ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ СЕВЕРО-ЮЖНОЙ АСИММЕТРИИ В ЗЕЛЕНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ЛИНИИ И В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

© 2020 г. О. Г. Бадалян^{*}

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Московская область, Россия

Поступила в редакцию 10.08.2020 г. После доработки 11.09.2020 г.; принята к публикации 22.09.2020 г.

Исследуется пространственное распределение северо-южной асимметрии за 1977—2001 гг. Сопоставление распределения и временны́х изменений индекса асимметрии A в зеленой корональной линии 530.3 нм Fe XIV, в полном корональном магнитном поле и в полях малых и больших масштабов показало, что на низких широтах распределение A для полей малых масштабов имеет наибольшее сходство с его распределением в яркости зеленой линии. На широтах выше 40° наблюдается антикорреляция между поведением A в зеленой линии и в магнитном поле больших масштабов. Ранее было показано, что широтно-долготные области с преобладанием яркости зеленой линии в одном из полушарий через 14—18 оборотов сменяются похожими по форме областями с преобладанием другого полушария, т.е. карта как бы изменяется на "негативную". В данной работе этот вывод подтверждается рассмотрением поведения северо-южной асимметрии в напряженности магнитного поля. Изменение карты на негативную наиболее выражено для полей больших масштабов. Северо-южная асимметрия является свидетельством и мерой того, что существуют различия (рассинхронизация) в работе двух полушарий Солнца. Этот факт необходимо учитывать при построении современных теорий динамо.

Ключевые слова: Солнце, зеленая корональная линия, магнитное поле, северо-южная асимметрия.

DOI: 10.31857/S0320010820100022

ВВЕДЕНИЕ

Северо-южная асимметрия солнечной активности является очень интересным и во многом загадочным явлением. Несмотря на продолжительную историю ее исследования, многие свойства асимметрии остаются неизвестными, а природа этого феномена непонятной. В настоящее время продолжается процесс накапливания наблюдательного материала, описывающего различные стороны северо-южной асимметрии. Солнечная активность долгое время рассматривалась как процесс в единой динамической системе. Постепенно выяснилось, что генерация и эволюция магнитных полей происходит по-разному в северном и южном полушариях. Свидетельством того, что имеются определенные различия в работе двух полушарий, является северо-южная асимметрия солнечной активности. Величина северо-южной асимметрии может служить мерой этого различия. Следует при этом отметить, что довольно долгое время многие исследователи склонялись к мысли о том, что асимметрия является артефактом, следствием ошибок наблюдений или статистически незначимых флуктуаций измеряемых величин. Поэтому относительно недавно в работе Карбонелл и др. (1993) первым из основных выводов было утверждение о том, что N-S асимметрия площадей солнечных пятен статистически значима и является реальным феноменом.

При изучения северо-южной асимметрии использовались различные индексы солнечной активности — пятна, вспышки, волокна, протуберанцы, радио- и гамма-всплески, излучение короны, магнитное поле Солнца и др. Обзоры работ по исследованию северо-южной асимметрии содержатся в статьях Визосо, Баллестер (1990), Карбонелл и др. (1993, 2007), Ли и др. (2002), Мариш и др. (2002), Бадалян и др. (2005, 2008), Сикора, Рыбак (2010), Бадалян, Обридко (2011). Эти исследования показали, что северо-южная асимметрия является некоторой фундаментальной характеристикой солнечной активности. Ее свойства во многом не определяются циклической деятельностью Солнца. Создается впечатление, что северо-южная

^{*}Электронный адрес: badalyan@izmiran.ru

асимметрия существует по своим собственным законам.

В работе Бадалян (2011) были рассмотрены асимметрия широт центров пятнообразования в северном и южном полушариях и связь этой величины с обычно исследуемой асимметрией суммарных площадей групп солнечных пятен. Поведение этих характеристик свидетельствует о том, что наблюдается рассинхронизация в работе двух полушарий Солнца, которая особенно заметно проявляется вблизи минимумов циклов активности. При этом можно говорить о разбалансировке полушарий как по мощности (асимметрия суммарных площадей солнечных пятен), так и по пространству (широтная асимметрия появления центров пятнообразования). На общую цикличность, синхронную в двух полушариях, накладывается механизм рассинхронизации, имеющий свои собственные закономерности, которые необходимо изучать и учитывать при теоретических рассмотрениях модели динамо.

