

УДК 523.985.3

Сильные вспышки 24-го цикла: энергия и пространственное расположение

З.С. Ахтемов

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
azis@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. В 24-м цикле солнечной активности (2009–2015 гг., кэррингтоновские обороты CR 2091–CR 2168) рассмотрены 1512 оптических вспышек, сопровождавшихся рентгеновским излучением мощностью $f \geq 5 \cdot 10^{-6} \text{ wm}^{-2}$ в диапазоне 1–8 Å. При сравнении характеристик вспышек получено, что на данном промежутке времени S-полусфера Солнца более активна по количеству и мощности вспышек, чем N-полусфера. Зарегистрировано 578 вспышек в N-полусфере и 934 в S-полусфере. Для рассматриваемых нами данных по вспышкам на Солнце (за 5.8 лет наблюдений) можно выделить несколько долготных интервалов с повышенной вспышечной активностью. Они существуют в течение всего промежутка времени оборотов CR 2091–CR 2168. Активные долготы в одной полусфере в это же время с большой вероятностью являются долготами с низкой вспышечной активностью в другой полусфере и наоборот. В одном и том же диапазоне долгот вспышечная активность “непрерывно” наблюдается в течение 5–9 оборотов. За эти 78 оборотов в 24-м цикле такой длительности “непрерывная” вспышечная активность происходила по 2 раза в каждой полусфере. Показано долготное распределение числа вспышек в 22-м, 23-м и 24-м циклах солнечной активности за 37, 68 и 78 оборотов соответственно, а также распределение числа вспышек во времени за 5.8 года 24-го цикла. Наблюдается северо-южная асимметрия в распределении числа вспышек, мощностей вспышек по долготе и квазипериодичность в северо-южной асимметрии распределения числа вспышек во времени.

SPATIAL ARRANGEMENT AND ENERGY OF STRONG FLARES IN SOLAR CYCLE 24, by Z.S. Akhtemov. In solar cycle 24 (2009–2015, Carrington rotations CR 2091–CR 2168) we have examined 1512 optical flares accompanied by X-ray emission with a power of $f \geq 5 \cdot 10^{-6} \text{ wm}^{-2}$ in the range of 1–8 Å. When comparing the characteristics of flares it was found that in a given period of time the S-hemisphere of the Sun is more active by quantity and power of flares than the N-hemisphere. 578 strong flares were recorded in the N-hemisphere of the Sun and 934 flares – in the S-hemisphere. For the entire period of observations there are several longitudinal intervals with increased activity of flares. They exist for the entire time interval of 2091–2168 Carrington rotations. Active longitudes in one hemisphere at the same time, with a high probability, are longitudes with low flare activity in other hemisphere and vice versa. In one and the same range of longitudes flare activity is “continuously” observed within 5-9 rotations. Over 78 rotations in cycle 24 such a long continuous activity occurred twice in each hemisphere. We show the distribution of the number of flares in cycles 22, 23 and 24 over 37, 68 and 78 rotations, respectively, as well as the distribution of the number of flares in time over 5.8 years in cycle 24. There is a north-south asymmetry in the distribution of the number of flares

and capacity of flares in longitude and quasi-periodicity in the north-south asymmetry of the distribution of the number of flares in time.

Ключевые слова: Солнце, кэррингтоновские обороты, мощные вспышки, активная долгота, северо-южная асимметрия

1 Введение

Вспышки – наиболее активный процесс на Солнце, связанный с выделением энергии широкого спектра – от рентгена до радиоизлучения. Они приводят к активизации процессов в других областях солнечной атмосферы, порой удаленных на десятки тысяч километров. В некоторых наиболее мощных вспышках происходит ускорение частиц до высоких энергий, порождаются космические лучи. Изучение распределения вспышек по гелиографической долготе имеет также большое значение в определении эволюции крупномасштабных магнитных полей. История исследований пространственного распределения областей солнечной активности довольно полно отражена в монографии Витинского (1983).

