

Основные свойства 23-го цикла солнечной активности и роль комплексов активности в его развитии

М.И. Рябов¹, С.А. Лукашук²

¹Одесская обсерватория «УРАН-4» Радиоастрономического института НАНУ

²Кафедра астрономии физического факультета Одесского национального университета им. И.И.Мечникова

Рассмотрены основные свойства динамики развития 23-го цикла солнечной активности и роль в его развитии комплексов активности (КА) и комплексов активных областей (КАО). Показано, что развитие активности Солнца происходит независимо в северном и южном полушариях, в которых формируются «широтные» зоны формирования КА и КАО. Наиболее мощные проявления вспышечной активности реализуются с образованием «долготных» КА, «перезамыкающих» центры проявления активности северного и южного полушария. Определены основные периоды формирования центров активности на различных фазах солнечного цикла и пространственные характеристики КА и КАО с использованием данных ежедневных и среднемесячных значений чисел Вольфа (W), площадей групп пятен и вспышечного индекса.

ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ДИНАМІКИ 23-ГО ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ ТА РОЛЬ КОМПЛЕКСІВ АКТИВНОСТІ У ЙОГО РОЗВИТКУ, Рябов М.І., Лукашук С.А. — Розглянуто основні властивості динаміки розвитку 23-го циклу сонячної активності та роль у його розвитку комплексів активності (КА) та комплексів активних областей (КАО). Показано, що розвиток активності Сонця відбувається незалежно в північній і південній півкулях, у яких формуються «широтні» зони формування КА та КАО. Найбільш потужні прояви спалахової активності реалізуються з утворенням «довготних» КА, що «перезамикать» центри прояву активності північної і південної півкулі. Визначено основні періоди формування центрів активності на різних фазах сонячного циклу і просторові характеристики КА та КАО з використанням даних щоденних і середньомісячних значень чисел Вольфа (W), площ груп плям і спалахового індексу.

THE BASIC PROPERTIES OF DYNAMICS OF 23-RD CYCLE OF SOLAR ACTIVITY AND ROLE OF COMPLEXES OF ACTIVITY IN ITS DEVELOPMENT, by Ryabov M.I., Lukashuk S.A. — The basic properties of dynamics of development of 23-rd cycle of solar activity and role in its development of complexes of activity (CA) and complexes of active regions (CAR) are considered. It is shown, that development of activity of the Sun occurs independently in northern and southern hemispheres in which are formed "latitude" zones of formation CA and CAR. The most powerful displays flare activity are realized with formation "longitude" CA reconnection the centers of activity of northern and southern hemisphere. The basic periods of formation of the centers of activity on various phases of a solar cycle and spatial characteristics CA and CAR from uses of the given daily and monthly average values of Wolf numbers (W), the areas of sunspot groups (S) and flare index (FI).

1. ВВЕДЕНИЕ

Под комплексом активности (КА) понимается совокупность нескольких активных областей, объединенных общим магнитным полем и существующую на Солнце в течение многих оборотов. 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 существует на Солнце 10-15 оборотов и захватывает как северное, так и южное полушарие. Практически все протонные вспышки сконцентрированы в нескольких «комплексах протонной активности» [1,2].

Комплекс активности — это совокупность нескольких активных областей, объединенных общим магнитным полем, существующих на Солнце в течение многих оборотов.

Все явления активности на Солнце связаны между собой существованием комплексов активности и существуют как часть единого комплекса активности, и именно этот комплекс определяет собой характеристики возникновения и эволюции объектов на Солнце [1].

Комплекс активности является более высокой единицей организации процесса солнечной активности чем активные области из которых он состоит [2]. 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 [2]. Таким образом комплекс активности представляет совокупность нескольких активных областей магнитное поле которых образует единую топологическую

многосвязную систему магнитных силовых трубок. 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-компоненты [3].

Время существования 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 наблюдались на орбитальных солнечных телескопах SOHO и TRACE наиболее отчетливо отражают эти связи, но претерпевают сильные изменения со временем и сохраняются не более суток. Причем 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.

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 (КА) и комплексы активных областей (КАО) как области повышенного радиоизлучения заполняющего все пространство между активными областями. Пример такого изображения показан на рис.1.

В последующем картографирование Солнца на миллиметровых волнах проводилось на РТ-14 Хельсинского университета в период с 1987 по 2003. Пример таких изображений показан на рис.2.