1. Имеются различные методики исследования феномена северо-южной асимметрии. Стандартным является подход, когда изучаются временные изменения величины индекса северо-южной асимметрии, определяемой как

$$A = (N - S)/(N + S),$$
 (1)

где N и S — значения индекса солнечной активности в северном и южном полушариях соответственно в выбранном широтном интервале; при этом значение А усредняется с тем или иным временным окном. Такой метод рассмотрения североюжной асимметрии показал, что асимметрия является квазипериодической величиной с периодом около 12 лет. Отмечены периоды около 12 и 40 лет, а также вековой тренд (Наговицын, 1998; Кнаак и др., 2004; Баллестер и др., 2005; Бадалян и др., 2005, 2008; Бадалян, Обридко, 2011). В североюжной асимметрии обнаружены также квазидвухлетние колебания (Бадалян и др., 2005, 2008; Сикора, Рыбак, 2010; Бадалян, Обридко, 2011). Следует отметить, что эти колебания в асимметрии проявляются существенно отчетливее, чем в самих индексах активности.

2. Можно рассматривать крупномасштабное пространственно-временное распределение асимметрии. В ряде работ было выполнено сопоставление асимметрии, определенной по различным индексам солнечной активности (Ньютон, Милсом, 1955; Вальдмайер, 1971; Сикора, 1980; Рушин, 1980). По результатам этих сопоставлений можно было предположить, что асимметрия ведет себя сходным образом в различных индексах и на различных временных и пространственных масштабах. Это предположение было проверено в работах Бадалян и др. (2005), Бадалян, Обридко (2008, 2011), и было показано, что североюжная асимметрия ведет себя сходным образом в различных индексах активности, относящихся к различным слоям солнечной атмосферы.

Характерным является практически одновременное возрастание или уменьшение асимметрии в различных индексах, что приводит к образованию вертикальных полос на диаграммах в координатах широта—время. Свойства северо-южной асимметрии описаны Бадалян (2009).

3. Для отдельных кэррингтоновских оборотов распределение асимметрии имеет более сложный характер. Такое новое, более детальное рассмотрение северо-южной асимметрии яркости зеленой корональной линии было проведено Бадалян (2010, 2012а). Были построены карты распределения северо-южной асимметрии яркости зеления северо-южной асимметрии яркости зеления северо-южной асимметрии яркости зеления за 1943–2001 гг. Затем такое рассмотрение N–S асимметрии было продолжено применительно к корональным магнитными полям различных масштабов (Бадалян, 2012b).

4. Совсем иной подход был в работе Бадалян, Обридко (2015, 2017). Было предложено рассматривать северо-южную асимметрию как суперпозицию двух функций — абсолютной величины асимметрии и ее знака. Выяснилось, что многие свойства асимметрии описываются временными изменениями ее знака. В то же время абсолютная величина асимметрии (ее модуль) имеет четкий 11-летний цикл. Такой подход к рассмотрению северо-южной асимметрии, возможно, прояснит многие ее свойства и позволит подойти к выяснению природы этого феномена.

5. Интересный подход к изучению долговременных изменений северо-южной асимметрии крупномасштабного магнитного поля за 1858—2006 гг. предложен в работе Гусевой, Наговицына (2012). Индекс, характеризующий открытое магнитное поле солнечной короны, сопоставлен с другими индексами асимметрии, и определена длительность 11-летнего цикла в северном и южном полушариях по различным индексам активности.

В данной работе продолжено рассмотрение поведения северо-южной асимметрии в зеленой корональной линии и в корональных магнитных полях различных масштабов для отдельных кэррингтоновских оборотов.

БАЗЫ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для исследования количественной связи между асимметрией яркости зеленой корональной линии 530.5 нм Fe XIV и напряженностью магнитного поля в короне была вычислена кросс-корреляция соответствующих синоптических карт за период 1977–2001 гг.

Карты распределения яркости зеленой корональной линии построены по данным патрульных наблюдений ряда корональных станций, сведенных в единую фотометрическую систему. Нами использовалась база данных, составленная Ю. Сикорой. База включает наблюдения яркости зеленой корональной линии за 1939-2001 гг. Ю. Сикора был первым, кто начал разработку процесса приведения наблюдательных данных в единую фотометрическую систему. Процесс гомогенизации данных описан в работе Сикора (1971). В настоящее время база данных хранится в Астрономическом Институте Словацкой Академии наук. В базе данных приведены значения интенсивности зеленой линии в абсолютных корональных единицах (а.с.и.) с шагом $\sim 13^{\circ}$ по долготе (один день) и 5° по широте. Абсолютная корональная единица есть одна миллионная яркости центра солнечного диска в полосе в 0.1 нм соседнего с линией континуума. Все данные приведены к высоте 60" над лимбом. Детальное описание базы данных содержится в Сторини, Сикора (1997), Сикора, Рыбак (2005).