Крупномасштабные магнитные структуры, связанные с комплексами активности, активными долготами, оказывают влияние на распределение мелкомасштабных проявлений активности, в том числе и на вспышечную активность. Как правило, повышенная вспышечная активность локализуется в так называемых “горячих пятнах”, наиболее устойчивые из которых могут существовать в течение нескольких циклов активности. Вспышки по месту возникновения выявляют концентрацию к некоторым диапазонам долгот (см., Мордвинов и Плюснина, 2004).

Активные долготы лучше проявляются в мощных элементах активности (Обридко и др., 2010). В этой работе речь шла о том, что активные долготы выражены более четко для групп пятен с большими площадями и анализировалось долготное распределение квадрата индукции магнитного поля Солнца (B^2).

Обзор литературы об активных долготах в более поздний период дан Плюсниной (2010). В ее работе говорится о существовании активных долгот для групп солнечных пятен в течение десяти (13–22) циклов.

Изучение явления асимметрии солнечных процессов важно для понимания природы и механизмов генерации магнитных полей Солнца, а также для выявления причин появления в истории Солнца длительных минимумов активности и предсказания солнечной активности в целом. Активные долготы и северо-южная асимметрия активности Солнца объясняются как проявление квазидипольной составляющей несимметричного крупномасштабного магнитного поля (Мордвинов и Кичатинов, 2004).

Бадалян и Обридко (2009) предложили использовать для интерпретации северо-южной асимметрии солнечной активности N-S асимметрию, определяемую как $A = (N-S)/(N+S)$, где N и S – значения индексов активности для северного и южного полушария. N-S асимметрия рассматривалась ими как суперпозиция знака асимметрии и ее абсолютной величины.

В рамках проекта научно-исследовательской работы КрАО “Структура и динамика магнитного поля и нестационарных процессов в атмосфере Солнца” и одного из его направлений “Высокоэнергичные процессы на Солнце” в данной работе были рассмотрены характеристики сильных вспышек и их пространственное распределение в 24-м цикле – с конца декабря 2009 г. по сентябрь 2015 г. Сильные вспышки – тема наших предыдущих публикаций (Ахтемов и др., 2012 и Ахтемов, 2014), где были рассмотрены 3235 зарегистрированных в 22-м цикле (1987–1992 гг.) сильных вспышек и 821 вспышка в первой половине 23-го цикла (1997–2000 гг.).

24-й цикл солнечной активности, определяемый по относительному числу солнечных пятен (числам Вольфа), отличался от двух предыдущих циклов меньшими максимальными значениями

Сильные вспышки 24 цикла...

ми чисел Вольфа и более длительным минимумом. Так же как и 22-й цикл, рассматриваемый в настоящей работе, 24-й цикл имеет два максимума – в начале 2012 года и в первой четверти 2014 года. Данные по числам Вольфа получены из архивов сайтов: <http://www.sidc.oma.be/silso/datafiles>, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>.

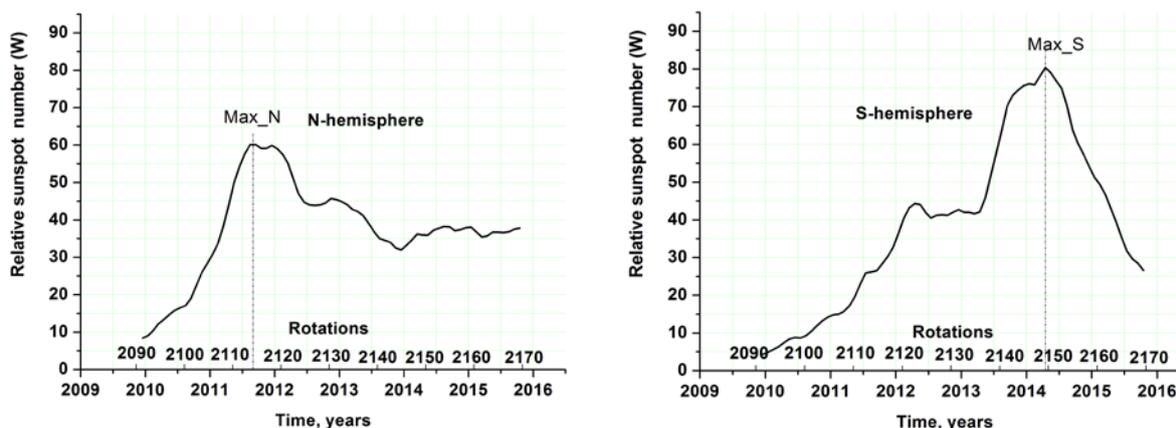


Рис. 1. Среднемесячные относительные числа пятен (W) в течение 24-го цикла солнечной активности, отдельно в N- и S-полусферах