На основе данных картографирования Солнца на миллиметровых волнах был составлен каталог 2 тысяч источников S-компоненты.

Расчет множественных корреляционных моделей зависимости параметров источников S-компоненты от соответствующих 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 [7,8]. Таким образом, на картах миллиметрового радиоизлуче-

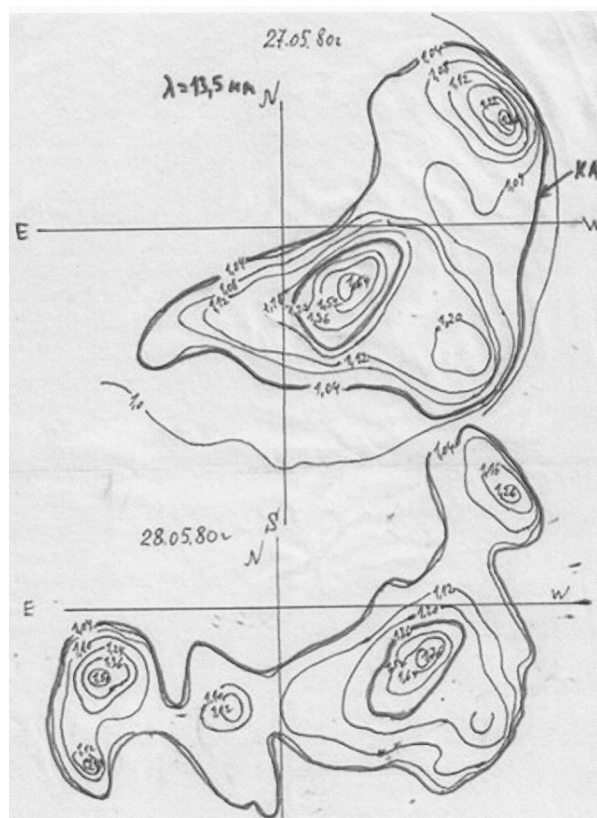


Рис. 1. Карта миллиметрового излучения комплексов активности на Солнце полученная на РТ-22 КраО в мае 1980 г.



Рис. 2. Карта миллиметрового излучения комплекса активности на Солнце полученная на РТ-14 Хельсинского университета в мае 2002 г.

ния Солнца возможно выделение крупномасштабных структур — КА и КАО и определение области максимального энерговыделения предшествующего 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 таких как числа Вольфа, суммарная площадь групп пятен и данные о вспышечном индексе.

2. АССИМЕТРИЯ АКТИВНОСТИ ПО ПОЛУШАРИЯМ СОЛНЦА

Анализ данных по индексам числа Вольфа и суммарной площади групп пятен по каждому полушарию Солнца в отдельности показывает различие форм проявлений их активности. Существует даже характеристика «асимметрии активности» полушарий определяемая как величина отношений показателей индексов отдельных полушарий или как величина их разности. 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 циклах, а в южном в 12, 13, 16, 17, 18 циклах. Соответственно 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 и по

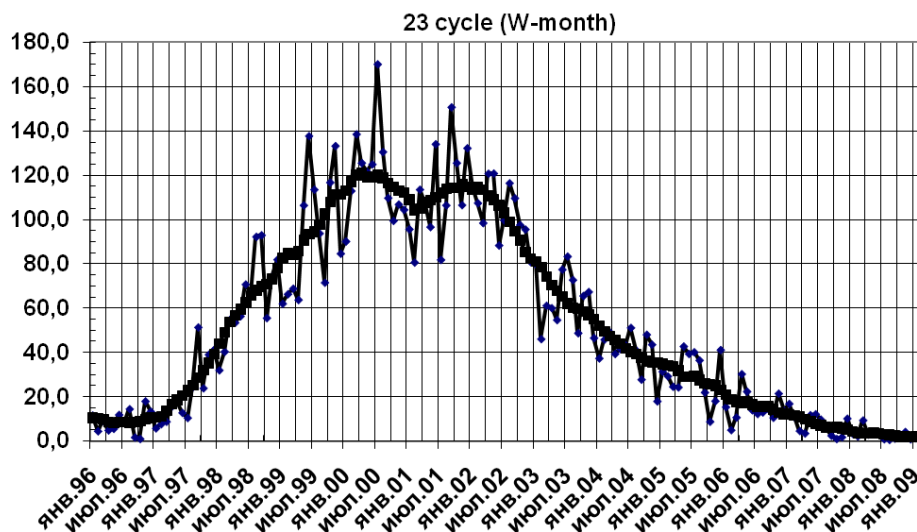


Рис. 3. Традиционное представление 23-го цикла солнечной активности на основе среднемесячных чисел Вольфа и его сглаженных значений