Расчеты напряженности магнитного поля в короне проведены в потенциальном приближении на основе наблюдений на уровне фотосферы Wilcox Solar Observatory (http://quake.stanford.edu/wso/ wso.html). Исходными являются наблюдения продольной компоненты магнитного поля на фотосфере. Магнитное поле в короне рассчитано с использованием известного метода, описанного в Хоексема, Шеррер (1986), Хоексема (1991). Использовалась программа, которая позволяет вычислять все компоненты магнитного поля от поверхности фотосферы до поверхности источника (Харшиладзе, Иванов, 1994). Расчеты выполнены для расстояния 1.1 R_{\odot} , близкого к высоте 60", к которой приведены данные о яркости зеленой корональной линии в используемой базе данных. В стандартных расчетах исходные данные суммируются по 10 гармоникам. При этом вводится полярная коррекция, учитывающая недостаточную надежность измерений магнитного поля вблизи полюсов (Обридко, Шельтинг, 1999). Как исходные, так и рассчитанные данные о магнитном поле ограничены широтным диапазоном $\pm 70^{\circ}$.

В стандартных расчетах магнитное поле на каждом уровне в короне Солнца представляется как сумма 10 сферических гармоник. В методе представления решения уравнения для потенциального поля в виде рядов по ортогональным функциям более высокие гармоники соответствуют полям меньших масштабов. Определенные таким образом поля больших масштабов относятся к глобальной деятельности Солнца, а поля малых масштабов определяют развитие комплексов активности. Наблюдательные данные по зеленой линии и рассчитанное магнитное поле были затем усреднены за 6 последовательных кэррингтоновских оборотов со сдвигом в 1 оборот. Карты, построенные по таким сглаженным по 6 оборотам данным, позволяют рассматривать крупномасштабные долгоживущие образования. Организованные таким образом данные по зеленой линии и магнитному полю имеют эффективное пространственное разрешение $10^{\circ}-15^{\circ}$.

Для полученных рядов данных была вычислена северо-южная асимметрия. Для дальнейшего рассмотрения вычислялись коэффициенты корреляции между параметрами, описывающими яркость зеленой корональной линии и напряженность магнитного поля. Вычислялись полное магнитное поле (сумма всех 10 гармоник), поле, описываемое первыми четырьмя гармониками (волновые числа от 0 до 3) и поле более высоких гармоник с 5 по 10-ю (волновые числа с 4 по 9). Коэффициент корреляции находился для совокупности пространственно совпадающих точек на синоптических картах. Это те точки, для которых в базе приведены данные о яркости зеленой линии (т.е. с шагом 13° по долготе и 5° по широте); для этих же точек рассчитывалось магнитное поле.

СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ В ЗЕЛЕНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ЛИНИИ И В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Рассмотрение последовательности 784 синоптических карт индекса А для зеленой линии (обороты с 1195 по 1983) показывает, что широтнодолготные области, в которых доминирует северное или южное полушарие, образуют своеобразные "структуры" различной формы. Можно выделить различные типы карт и проследить их изменение со временем, а также переход от одного типа к другому. "Структуры" асимметрии могут располагаться вертикально (линии равной асимметрии идут вдоль меридианов), или карты могут быть с горизонтально (вдоль кэррингтоновской долготы) ориентированными широтно-долготными областями. Среди других карт можно выделить карты с мелкими или, наоборот, с крупными структурами. Имеются также карты с огромными секторами размером примерно в пол-оборота (например, карта со средней датой 3 апреля 1994 г., обороты 1878-1883). И, наконец, возможно доминирование того или иного полушария во всем диапазоне широт в течение всего оборота (например, карта со средней датой 12 апреля 1965 г., обороты 1490-1495).

Рассмотрим теперь аналогичные карты, построенные для северо-южной асимметрии магнитного поля. На рис. 1 приведены карты распределения усредненной асимметрии за кэррингтоновские обороты 1650—1655 (время с 01.01.1977 по



Рис. 1. Карты распределения северо-южной асимметрии в интервале, усредненном за 1650–1655 кэррингтоновских оборота. Вверху слева — зеленая корональная линия, вверху справа — полное манитное поле. Внизу слева — первые 4 гармоники, справа — гармоники с 5 по 10-ю.