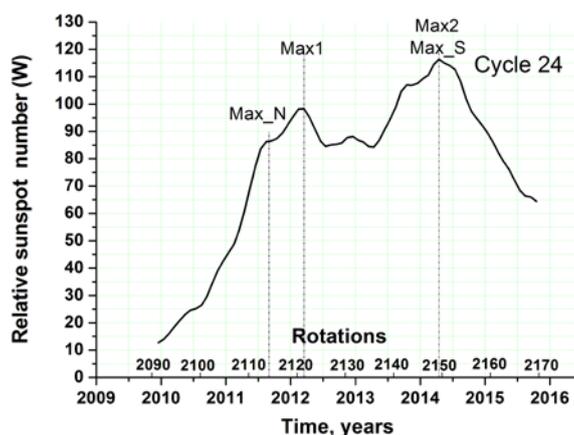


Рис. 2. Среднемесячные относительные числа пятен (W) в течение 24-го цикла солнечной активности. Пунктирные линии Max1 и Max2 обозначают общие для всего Солнца максимумы чисел W . Линии, отмеченные как Max_N и Max_S, соответственно обозначают максимумы отдельно взятых для N- и S-полусфер чисел Вольфа

На рис. 1 приведены графики изменения чисел W для N- и S-полусфер отдельно. Линии, отмеченные как Max_N и Max_S, соответственно обозначают максимумы отдельно взятых для N- и S-полусфер чисел Вольфа. Если взять числа Вольфа для всей поверхности Солнца, то получим график, показанный на рис. 2. Как видно из рис. 2, Max_N достигается по времени раньше, чем Max1, на 0.54 года; Max_S и Max2 совпадают. В северной полусфере среднемесячные (сглаженные) относительные числа W возрастают от 8.4 до Max_N = 60.1 за 1.6 года и убывают до 35 за 4.3 года. В южной полусфере рост чисел Вольфа от 4.3 до Max_S = 80.4 происходит за 4.3 года, а затем за 1.5 года они убывают до 26.6.

Рассмотрим, как за 5.8 года 24-го цикла изменялось число сильных вспышек со временем, какова их энергия и распределение на поверхности Солнца.

2 Исходный материал и его обработка

В настоящей работе использованы данные о рентгеновском излучении в диапазоне 1–8 Å (GOES) для конкретных солнечных вспышек и гелиографические координаты активных областей, в которых эти оптические вспышки происходили.

Из архивов сайтов ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/swpc_products/daily_reports/solar_event_reports/ и <http://www.solarmonitor.org> были выбраны данные по вспышкам классов C, M и X в кэррингтоновских оборотах CR 2091–CR 2168 (2009–2015 гг.) следующего диапазона плотности потока излучения f , в интервале длин волн 0.1–0.8 нм:

C	$5 * 10^{-6} \leq f < 10^{-5} \text{ wm}^{-2}$
M	$10^{-5} \leq f < 10^{-4} \text{ wm}^{-2}$
X	$10^{-4} \leq f \text{ wm}^{-2}$

Вспышки классов A, B и C ($f < 5 * 10^{-6} \text{ wm}^{-2}$) не рассматривались.

Всего в 24-м цикле было зарегистрировано 1512 вспышек выбранных нами рентгеновских классов с плотностью потока излучения $f \geq 5 * 10^{-6} \text{ wm}^{-2}$. Из них 578 вспышек в N-полусфере и 934 в S-полусфере. Составлены таблицы, которые содержат данные об энергиях, времени наблюдения и координатах всех зарегистрированных вспышек.