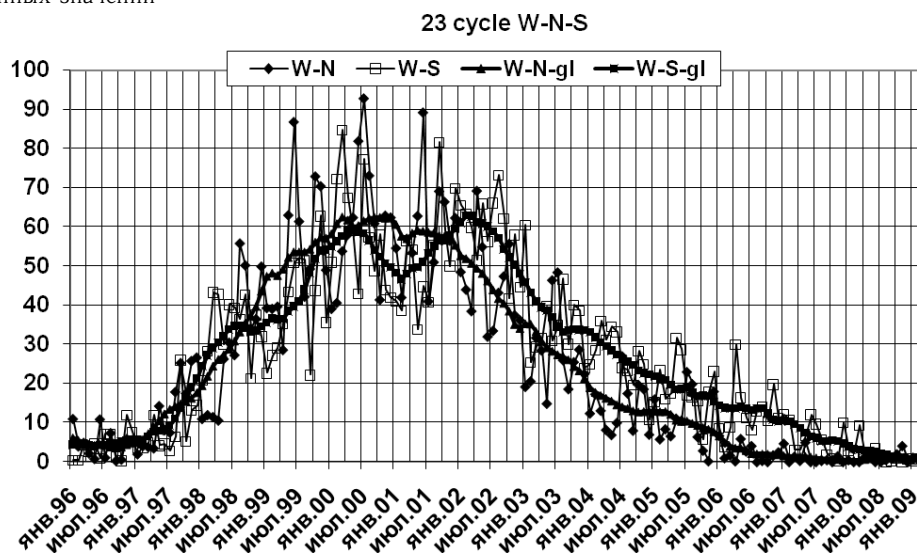


Рис. 4. 23-й цикл солнечной активности по среднемесячным данным W для северного и южного полушария Солнца и их сглаженных величин

средним широтам групп пятен, в различии скоростей вращения полушарий. Так южное полушарие в 16–18 циклах вращалось на 0.3–0.4 градуса 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 «переполюсовок» сопровождаются появлением максимума на циклической кривой изменения суммарной площади пятен.

Установлена связь ассиметрии 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 ассиметрия мала;
- в эпоху максимума векового цикла максимум 11-летнего цикла наступает раньше в южном полушарии, а в эпоху минимума в северном полушарии.

Однако в 19–20 циклах северное полушарие было более активным, таким образом отмечалось длительная устойчивая ассиметрия одного типа, что представляет собой некоторое нарушение указанных выше закономерностей.

В течении длительного времени с 15 по 21 цикл северное полушарие было более активным чем южное [1,2]. Природа северо-южной ассиметрии остается совершенно не ясной. Исследование ее является актуальной задачей.

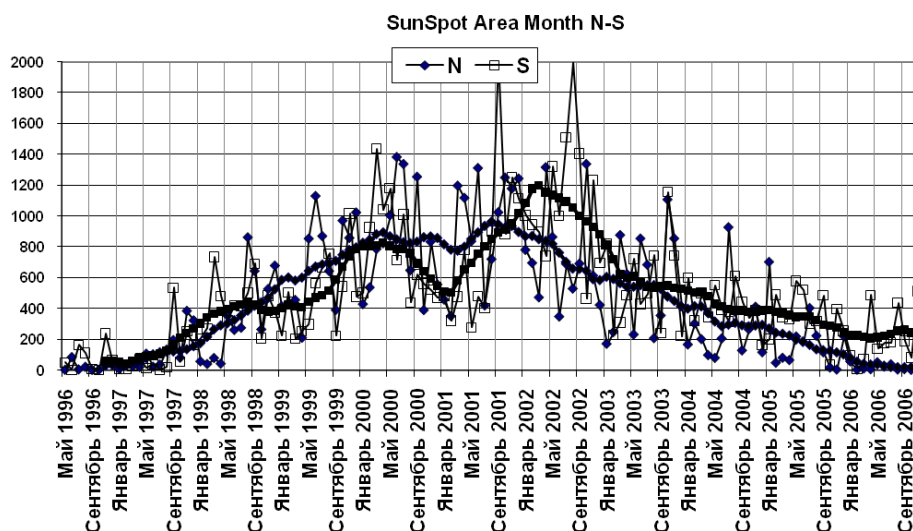


Рис. 5. 23-й цикл солнечной активности по данным среднемесячным величинам площадей групп пятен для северного и южного полушария и их сглаженных величин