13.06.1977). Самый темный цвет показывает доминирование северного полушария, белый цвет доминирование южного полушария. Верху слева дана карта, построенная для асимметрии яркости зеленой корональной линии, вверху справа — для полного магнитного поля по всем 10 гармоникам. Внизу слева — поле, рассчитанное по первым четырем гармоникам (волновые числа с 0 по 3), справа — поле, рассчитанное по гармоникам с 5 по 10-ю (волновые числа с 4 по 9).¹

Двигаясь вдоль параллели, можно видеть, на каких долготах на данной широте доминирует северное или южное полушарие. Так, например, на рис. 1 зеленая линия (левая верхняя карта) заметно ярче в южном полушарии, чем в северном, на широтах ниже 60° в диапазоне долгот от 0° до 60° (белый цвет на карте). В этой области карты северо-южная асимметрия отрицательна. А в диапазоне долгот от 220° до 260° на тех же широтах зеленая линия ярче в северном полушарии.

Карты на рис. 1 показывают, что распределение асимметрии в зеленой линии схоже с распределением асимметрии полного магнитного поля (вверху справа) и поля, построенного по высоким гармоникам (внизу справа). Распределение асимметрии поля по первым четырем гармоникам совершенно отличается (нижняя левая карта). Таким образом, асимметрия в зеленой линии в большой степени определяется полем высоких гармоник.

На рис. 2 приведена диаграмма распределения коэффициентов корреляции каждой из карт (точка на оси абсцисс) из рассматриваемого временного интервала 1977—1986 гг. с последующими картами. Рисунок 2 построен следующим образом. Рассчитывается коэффициент корреляции первой карты со следующей (т.е. через 1 кэррингтоновский оборот), затем через одну карту (т.е. через 2 оборота), через 2 карты и т.д. до 23. Эти числа отложены по оси ординат. Такой расчет выполняется для всех карт. Полученная таблица коэффициентов корреляции позволяет построить общую диаграмму в координатах время—смещение сопоставляемой карты в оборотах. Время на оси абсцисс относится к первой из сопоставляемых карт, число на оси ординат

¹ К сожалению, на рис. 1 и 2 в (Бадалян, 2010) и на рис. 1, 3 и 4 в (Бадалян, 2012а) была допущена ошибка: указанная по оси ординат широта возрастает не снизу вверх, а сверху вниз. Подчеркнем, что допущенная на рисунках ошибка не повлияла на результаты и выводы работ Бадалян (2010, 2012а). Здесь на рис. 1 и 4 карты расположены правильно. Некоторое отличие от рис. 1 в (Бадалян, 2012а) связано с немного иным сглаживанием карты.



Рис. 2. Карты распределения коэффициентов корреляции данной карты с соседними картами. По оси абсцисс — время, по оси ординат — сдвиг второй карты по отношению к первой в кэррингтоновских оборотах. Шкала внизу показывает значение коэффициента корреляции. Сверху-вниз показаны карты для зеленой корональной линии; полного магнитного поля; поля, рассчитанного по первым четырем гармоникам; поля по гармоникам с 5 по 10-ю.

показывает, на сколько оборотов от первой карты отстоит вторая карта. Шкала под картой указывает значения коэффициентов корреляции. Области высокой положительной корреляции окрашены черным цветом, области отрицательной корреляции до 0.5 и больше по абсолютной величине — белым. Найденные коэффициенты корреляции являются мерой изменения карты широтно-долготного распределения асимметрии со временем.

В статье Бадалян (2012b) такой рисунок дан для зеленой линии за весь интервал наблюдений обороты 1195–1983. Здесь на рис. 2 дана часть этого интервала для зеленой линии, и далее карта сопоставляется с аналогичными картами для полного магнитного поля, поля по первым четырем гармоникам и поля по гармоникам с 5 по 10-ю. На рис. 2 в большом масштабе можно выделить области положительной корреляции между диаграммами и области отрицательной корреляции. Они сменяют друг друга во времени. Сопоставление верхней карты с тремя нижними показывает, что между ними имеется как сходство в отдельных областях, так и различие. Имеются области высокой положительной корреляции при сопоставлении близко расположенных карт и области довольно высокой отрицательной корреляции, иногда совпадающие с такими же областями на верхней карте.

