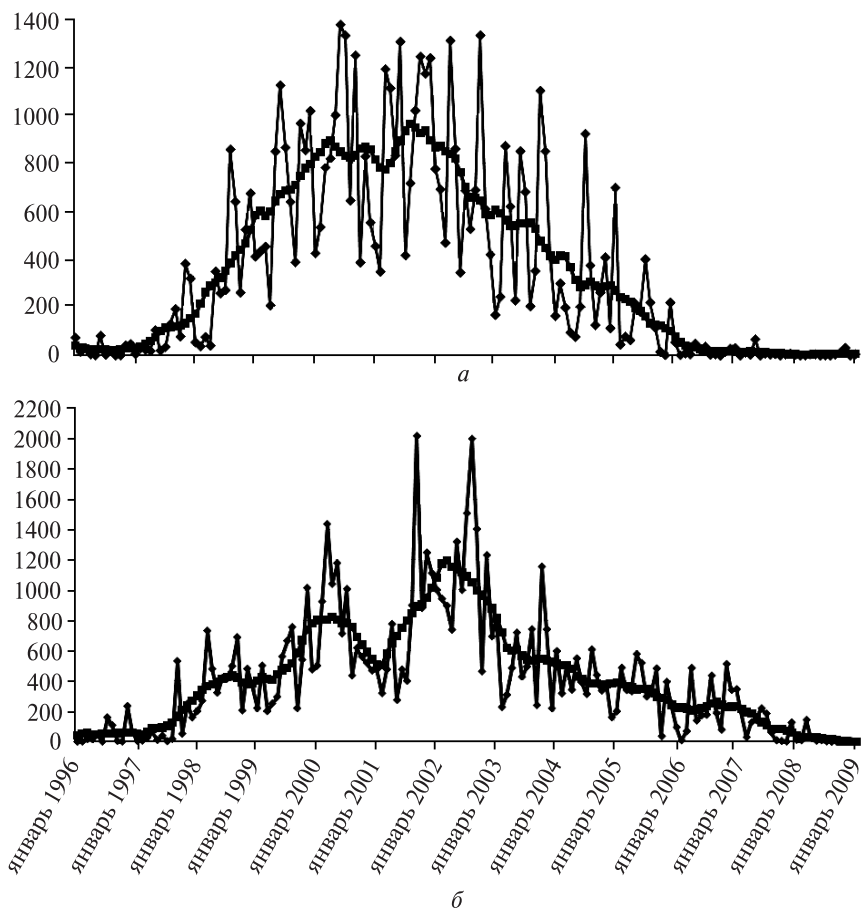


Рис. 5. Вариации среднемесячных значений площадей S групп пятен и их сглаженных значений на протяжении 23-го цикла солнечной активности: a — для северного полушария, b — для южного полушария

развитии солнечного цикла только по данным среднемесячных величин чисел Вольфа и их сглаженных величин, определяемых методом скользящего сглаживания за 12 месяцев (рис. 4, a) [3]. По этим данным определены основные характеристики 23-го цикла, включающие фазу роста, фазу максимума, фазу спада цикла, фазу минимума и наличие 1-го и 2-го максимума (см. табл. 1) [3].

В таком представлении отмечается наличие двух максимумов в апреле 2000 г. и ноябре 2001 г. Однако такое отображение свойств солнечного цикла является далеко не полным. В какой степени представление 23-го цикла по среднемесячным числам Вольфа для всего диска отличается

Таблица 1. Характеристики 23-го цикла по сглаженным среднемесячным значениям W для всего Солнца

Фаза	Дата
Начало цикла	Май 1996 г.
Фаза роста цикла	Сентябрь 1997 г. — сентябрь 1999 г.
Фаза максимума цикла	Октябрь 1999 г. — июнь 2002 г.
Фаза спада цикла	Июнь 2002 г. — июль 2006 г.
Фаза минимума	Июль 2006 г. — по настоящее время
Первый максимум	Апрель 2000 г. ($W = 120.7$)
Второй максимум	Ноябрь 2001 г. ($W = 115.8$)