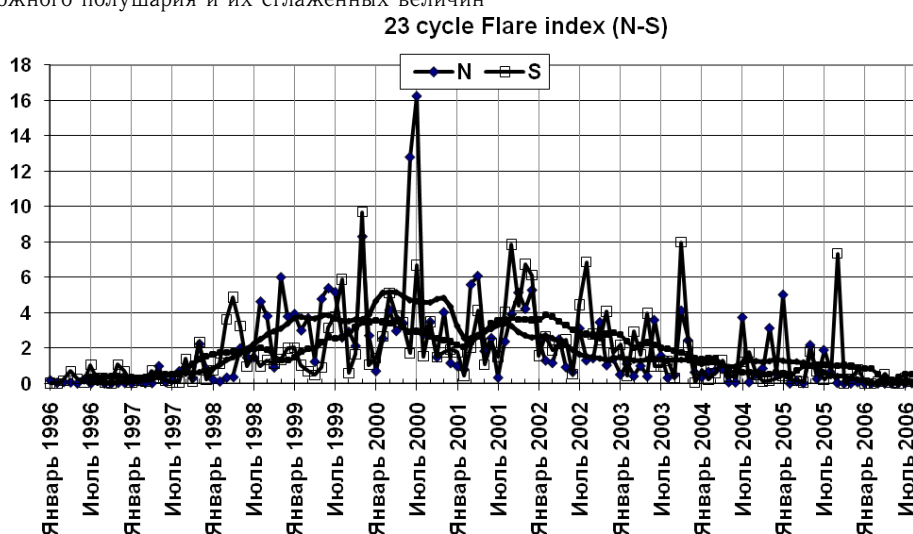


Рис. 6. 23-й цикл солнечной активности по данным среднемесячных величин вспышечного индекса для северного и южного полушария и их сглаженных значений

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

Начало цикла	Май 1996
Фаза роста цикла	Сентябрь 1997 – Сентябрь 1999
Фаза максимума цикла	Октябрь 1999 – июнь 2002
Фаза спада цикла	Июнь 2002 – июль 2006
Фаза минимума	Июль 2006 – по настоящее время
1-й максимум	Апрель 2000 ($W = 120,7$)
2-й максимум	Ноябрь 2001 ($W = 115,8$)

Таблица 2. Основные фазы цикла активности северного полушария Солнца

Фаза цикла	Основные даты для северного полушария (W)	Основные даты для северного полушария (S)	Основные даты для северного полушария (FI)
Фаза роста цикла	март 1997 – январь 1999	январь 1997 – февраль 1999	октябрь 1997 – октябрь 1998
Фаза максимума цикла	март 1999 – ноябрь 2002	апрель 1999 – июль 2003	ноябрь 1998 – февраль 2002
Фаза спада цикла	март 2003 – июль 2006	август 2003 – май 2006	февраль 2002 – август 2005
Фаза минимума	июль 2006	сентябрь 2004 – по наст.вр	август 2005 – по наст.вр.
1-й максимум	март 2000 ($W = 62,4$)	апрель 2000 ($S = 894,7$)	март 2000 ($FI = 5,16$)
2-й максимум	август–декабрь 2000 ($W = 62,1 – 62,4$)	ноябрь 2000 ($S = 868,2$)	ноябрь 2000 ($FI = 4,83$)
3-й максимум	май–ноябрь 2001 ($W = 59,0 – 57,5$)	август 2001 ($S = 964,3$)	Август 2001 ($FI = 3,4$)