На рис. 2 можно отметить следующие особенности в поведении коэффициентов корреляции:

1) Самая высокая корреляция наблюдается с последующими 1—5 картами (т.е. через 1—5 оборотов). Это означает, что примерно столько времени сохраняется данное пространственное распределение асимметрии. При этом можно видеть, что примерно через 15—16 оборотов (14 мес.) возникает устойчивое состояние, которое держится более длительное время, например, около 1979, 1982 и 1984 гг. На диаграмме это проявляется как некоторая "волнистость" линии в нижней части диаграммы.

2) На диаграмме имеются области значительной отрицательной корреляции (внутренние части областей белого цвета). В это время выбранная карта как бы превращается в свой негатив. Видно, что наибольшее количество отрицательных коэффициентов корреляции показывают поля больших масштабов.

3) Наибольшее число точек с отрицательной корреляцией показывает асимметрия поля больших масштабов (третья сверху карта). На этой карте видно квазипериодическое появление белых областей, примерно каждые 2–2.5 года.

4) Поля более высоких гармоник имеют мало точек отрицательной корреляции.

5) Можно отметить сходство всех четырех карт. Так, около 1983 г. области отрицательной корреляции возникают на всех картах. Также схожими являются волнистость линии в нижней части диаграммы и возникновение более устойчивых состояний в некоторые временные интервалы.

Общее число точек, по которым построена часть верхней карты на рис. 2, в интервале 1977–2001 гг. составляет 7038. Выберем из них те, в которых корреляция с отрицательным знаком превышает 0.5 по абсолютной величине. В общей выборке таких случаев 183 (2.6%) для зеленой линии, 133 (1.9%) для полного магнитного поля, 551 (7.8%) для магнитного поля по первым четырем гармоникам и 53 (0.8%) для поля высоких гармоник. На рис. 3 представлены гистограммы распределения этих коэффициентов корреляции. По оси абсцисс дано расстояние в кэррингтоновских оборотах между последовательно сопоставляемыми картами.

Рисунок 3 показывает различное распределение случаев отрицательной корреляции для полей различных масштабов. Гистограмма для зеленой линии наибольшим образом похожа на гистограмму полей больших масштабов (левый столбец). Полное поле (вверху справа) имеет два максимума — примерно через 7—8 мес. и через 16—20 мес. Поля высоких гармоник имеют мало случаев превращения карты в негатив.

Гистограммы показывают, что карты, имеющие между собой довольно высокую отрицательную корреляцию (превышающую 0.5 по абсолютному значению), отстоят друг от друга на 10—20 кэррингтоновских оборотов или на 0.9—1.5 года. Временное расстояние между картами "позитив-негатив" можно интерпретировать как полуволну некоторой квазипериодической функции. Полуволна в 10— 20 оборотов попадает в диапазон квазидвухлетних колебаний. Таким образом, чередование карт типа "позитив-негатив", возможно, отражает квазидвухлетние колебания, хорошо выделяемые во временном ходе асимметрии, см. Бадалян и др. (2008), Бадалян, Обридко (2011).

В работе Бадалян (2009) было выяснено, что часто сопоставление данной карты с последующими показывает, как через некоторое время возникает карта, "структуры" асимметрии на которой расположены примерно так же, как и на первой, но только там, где величина *A* имела знак "плюс" (т.е. в северном полушарии линия ярче), на второй карте она имеет знак "минус". Иначе говоря, через какое-то время карта как бы превращается в свой негатив. На рис. 4 такое сопоставление выполнено для зеленой линии (верхний ряд) и для полей малых гармоник (нижний ряд). Выбраны те же карты, как и в работе Бадалян (2009), для которых были ошибочно указано направление оси ординат. Здесь карты в левой колонке показаны правильно.



Рис. 3. Гистограммы распределения случаев значительной корреляции с отрицательным знаком. По оси абсцисс указано временное расстояние между картами в кэррингтоновских оборотах, по оси ординат — число случаев с коэффициентом отрицательной корреляции, превышающим 0.5 по абсолютной величине. Верхний ряд — гистограммы для зеленой корональной линии (слева) и полного магнитного поля; нижний ряд — для поля, рассчитанного по первым четырем гармоникам (слева) и поля по гармоникам с 5 по 10-ю.