3 Эволюционные характеристики вспышечной активности

Отдельно для N- и S-полусфер были определены: число вспышек для каждого оборота, долготное распределение числа вспышек и распределение мощности вспышек по долготе. Рассмотрено распределение числа вспышек на Солнце в каждой полусфере в интервале времени $\Delta T = 10$ оборотов за 78 оборотов 24-го цикла. Также изучалось распределение числа вспышек, происходящих на интервал долгот $\Delta L = 40^\circ$ по полушариям Солнца. Кроме того, проведено сравнение динамики вышеперечисленных величин с изменением чисел Вольфа и данными по вспышкам, использованным нами ранее в работах Ахтемов и др. (2012) и Ахтемов (2014).

3.1 Число вспышек в каждом обороте

На рис. 3 представлено изменение со временем числа вспышек мощностью более или равной $5 * 10^{-6} \text{ wm}^{-2}$ в каждом обороте 24-го цикла солнечной активности в N-полусфере (слева) и в S-полусфере (справа).

В начале фазы первого максимума в N-полусфере, в отличие от S-полусферы, наблюдается большее возрастание числа вспышек в обороте. Как видно из этих графиков, в N-полусфере число вспышек в одном обороте в первом максимуме почти в два раза больше, чем в S-полусфере. В период второго максимума солнечной активности число вспышек, наоборот, в S-полусфере больше, чем в N-полусфере и в три раза превышает свой первый максимум. В N-полусфере во втором максимуме чисел Вольфа число вспышек в одном обороте в два раза меньше, чем в первом максимуме.

Во втором максимуме вспышечная активность S-полусферы существенно выше активности N-полусферы.

Сильные вспышки 24 цикла...

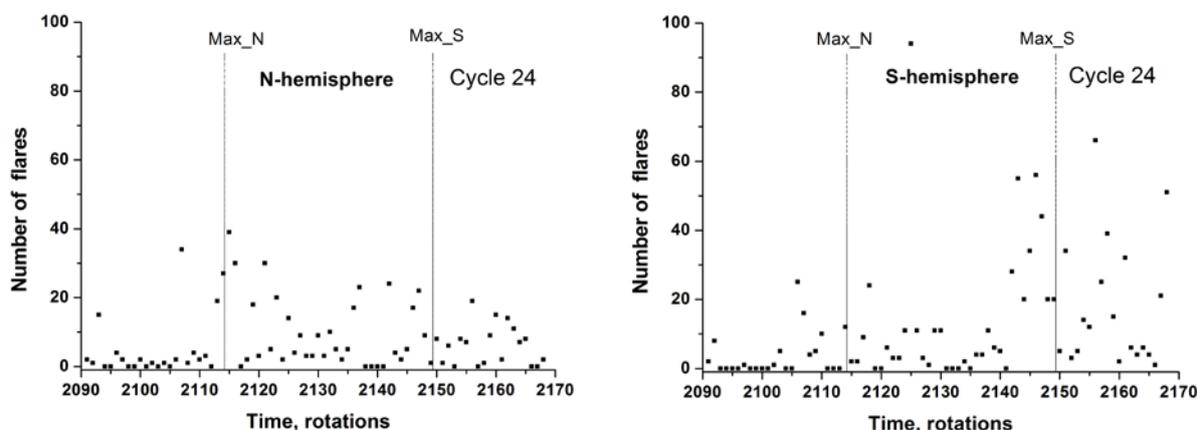


Рис. 3. Число вспышек в каждом обороте. Слева в N-полусфере, справа в S-полусфере. Моменты максимумов чисел Вольфа в соответствующих полусферах отмечены вертикальными линиями

Определим число вспышек, приходящихся на интервал времени $\Delta T = 10$ оборотов в каждой полусфере. Если по горизонтальной числовой взять время в оборотах, а по вертикали отложить соответствующие числа вспышек, то для промежутка времени CR 2091–CR 2168 получим график зависимости числа вспышек в интервале времени ΔT от времени в кэррингтоновских оборотах (рис. 4).