Таблица 3. Основные фазы цикла активности южного полушария Солнца

Фаза цикла	Основные даты для южного полушария (W)	Основные даты для южного полушария (S)	Основные даты для южного полушария (FI)
Фаза роста цикла	март 1997 – январь 1999	март 1997 – июль 1998	август 1997 – май 1998
Фаза максимума цикла	апрель 1999 – август 2003	март 1999 – июль 2003	март 1999 – март 2003
Фаза спада цикла	январь 2004 – июль 2008	февраль 2004 – август 2007	май 2003 – апрель 2006
Фаза минимума	июль 2008	август 2007 – по наст.вр.	апрель 2006 – по наст.вр.
1-й максимум	апрель 2000 ($W = 59,2$)	апрель 2000 ($S = 825,7$)	январь–апрель 2000 ($FI = 3,5$)
2-й максимум	февраль – март 2002 ($W = 62,8 – 62,7$)	март 2002 ($S = 1197,5$)	сентябрь 2001 ($FI = 3,69$)
3-й максимум			февраль 2002 ($FI = 3,86$)

3. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА 23-ГО ЦИКЛА АКТИВНОСТИ

Основные свойства 23-го цикла рассмотрены нами на основе широко известных индексов солнечной активности таких как числа Вольфа W . Суммарная величина площади групп пятен S (измеряется в миллионных долях поверхности Солнца) и по величине вспышечного индекса FI .

Для выявления основных характеристик вспышечной активности использовались данные каталога вспышек NGDC (National Geophysical Data Center). Для оценки вспышечной активности Клечечком в 1952 году был предложен расчет ежедневного вспышечного индекса FI , который для каждой вспышки определяет величину

$$Q = (i \times t),$$

где i – весовой множитель, зависящий от балла вспышки (для субвспышек $i = 0,5$, балла 1 – $i = 1,0 – 1,5$, балла 2 – $i = 2,0 – 2,5$, балла 3 – $i = 3,0 – 3,5$, балла 4 – $i = 4,0$); t – продолжительность вспышки в минутах [4].

В обсерватории в Кандили (Турция) проводятся расчеты ежедневных и среднемесячных величин вспышечного индекса как для всего диска Солнца, так и отдельно для северного и южного полушария за период с 21 по 23 циклы активности [5].

В большинстве центров прогнозов солнечной активности ограничиваются представлением о развитии солнечного цикла только по данным среднемесячных величин чисел Вольфа и их сглаженных величинах определяемых методом скользящего сглаживания за 12 месяцев [4] (см.рис.3).

По этим данным определены основные характеристики 23-го цикла включающие фазу роста, фазу максимума, фаза спада цикла, фаза минимума и наличие 1-го и 2-го максимума (см. табл.1) [9]

В таком представлении отмечается наличие двух максимумов в апреле 2000 года и ноябре 2001 года.

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 от его представлений для северного и южного полушария хорошо видно из сравнения

Таблица 4. Характеристики 23-го цикла по сглаженным среднемесячным данным W для всего Солнца

Год	$W - N$	$W - S$	Spots area N	Spots area S	Flare ind. N	Flare ind. S
1997	сентябрь – 26 декабрь – 26.7	сентябрь – 26	ноябрь – 383	сентябрь – 532		ноябрь – 2
1998	август – 56 декабрь – 50	март–апрель – 43 сентябрь – 43	август – 859 декабрь – 676	март – 733 сентябрь – 690	август – 5 ноябрь – 6	апрель – 5
1999	июнь – 87 октябрь – 73	июль – 52 ноябрь – 63	июнь – 1128 октябрь – 968 декабрь – 1020	август – 756 ноябрь – 1016	июнь – 5 ноябрь – 10	август – 6 ноябрь – 10
2000	июль – 93	март – 85 июль – 77	июнь – 1380 сентябрь – 1252	март – 1438 май – 1179 июль – 1008	март – 4 июль – 16 ноябрь – 4	март – 5
2001	июнь – 89 сентябрь – 69	сентябрь – 82 декабрь – 70 октябрь – 1246	март – 1194 июнь – 1308 декабрь – 1241	сентябрь – 2018 октябрь – 4	март – 6 апрель – 6 ноябрь – 7 декабрь – 5	апрель – 4 сентябрь – 8
2002	апрель – 69 октябрь – 56	май – 66 август – 73 ноябрь – 58	апрель – 1314 октябрь – 1335	август – 2000 ноябрь – 1232	октябрь – 3	август – 7
2003	июнь–июль – 46 ноябрь – 29	январь – 62 август – 47 октябрь–ноябрь – 40	март – 874 июнь – 852 октябрь – 1104	октябрь – 1157	июнь – 4 октябрь – 8	октябрь – 8
2004	июль – 27 октябрь–ноябрь – 20	март – 33 октябрь – 28	июль – 925	август – 610	июль – 4 ноябрь – 3	август – 2
2005	июль–август – 23 декабрь – 18	май – 32 декабрь – 23	январь – 700 июль – 401 декабрь – 221	февраль – 488 май – 578 сентябрь – 484 ноябрь – 513	январь – 5	май – 2 сентябрь – 7
2006		апрель – 30 ноябрь – 20		апрель – 486 август – 436 ноябрь – 513		

рис. 3–4. Не менее представительным являются данные о среднемесячных величинах суммарных площадей пятен и величин вспышечного индекса (см. рис. 5–6).