На картах в верхнем ряду видно, что на высоких широтах в диапазоне $100^\circ - 180^\circ$ усиление яркости в северном полушарии (асимметрия положительна), наблюдаемое на левой карте, изменяется на ослабление яркости в том же диапазоне на правой карте (асимметрия отрицательна). Наоборот, ослабление яркости в северном полушарии на низких широтах в диапазоне $250^\circ - 300^\circ$ на левой карте изменяется на усиление яркости на правой карте. Схожие изменения можно проследить и для магнитного поля на картах нижнего ряда.

На рис. 4 приведены примеры таких карт для зеленой линии и поля больших масштабов. Карты в правой колонке отстоят от карт в левой колонке на 15—17 оборотов. Расчет произведен по 378 пространственно идентичными точкам (узлам) карт, в пределах широт $5^{\circ}-70^{\circ}$. В работе Бадалян (2012) было отмечено, что встречаются случаи, когда карта изменяется дважды — как "позитивнегатив-позитив". Можно видеть, что первая из таких трех карт через 32 оборота повторилась (хотя и со значительным искажением) в виде третьей карты. Надежных таких случаев, конечно, мало.

ЗАВИСИМОСТЬ АСИММЕТРИИ ОТ ШИРОТЫ И ОТ ФАЗЫ ЦИКЛА АКТИВНОСТИ

На рис. 5 даны средние коэффициенты корреляции асимметрии зеленой линии с полями разных масштабов в зависимости от широты. Рисунок 5 показывает, что распределение асимметрии полей больших масштабов (малых гармоник) имеет низкие коэффициенты корреляции с асимметрией в зеленой линии на всех широтах. Выше 40° этот коэффициент становится отрицательным — асимметрия полей больших масштабов совсем не похожа на асимметрию в зеленой линии и для полей малых масштабов (размеров активных областей и комплексов активности).

На рис. 6 показана зависимость коэффициентов корреляции от фазы цикла. Определение фазы (Митчелл, 1929):

$$\Phi = (\tau - m)/(|M - m|).$$
(2)

Здесь τ — текущий момент времени, M и m — моменты ближайших максимума и минимума 11-летнего цикла, соответственно. Таким образом, согласно (1), фаза равна 0 в минимуме каждого цикла активности, -1 в максимуме предшествующего цикла и +1 в максимуме последующего.



Рис. 4. Карты типа "позитив-негатив" для оборотов 1688–1693 (левая колонка) и для оборотов 1703–1708 (правая колонка). Верхний ряд — асимметрия в зеленой корональной линии, нижний ряд — поля больших масштабов.

Фаза положительна на возрастающей ветви цикла и отрицательна на убывающей ветви. Приведение данных для нескольких циклов активности к зависимости от фазы цикла имеет смысл метода наложения эпох.

В центре рис. 6 корреляция асимметрии в зеленой линии с асимметрией полного поля. Слева и справа — с полями малых и больших масштабов соответственно. Рисунки 5 и 6 показывают, что на всех широтах наибольшее сходство в распределении N–S асимметрии в линии имеет асимметрия полей малых масштабов (размеров активных областей и комплексов активности).

Ранее была рассмотрена связь яркости зеленой корональной линии с магнитными полями разных масштабов (Бадалян, 2013). Было показано, что в зоне пятнообразования корреляция яркости зеленой корональной линии с напряженностью полного магнитного поля схожа с корреляцией с напряженностью полей малых масштабов, которые в основном определяют светимость зеленой корональной линии в этой широтной зоне.

Здесь показано, что сходным образом ведет себя и северо-южная асимметрия яркости зеленой корональной линии. Магнитное поле является определяющим параметром, под воздействием которого формируются различные корональные структуры и создаются физические условия, при которых возникает излучение в зеленой линии. Тепловой режим короны является результатом взаимодействия механизмов притока и оттока вещества и энергии. Результаты, полученные Бадалян, Обридко (2006, 2007) и Бадалян (2013) и в данной работе, показывают, что эти механизмы и их взаимодействие различны в экваториальной и в полярной зонах Солнца. Различными являются и устанавливающиеся в результате такого взаимодействия условия баланса энергии и вещества в этих зонах.

Результаты работы Бадалян, Обридко (2007) указывают на то, что в минимуме, когда структура поля наиболее простая, в высокоширотной зоне доминируют волновые АС механизмы, а в приэкваториальной — DC механизмы, связанные с медленной диссипацией магнитного поля (см.



Рис. 5. Средние коэффициенты корреляции асимметрии в зеленой линии с полями (сверху вниз) больших гармоник, полным полем и полями низких гармоник).



Рис. 6. Зависимость от фазы цикла коэффициента корреляции в зеленой линии с полями больших гармоник (слева), полным полем (в центре) и крупномасштабными полями малых гармоник (справа).