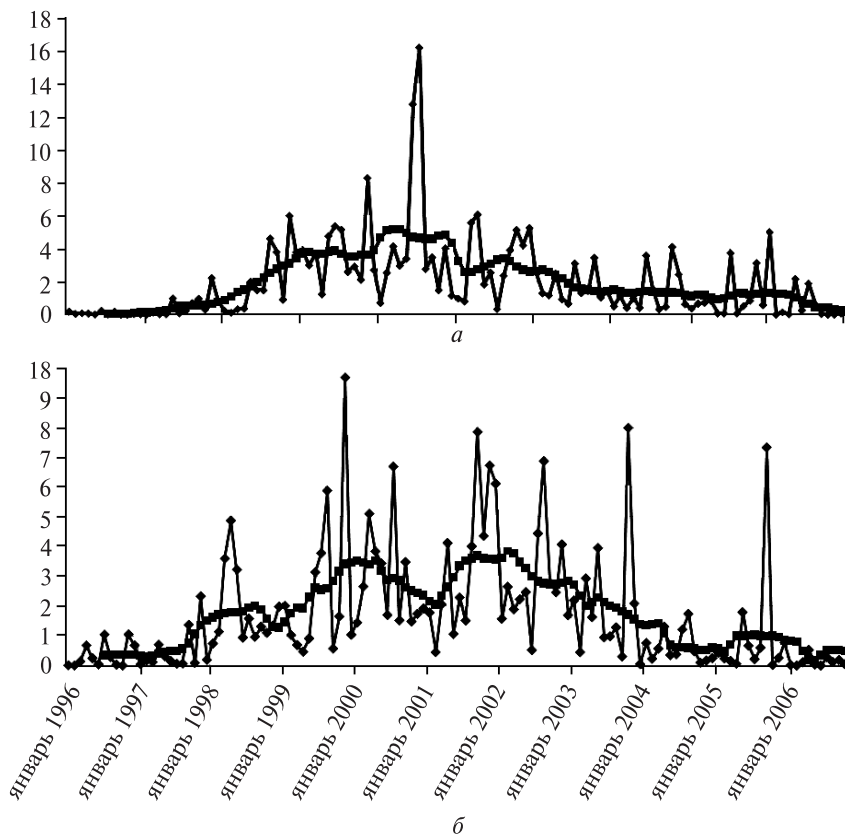


Рис. 6. Вариации среднемесячных значений вспышечного индекса FI и их сглаженных значений на протяжении 23-го цикла солнечной активности: a — для северного полушария, b — для южного полушария

от его представлений для северного и южного полушария, хорошо видно из сравнения рис. 4, a — b . Не менее представительным являются данные о среднемесячных величинах суммарных площадей пятен и величин вспышечного индекса (рис. 5, 6).

Из рисунков и табл. 2 видно, что изменение сглаженных среднемесячных величин чисел Вольфа W и суммарной площади S групп пятен для южного полушария обладает двумя четко выраженными максимумами и хорошо выраженными переходами от эпохи роста к эпохе максимума цикла и от максимума цикла к эпохе его спада. Развитие активности в северном полушарии происходило более гладким образом, хотя здесь подозревается наличие трех максимумов по сглаженным данным всех исследуемых индексов.

Полученные данные более точно представляют физику солнечного цикла как одновременное и независимое развитие активности северного и южного полушария Солнца. Традиционно применяемые интегральные данные по всему диску по своей сути являются суммарным статистическим результатом. Приведенные в табл. 2 даты наступления различных фаз активности получены из субъективных оценок и безусловно требуют в дальнейшем более точного обоснования. Кроме того, в результате сглаживания положения основных максимумов солнечного цикла оказываются смещенными относительно флуктуаций среднемесячных величин исследуемых индексов. Реальные проявления максимумов активности проявляются в виде максимумов среднемесячных величин флуктуационных индексов, которые непосредственным образом