Из представленных рисунков и итоговых таблиц 2–3 видно, что изменение сглаженных среднемесячных величин чисел Вольфа W и суммарной площади групп пятен S 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 подозреваются наличие даже трех совпадающих максимумов по сглаженным данным всех исследуемых индексов.

Полученные данные более точным образом представляют физику солнечного цикла как одновременное и независимое развитие активности северного и юного полушария Солнца, чем традиционно применяемые интегральные данные по всему диску, которые по своей сути являются статистическим суммарным результатом.

Вместе с тем в результате сглаживания положения основных максимумов солнечного цикла оказывается смещенным относительно флуктуаций среднемесячных величин исследуемых индексов. Реальные проявления максимумов активности проявляются в виде максимумов среднемесячных величин флуктуационных индексов, которые непосредственным образом связаны с проявлением комплексов активности на Солнце.

4. 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.4 данные о комплексах приведены отдельно для северного и южного полушария по каждому из исследуемых среднемесячных величин индексов (чисел Вольфа W , площадей групп пятен S , вспышечного индекса FI).

В целом отмечается хорошее совпадение выявленных комплексов активности по различным индексам. В ряде случаев отмечается одновременное появление комплексов активности в северном и

южном полушарии (выделено жирным шрифтом). 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 года, 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 индексом W , общей их площади S и вспышечное энерговыделение, определяемое вспышечным индексом FI , происходят на определенных этапах развития комплексов активности.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Результаты проведенной обработки данных свидетельствуют:

- выявление комплексов активности на Солнце в 23 цикле активности возможно по данным флуктуаций основных индексов активности, таких как числа пятен, площади групп пятен и вспышечный индекс;
- основными процессами определяющими ход развития 23-го цикла активности (как, очевидно, и всех предшествующих ему) является развитие цикла в отдельности в северном и южном полушарии;
- основные фазы развития солнечного цикла, такие как фаза роста, фаза максимума, фаза спада отчетливо проявляются при самостоятельном рассмотрении активности северного и южного полушария;
- ход развития 23-го солнечного цикла в южном полушарии запаздывал по отношению к северному полушарию, второй максимум в южном полушарии был выше первого;
- 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;
- полученный каталог «комплексов активности» выявленных по среднемесячным величинам 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. Такая работа в настоящее время готовится к печати.

1. *Обридко В.Н.* Солнечные пятна и комплексы активности. — М.: Наука, 1985.
2. *Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. — М.: Наука, 1986.
3. *Рябов М.И., Ишков В.Н., Моисеев И.Г., Нестеров Н.С., Серокурова Н.Г.* Использование данных о миллиметровом излучении локальных источников на Солнце как индикатора эволюции центра активности // Солнечные магнитные поля и корона. Труды XIII консультативного совещания по физике Солнца. — Новосибирск, 1989. — С. 239–242.
4. *Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И.* Солнце и атмосфера Земли. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1975.
5. *Kleczeck J.* // Publ. Inst. Centr. Astron. — 1952. — № 22.
6. *Atac T., Ozguc, A.* // Solar Phys. — 1998. — **180**. — P. 397–407.
7. *Рябов М.И.* Области сближения полей N и S полярности на Солнце как источник повышенного миллиметрового излучения // *Астрономический циркуляр*, 1981, №1197
8. *Рябов М.И.* Использование спектра миллиметрового излучения локальных источников на Солнце как критерия прогноза активности // Сб. «Солнечная активность». — Алма-Ата: Наука, 1983. — С. 177–181.
9. *Ишков В.Н.* Солнце в минимуме активности 2005–2006 годов // *Одесский астрономический календарь*. — Одесса: Астропринт, 2007.

Поступила в редакцию 18.10.2009