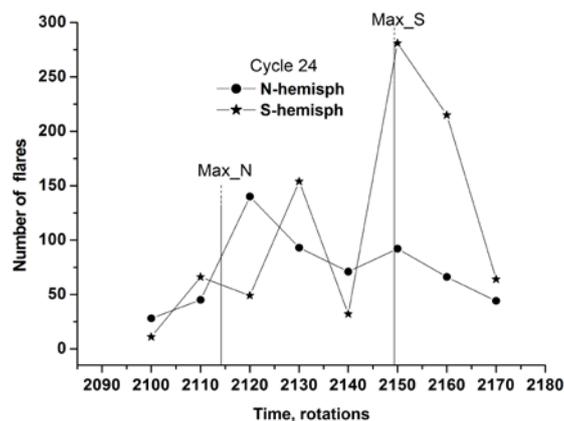


Рис. 4. Распределение числа вспышек в интервалах времени $\Delta T = 10$ об. за 78 оборотов 24-го цикла

На рис. 4 явно видно преобладание вспышечной активности в S-полусфере Солнца в период второго максимума цикла. На рисунке можно также наблюдать асимметрию распределения числа вспышек по времени в N- и S-полусферах.

Воспользовавшись формулой, предложенной Бадалян и Обридко (2009) для интерпретации северо-южной асимметрии, построим график изменения асимметрии в распределении числа вспышек по времени для CR 2091–CR 2168 (рис. 5).

Если взять данные, использованные нами в предыдущих работах (Ахтемов и др., 2012 и Ахтемов, 2014), то для определенных промежутков времени 22-го и 23-го циклов асимметрию распределения числа вспышек графически можно представить так, как показано на рис. 6.

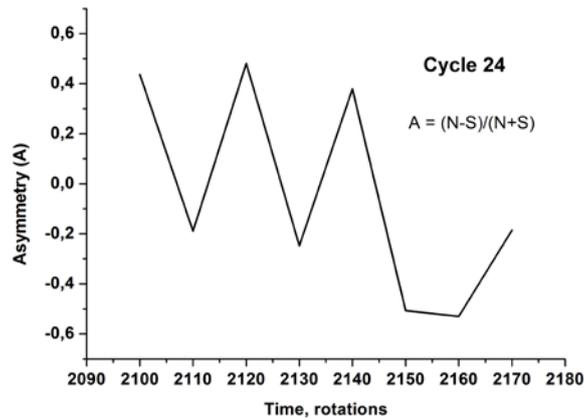


Рис. 5. Северо-южная асимметрия распределения числа вспышек в интервалах времени $\Delta T = 10$ об. за 78 оборотов 24-го цикла

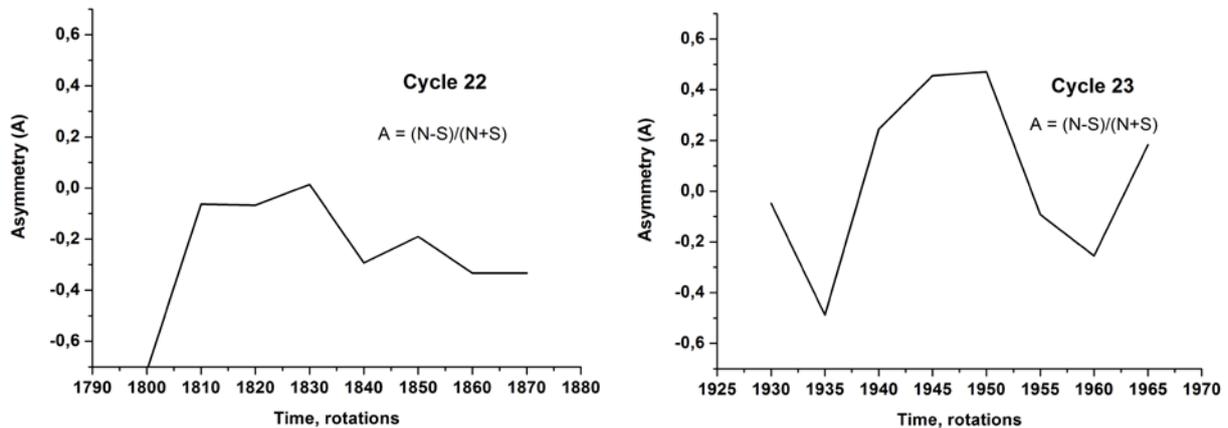


Рис. 6. Северо-южная асимметрия распределения числа вспышек в интервалах времени $\Delta T = 10$ об. за 68 оборотов 22-го цикла и за 37 оборотов 23-го цикла в интервалах времени $\Delta T = 5$ об.