Таблица 2. Основные фазы цикла активности северного и южного полушарий Солнца

Фаза цикла	Даты		
	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>FI</i>
СЕВЕРНОЕ ПОЛУШАРИЕ			
Фаза роста цикла	Март 1997 г. — январь 1999 г.	Январь 1997 г. — февраль 1999 г.	Октябрь 1997 г. — октябрь 1998 г.
Фаза максимума цикла	Март 1999 г. — ноябрь 2002 г.	Апрель 1999 г. — июль 2003 г.	Ноябрь 1998 г. — февраль 2002 г.
Фаза спада цикла	Март 2003 г. — июль 2006 г.	Август 2003 г. — май 2006 г.	Февраль 2002 г. — август 2005 г.
Фаза минимума	Июль 2006 г.	сентябрь 2004 г. — по настоящее время	Август 2005 г. — по настоящее время
Первый максимум	Март 2000 г. (<i>W</i> = 62)	Апрель 2000 г. (<i>S</i> = 894)	Март 2000 г. (<i>FI</i> = 5.2)
Второй максимум	Август — декабрь 2000 г. (<i>W</i> = 62)	Ноябрь 2000 г. (<i>S</i> = 868)	Ноябрь 2000 г. (<i>FI</i> = 4.8)
Третий максимум	Май — ноябрь 2001 г. (<i>W</i> = 59 — 585)	Август 2001 г. (<i>S</i> = 964)	Август 2001 г. (<i>FI</i> = 3.4)
ЮЖНОЕ ПОЛУШАРИЕ			
Фаза роста цикла	Март 1997 г. — январь 1999 г.	Март 1997 г. — июль 1998 г.	Август 1997 г. — май 1998 г.
Фаза максимума цикла	Апрель 1999 г. — август 2003 г.	Март 1999 — июль 2003 г.	Март 1999 г. — март 2003 г.
Фаза спада цикла	Январь 2004 г. — июль 2008 г.	Февраль 2004 г. — август 2007 г.	Май 2003 г. — апрель 2006 г.
Фаза минимума	Июль 2008 г.	Август 2007 г. — по настоящее время	Апрель 2006 г. — по настоящее время
Первый максимум	Апрель 2000 г. (<i>W</i> = 59)	Апрель 2000 г. (<i>S</i> = 825.7)	Январь — апрель 2000 г. (<i>FI</i> = 3.5)
Второй максимум	Февраль — март 2002 г. (<i>W</i> = 63)	Март 2002 г. (<i>S</i> = 1198)	Сентябрь 2001 г. (<i>FI</i> = 3.7)
Третий максимум			Февраль 2002 г. (<i>FI</i> = 3.9)

связаны с проявлением комплексов активности на Солнце [3].

ВЫЯВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ИНДЕКСОВ

На основании данных максимальных величин флуктуаций среднемесячных величин основных индексов солнечной активности составлен каталог таких комплексов в 23-м цикле активности с указанием даты максимума индекса и его величины.

В табл. 3 данные о комплексах приведены отдельно для северного и южного полушария по среднемесячным значениям каждого из исследуемых индексов (*W*, *S*, *FI*).

В целом отмечается хорошее совпадение выявленных комплексов активности по различным индексам. В ряде случаев отмечается одновре-

менное появление комплексов активности в северном и южном полушарии. При этом следует обратить внимание, что флуктуации суммарной площади групп пятен в большей степени соответствуют последующему усилению вспышечной активности, чем данные о флуктуации величин чисел Вольфа.

В этом плане показательным примером является экстремальное состояние солнечной активности в октябре 2003 г., когда усиление солнечной активности произошло одновременно в северном и южном полушарии. Возможно, неодновременное усиление отдельных индексов связано с различием фаз процессов генерирующих локальные магнитные поля. Увеличение количества групп пятен, отображаемых индексами *W*, *S*, и энерговыделение, определяемое вспышечным индексом *FI*, происходят на опре-

Таблица 3. Список комплексов активности на Солнце в 23-м цикле активности для северного и южного полушарий по данным среднемесячных значений чисел Вольфа *W*, площадей *S* групп пятен, вспышечного индекса *FI* (указаны максимальные значения индексов в комплексе)

Эпоха	Северное полушарие			Южное полушарие		
	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>FI</i>	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>FI</i>
1997	Сентябрь 26 Декабрь 27	Ноябрь 383		Сентябрь 26	Сентябрь 532	Ноябрь 2
1998	Август 56 Декабрь 50	Август 859 Декабрь 676	Август 5 Ноябрь 6	Март—апрель 43 Сентябрь 43	Март 733 Сентябрь 690	Апрель 5
1999	Июнь 87 Октябрь 73	Июнь 1128 Октябрь 968 Декабрь 1020	Июнь 5 Ноябрь 10	Июль 52 Ноябрь 63	Август 756 Ноябрь 1016	Август 6 Ноябрь 10
2000	Июль 93	Июнь 1380 Сентябрь 1252	Март 4 Июль 16 Ноябрь 4	Март 85 Июль 77	Март 1438 Май 1179 Июль 1008	Март 5
2001	Июнь 89 Сентябрь 69	Март 1194 Июнь 1308 Октябрь 1246 Декабрь 1241	Март 6 Апрель 6 Октябрь 4 Декабрь 5	Сентябрь 82 Декабрь 70	Сентябрь 2018	Апрель 4 Сентябрь 8 Ноябрь 7
2002	Апрель 69 Октябрь 56	Апрель 1314 Октябрь 1335	Октябрь 3	Май 66 Август 73 Ноябрь 58	Август 2000 Ноябрь 1232	Август 7
2003	Июнь—июль 46 Ноябрь 29	Март 874 Июнь 852 Октябрь 1104	Июнь 4 Октябрь 8	Январь 62 Август 47 Октябрь — ноябрь 40	Октябрь 1157	Октябрь 8
2004	Июль 27 Октябрь—ноябрь 20	Июль 925	Июль 4 Ноябрь 3	Март 33 Октябрь 28	Август 610	Август 2
2005	Июль—август 23 Декабрь 18	Январь 700 Июль 401 Декабрь 221	Январь 5	Май 32 Декабрь 23	Февраль 488 Май 578 Сентябрь 484 Ноябрь 513	Май 2 Сентябрь 7
2006				Апрель 30 Ноябрь 20	Апрель 486 Август 436 Ноябрь 513	