также Ашванден, 2011). Подобное рассмотрение было продолжено для полей различных масштабов (Бадалян, 2013), и было показано, что в высокоширотной зоне поля больших масштабов лучше объясняют доминирование волновых АС механизмов, чем общее магнитное поле, рассчитанное при суммировании по 10 гармоникам. В экваториальных широтах поля малых масштабов, вероятнее всего, связаны с диссипативными процессами нагрева короны. Это поля масштабов больших активных областей и комплексов активности. Они определяют яркость и асимметрию зеленой корональной линии в зоне пятнообразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продолжено изучение пространственного распределения северо-южной асимметрии, начатое для асимметрии яркости зеленой корональной линии (Бадалян, 2012). В данной работе такое рассмотрение проведено для корональных магнитных полей различных масштабов. Свойства асимметрии в зеленой линии сопоставляются с асимметрией в корональных магнитных полях разных масштабов. Для самих величин яркости зеленой линии и напряженности магнитных полей такое сопоставление было выполнено Бадалян (2013), и было показано, что светимость зеленой линии в зоне пятнообразования определяется полями масштабов активных областей.

В работе получены следующие результаты:

1. Построены синоптические карты распределения северо-южной асимметрии для яркости зеленой корональной линии, полного магнитного поля и полей малых и больших масштабов за 1977— 2001 гг.

2. Многие особенности распределения североюжной асимметрии на поверхности Солнца, обнаруженные ранее в поведении асимметрии зеленой корональной линии, характерны также и для магнитных полей различных масштабов. Таким образом, распределение асимметрии и его временные изменения имеют универсальный характер.

3. Кросс-корреляция этих карт для совокупности пространственно совпадающих точек показала, что наибольший коэффициент корреляции североюжной асимметрии в зеленой линии показывает асимметрия полей малых масштабов. Асимметрия глобальных полей имеет малую корреляцию с асимметрией зеленой линии. Таким образом, подтверждается сделанное ранее предположение, что пространственное распределение асимметрии может быть связано с магнитными полями масштабов больших активных областей и комплексов активности.

4. Зональные структуры, наблюдаемые в североюжной асимметрии, показывают, что усиление или уменьшение активности в северном полушарии относительно южного довольно часто меняется на противоположное на соответствующем характерном временном масштабе, иначе говоря, синоптическая карта изменяется на свой негатив.

Рассмотренное пространственное распределение северо-южной асимметрии в зеленой корональной линии и в магнитном поле показало, что такой подход к изучению асимметрии открывает новые возможности для исследования и интерпретации этого феномена. Разумным представляется предположение, что образование "структур" асимметрии, их размеры и временное изменение могут быть связаны с магнитным полем и, вероятно, с поведением достаточно высоких (выше квадруполя) гармоник поля. Исследование такой связи, возможно, приблизит нас к выяснению природы N—S асимметрии солнечной активности.