На рис. 5 и рис. 6 наблюдается квазицикличность (с периодом 20–30 оборотов) северо-южной асимметрии распределения числа вспышек по времени.

3.2 Распределения числа вспышек по долготе

В данной работе рассматривается промежуток времени в шесть лет. Большая часть этого интервала приходится на первую половину 24-го цикла. По всему материалу попытаемся выделить активные долготы отдельно для каждой полушеры. Определим количество вспышек, приходящихся на интервалы долгот по 40 градусов в каждой полушере.

На рис. 7. показан получившийся график количества вспышек на разных долготах в каждой полушере за все 78 оборотов 24 цикла. В каждой полушере наблюдается по 2–3 активные долготы, число вспышек в которых в два раза превышает число вспышек в “спокойных” областях.

Из рис. 7 можно определить активные долготы для вспышек за 78 оборотов 24-го цикла по полушерам. Активными в 24-ом цикле в N-полушере можно считать долготы $100^\circ \pm 20^\circ$, $180^\circ \pm 20^\circ$ и $300^\circ \pm 20^\circ$, а долготами с пониженной вспышечной активностью были $140^\circ \pm 20^\circ$ и $220^\circ \pm 20^\circ$. В S-полушере вспышечная активность проявляется на долготе $100^\circ \pm 20^\circ$ и

Сильные вспышки 24 цикла...

$220^\circ \pm 20^\circ$. Низкая активность в S-полусфере на долготах: $60^\circ \pm 20^\circ$, $140^\circ \pm 20^\circ$ и $300^\circ \pm 20^\circ$. Из графиков видно, что в 24-м цикле северо-южная асимметрия вспышечной активности проявляется так же как и в циклах 22 и 23 (рис. 8). Здесь речь идет, конечно, о долготном распределении вспышек в диапазоне мощности потока рентгеновского излучения $f \geq 5 \cdot 10^{-6} \text{ w m}^{-2}$.

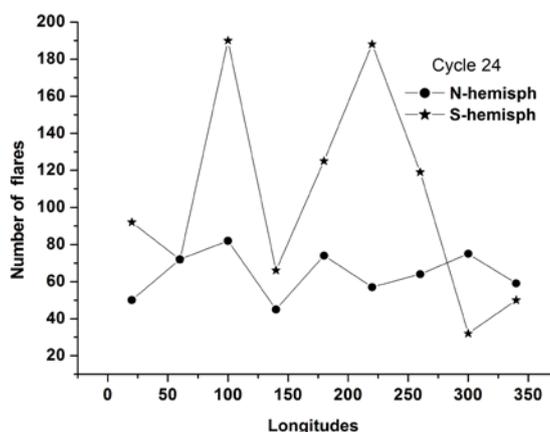


Рис. 7. Распределение числа вспышек в интервалах 40° по долготе за 78 оборотов 24-го цикла