деленных, не всегда совпадающих этапах развития комплексов активности.

ВЫВОДЫ

1. Выявление комплексов активности на Солнце в 23-м цикле активности возможно по данным флуктуаций основных индексов активности, таких как числа пятен, площади групп пятен и вспышечный индекс.

2. Основными процессами, определяющими ход развития 23-го цикла активности (а возможно, и всех предшествующих), является развитие цикла в отдельности в северном и южном полушарии.

3. Основные фазы развития солнечного цикла (роста, максимума, спада) отчетливо проявляются при самостоятельном рассмотрении активности северного и южного полушария.

4. Ход развития 23-го солнечного цикла в южном полушарии запаздывал по отношению к северному полушарию, второй максимум активности в южном полушарии был выше первого.

5. Рассмотрение максимальных величин флуктуаций индексов дает более точное представление о периодах максимального проявления солнечной активности, которые в северном и южном полушарии, как правило, не одновременны.

6. Полученный каталог «комплексов активности», выявленных по среднемесячным значениям основных индексов показывает наличие как «широтных» комплексов в каждом полушарии в отдельности, так и появление «долготных» комплексов в 23-м цикле активности, объединяющих процессы активности обоих полушарий.

Полученные результаты по выявлению комплексов активности на Солнце по среднемесячным значениям индексов активности являются только «первым приближением». Более точные данные о комплексах активности могут быть получены по ежедневным величинам индексов.

1. *Витинский Ю. И., Копецкий М., Куклин Г. В.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. — М.: Наука, 1986. — 296 с.
2. *Витинский Ю. И., Оль А. И., Сазонов Б. И.* Солнце и атмосфера Земли. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. —
3. *Ишков В. Н.* Солнце в минимуме активности 2005—2006 годов // Одесский астрономический календарь. — Одесса: Астропринт, 2007. — С. 190—199.
4. *Обридко В. Н.* Солнечные пятна и комплексы активности. — М.: Наука, 1985. — 256 с.
5. *Рябов М. И.* Использование спектра миллиметрового излучения локальных источников на Солнце как критерия прогноза активности // Солнечная активность. — Алма-Ата: Наука, 1983. — С. 177—181.
6. *Рябов М. И., Ишков В. Н., Мусеев И. Г. и др.* Использование данных о миллиметровом излучении локальных источников на Солнце как индикатора эволюции центра активности // Солнечные магнитные поля и корона: Тр. XIII консультативного совещания по физике Солнца. — Новосибирск, 1989. — С. 239—242.
7. *Atac T., Ozguc A.*: Flare Index of Solar Cycle 22 // Solar Phys. — 1999. — **180**, N 1–2. — P. 397—407.

Надійшла до редакції 01.10.09

M. I. Ryabov, S. A. Lukashuk

SOME CHARACTERISTICS OF THE 23-RD SOLAR CYCLE AND A ROLE OF ACTIVITY COMPLEXES IN THE EVOLUTION OF ITS FLARE PROCESSES

We consider the basic properties of the dynamics of the 23-rd cycle of solar activity and a role of complexes of activity (CA) and complexes of active regions (CAR) in its development. It is suggested that the development of solar activity occurs independently in the northern and southern hemispheres in which «latitude» zones of the CA and CAR formation are generated. The most powerful displays of the flare activity are realized with the formation of «longitude» CA reconnecting the activity centers of northern and southern hemispheres. The basic periods of formation of the activity centers for various phases of a solar cycle are determined. Spatial characteristics of the CA and CAR are derived with the use of daily and monthly average values for the Wolf numbers, areas of sunspot groups and flare index.