Подчеркнем, что северо-южная асимметрия является особой, очень информативной характеристикой солнечной активности, которая является свидетельством и мерой несинхронности работы двух полушарий Солнца. Особенности поведения северо-южной асимметрии в цикле активности могут быть полезны при построении теорий динамо.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 17-02-00300).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ашванден (M.J. Aschwanden), http:// www.lmsal.com/~aschwand/ppt/2011_JENAM.ppt (2011).
- Бадалян О.Г., Циклы активности на Солнце и звездах. Тр. рабочего совещания 18–19 декабря 2009 г., Москва (ред. В.Н. Обридко, Ю.А. Наговицын, Изд-во BBM, С-Петербург, 2009), с. 205.
- Бадалян О.Г., Солнечная и солнечно-земная физика — 2010 Тр. Всероссийской ежегодн. конф. (ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын, С.-Петербург, ГАО РАН, 2010), с. 27.
- 4. Бадалян О.Г., Астрон. журн. 88, 1009 (2011).
- 5. Бадалян О.Г., Письма в Астрон. журн. 38, 54 (2012а) [O.G. Badalyan, Astron. Lett. 38, 51 (2012а)].
- 6. Бадалян О.Г., *Солнечная и солнечно-земная физика* — 2012 Тр. Всероссийской ежегодн. конф. (ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын, С.-Петербург, ГАО РАН, 2012b), с. 5.
- 7. Бадалян О.Г., Астрон. журн. **90**, 253 (2013).
- 8. Бадалян, Обридко (O.G. Badalyan and V.N. Obridko), Solar Phys. **238**, 271 (2006).
- Бадалян О.Г., Обридко В.Н., Письма в Астрон. журн. 33, 210 (2007) [О.G. Badalysn, V.N. Obridko, Astron. Lett. 33, 182 (2007)].
- 10. Бадалян, Обридко (О.G. Badalyan and V.N. Obridko), New Astron. **16**, 357 (2011).
- Бадалян О.Г., Обридко В.Н., Солнечная и солнечно-земная физика 2015 Тр. Всероссийской ежегодн. конф. (ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын, С.-Петербург, ГАО РАН, 2015), с. 19.
- Бадалян, Обридко (О.G. Badalyan and V.N. Obridko), Astron. Astrophys. **603**, id. A109, 10 (2017).
- 13. Бадалян О.Г., Обридко В.Н., Рыбак Я., Сикора Ю., Астрон. журн. **82**, 740 (2005).
- 14. Бадалян и др. (O.G. Badalyan, V.N. Obridko, and J. Sýkora), Solar Phys. **247**, 379 (2008).
- 15. Баллестер и др. (J.L. Ballester, R. Oliver, and M. Carbonell). Astron. Astrophys. **431**, L5 (2005).
- 16. Вальдмайер (M. Waldmeier), Solar Phys. **29**, 332 (1971).
- 17. Вальдмайер (M. Waldmeier), Zs. Astrophys. **38**, 37 (1955).
- 18. Визосо, Баллестер (G. Vizoso and J.L. Ballester), Astron. Astrophys. **229**, 540 (1990).
- 19. Гусева, Наговицын (S.A. Guseva and Yu.A. Nagovitsyn), Geomagnetism and Aeronomy **52**, 431 (2012).
- 20. Карбонелл и др. (M. Carbonell, R. Oliver, and J.L. Ballester), Astron. Astrophys. 274, 497 (1993).

- 21. Карбонелл и др. (M. Carbonell, J. Terradas, R. Oliver, and J.L. Ballester), Astron. Astrophys. **476**, 951 (2007).
- 22. Кнаак и др. (R. Knaack, J.O. Stenflo, and S.V. Berdyugina), Astron. Astrophys. **418**, L17 (2004).
- 23. Ли и др. (K.J. Li, J.X. Wang, S.Y. Xiong, et al.), Astron. Astrophys. **383**, 648 (2002).
- 24. Мариш и др. (J. Maris, M.D. Popescu, and M. Mierla), Rom. Astron. J. **12(2)**, 131 (2002).
- 25. Митчелл (S.A. Mitchell), Handb. Aph. 4, 231 (1929).
- 26. Мюллер (R. Müller), Z. Astrophys. **35**, 61 (1954).
- 27. Наговицын Ю.А., Изв. Главн. Астрон. Обсерв. **212**, 145 (1998).
- 28. Ньютон, Милсом (H.W. Newton and A.S. Milsom), MNRAS 115, 398 (1955).
- 29. Обридко, Шельтинг (V.N. Obridko and B.D. Shelting), Solar Phys. **184**, 187 (1999).
- 30. Рушин (V. Rušin), Bull. Astron. Inst. Czechosl. **31**, 9 (1980).
- 31. Сикора (J. Sýkora), Solar and Interplanetary Dynamics, Ed. M. Dryer, E. Tandberg-Hanssends (Reidel, Dordrecht, 1980), p. 87.

- 32. Сикора (J. Sýkora), Bull. Astron. Inst. Czechosl. 22, 12 (1971).
- 33. Сикора, Рыбак (J. Sýkora and J. Rybák), Solar Phys. **261**, 321 (2010).
- 34. Сикора, Рыбак (J. Sýkora and J. Rybák), Adv. Space Res. **35**, 393 (2005).
- 35. Сторини, Сикора (M. Storini and J. Sýkora), Nuovo Cimento **20С**, 923 (1997).
- 36. Харшиладзе А.П., Иванов К.Г., Геомагн. и аэрон. **34(4)**, 22 (1994).
- 37. Хоексема (J.T. Hoeksema), *Solar magnetic fields* — *1985 through 1990* (Report CSSA-ASTRO-91-01, 1991).
- 38. Хоексема, Шеррер (J.T. Hoeksema and P.H. Scherrer), *The Solar Magnetic Field* — *1976 through 1985* (WDCA Report UAG-94, NGDC, Boulder, 1986).