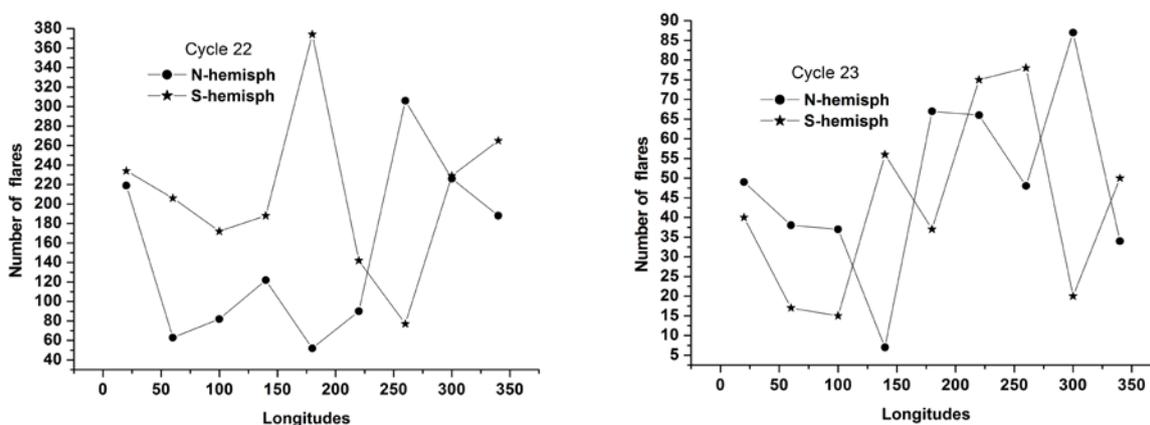


Рис. 8. Распределение числа вспышек по долготе в 22-м цикле за 68 оборотов и 23-м цикле за 37 оборотов

3.3 Мощность вспышек на разных долготах

Если взять все зарегистрированные в оборотах CR 2091–CR 2168 вспышки (1512) и построить отдельно для N- и S-полусфер графики, где по горизонтали будет долгота вспышки, а по вертикали мощность вспышки, то получим распределения мощностей вспышек по долготе (рис. 9.). На этих графиках, в соответствии с масштабом чисел по вертикальной оси, наблюдается расположение вспышек классов M и X. Сравнение графиков показывает, что долгота с пониженной вспышечной активностью (число вспышек и мощность) в одной полусфере может быть зоной повышенной вспышечной активности (число вспышек и мощность) в противоположной полусфере. Это, например, явно видно на $100^\circ \pm 10^\circ$, $150^\circ \pm 20^\circ$, $250^\circ \pm 20^\circ$ и $300^\circ \pm 25^\circ$. Подобная же асимметрия наблюдалась, но для числа вспышек при рассмотрении графиков на рис. 7 и рис. 8.

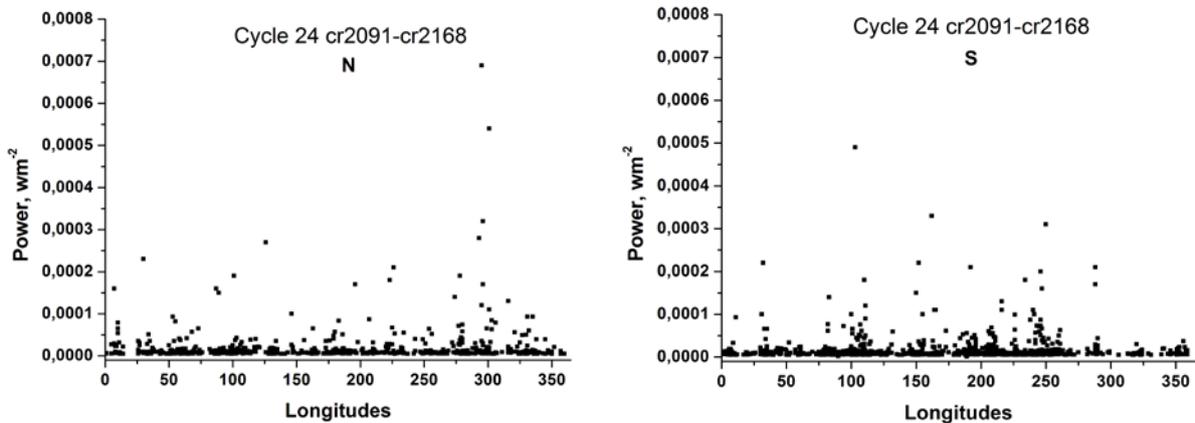


Рис. 9. Распределение мощностей и числа вспышек по долготе за 78 оборотов в N- и S-полусфере в 24-м цикле

3.4 Изменение со временем долготного распределения вспышек

Изучение изменения со временем распределения вспышек по долготе в N- и S-полусферах (рис. 10) в 24-м цикле солнечной активности показывает, что нет ни одной активной долготы, непрерывно существующей в течение всего рассматриваемого интервала времени. Активные долготы в 24-м цикле последовательно существуют максимум 5–9 оборотов. Это, например, в N-полусфере видно в диапазонах долгот $200^\circ \pm 20^\circ$ и $70^\circ \pm 10^\circ$ (обороты 2119–2125 и 2132–2136), в S-полусфере $100^\circ \pm 10^\circ$ и $240^\circ \pm 20^\circ$ (обороты 2143–2147 и 2151–2159).

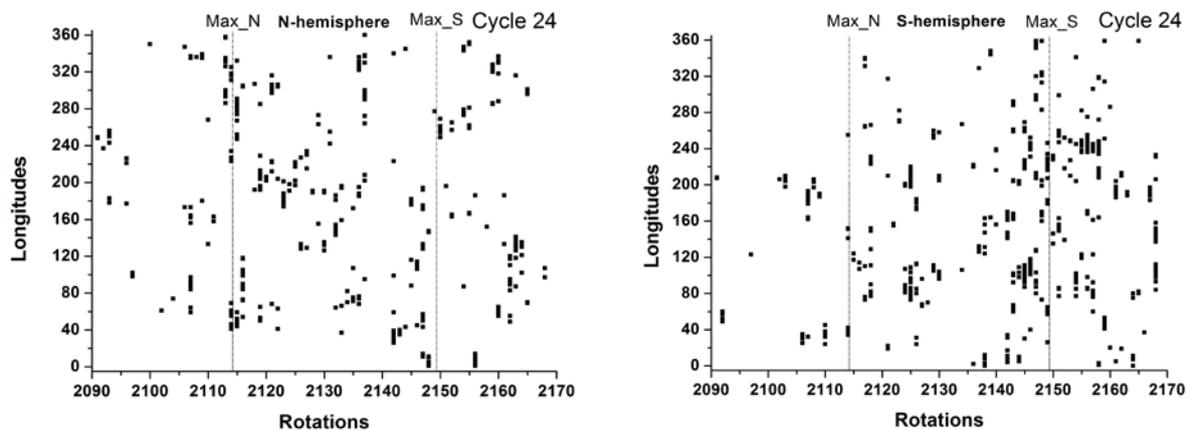


Рис. 10. Изменение со временем долгот вспышек за 78 оборотов в N- и S-полусфере в 24-м цикле

4 Выводы

- Число вспышек в одном обороте растет от минимума к первому максимуму 24-го цикла от 0 до 40 в N-полусфере и приблизительно до 25 в S-полусфере. После этого в обеих полусферах убывает до 10 и снова возрастает. Ко второму максимуму чисел Вольфа число вспышек в S-полусфере достигает 70-ти, что в 3 раза больше, чем в N-полусфере.

Сильные вспышки 24 цикла...

- Нет ни одной активной долготы, непрерывно существующей в течение всего рассматриваемого интервала времени. Активные долготы в 24-м цикле непрерывно существуют 5–9 оборотов.
- Для изучаемого промежутка времени в 78 оборотов можно выделить несколько долготных интервалов с повышенной вспышечной активностью, по 2–3 активные долготы в N- и S-полусфере.
- Северо-южная асимметрия в распределении числа вспышек по долготе и в изменении числа вспышек со временем наблюдается в 22-м, 23-м и 24-м циклах. Полученные результаты можно интерпретировать как явление квазипериодического перераспределения энергии между N- и S-полусферами.

Литература

- Ахтемов З.С., Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2012. Т. 108. № 1. С. 13.
- Ахтемов З.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2014. Т. 110. С. 90.
- Бадалян О.Г., Обридко В.Н. // Труды всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца. СПб: ГАО РАН. 2009. С. 37.
- Витинский Ю.И. // Солнечная активность. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1983.
- Мордвинов А.В., Кичатинов Л.Л. // Астрон. журн. 2004. Т. 81. № 3. С. 281.
- Мордвинов А.В., Плюснина Л.А. // Солнечно-земная физика. 2004. Вып. 4. С. 49.
- Обридко В.Н., Иванов Е.В., Чертопруд В.Е. // Физика плазмы в Солнечной системе. 8–12 февраля 2010 г. ИКИ РАН. Москва.
- Плюснина (Plyusnina L.A.) // Solar Phys. 2010. V. 261. P. 223.