

**КОРОНА ВО ВРЕМЯ ПОЛНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 Г.  
И РАЗВИТИЕ 24-го ЦИКЛА****CORONA DURING THE TOTAL SOLAR ECLIPSE ON MARCH 20, 2015,  
AND 24 CYCLE DEVELOPMENT****С.А. Язев***Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, syazev@gmail.com  
Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия***А.В. Мордвинов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, avm@iszf.irk.ru***А.А. Дворкина-Самарская***Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, kobra2003@rambler.ru***S.A. Yazev***Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, syazev@gmail.com  
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia***A.V. Mordvinov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, avm@iszf.irk.ru***A.A. Dvorkina-Samarskaya***Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, kobra2003@rambler.ru*

**Аннотация.** Выполнен анализ структуры корональных образований по данным наблюдений полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. Индекс Людендорфа, характеризующий форму короны, равен 0.09. Структура короны в северном полушарии соответствует фазе максимума цикла солнечной активности, в южном полушарии — постмаксимальной стадии. Асинхронное развитие магнитной активности в северном и южном полушариях Солнца привело к существенной асимметрии корональных структур, наблюдаемых в период смены знака полярных магнитных полей в текущем цикле. Полярные лучевые структуры в южном полушарии связаны с присутствием полярной корональной дыры, в то время как в северном полушарии полярная дыра еще не сформировалась. Выполнен анализ связи крупномасштабных магнитных полей с расположением высоких корональных структур.

**Ключевые слова:** полное солнечное затмение, асимметрия, солнечная корона.

**Abstract.** We analyzed the structure of coronal features, using data on the March 20, 2015 total solar eclipse. The Ludendorff index characterizing the flattening of the corona is 0.09. The solar corona structure in the Northern and Southern hemispheres corresponds to the maximum and post-maximum phases of solar activity, respectively. The asynchronous development of magnetic activity in the Sun's Northern and Southern hemispheres caused a substantial asymmetry of coronal features observed at the reversal of polar magnetic fields in the current cycle. The polar ray structures in the Southern Hemisphere are associated with the polar coronal hole, while in the Northern Hemisphere a polar hole has not been formed yet. We examine the relation between large-scale magnetic fields and location of high coronal structures.

**Keywords:** total solar eclipse, asymmetry, solar corona.

**ВВЕДЕНИЕ**

Во время полных солнечных затмений структура короны визуализирует крупномасштабное магнитное поле Солнца [Несмянович, 1965; Кучми и др., 2011]. Анализ изображений короны дал новую информацию о циклических изменениях глобального магнитного поля Солнца [Клепиков, Филиппов, 2006; Judge et al., 2010], обнаружены вековые изменения структуры короны [Platov, 2010; Мордвинов и др., 2011]. Исследование структуры солнечной короны остается актуальной задачей гелиофизики, особенно в контексте необычного развития активности в текущем цикле.

По-видимому, одному из первых установить связь между формой затменной короны и фазой 11-летнего цикла солнечной активности удалось российскому астроному А.П. Ганскому в 1897 г. [Hansky, 1897; Воронцов-Вельяминов, 1956; Перель, 1951]. Исследуя имевшиеся в его распоряжении снимки затме-

ний, включая полученные им лично во время экспедиции на Новую Землю изображения затмения 1896 г., А.П. Ганский отметил, что во время максимума солнечной активности корона окружает Солнце в виде равномерного сияния, а в годы минимума корона вытягивается вдоль солнечного экватора. Было показано, что лучи короны пространственно связаны с протуберанцами. Анализ изображений короны, полученных во время 12 затмений, позволил А.П. Ганскому выделить три основных морфологических типа короны: максимальный, промежуточный и минимальный.

Более подробную классификацию типов короны на основе снимков, полученных в конце XIX — первой половине XX в., предложил киевский астроном А.Т. Несмянович [Несмянович, 1965]. В рамках предложенного им подхода индекс геометрического сжатия короны рассматривался в зависимости от фазы цикла солнечной активности  $F$  на дату затмения:

$$F = \frac{T - T_{\min}}{|T_{\max} - T_{\min}|},$$

где  $T$  — момент полного затмения,  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  — соответственно моменты максимума и следующего за максимумом минимума цикла (на фазе спада) или моменты максимума и предшествующего ему минимума цикла (на фазе роста), выраженные в месяцах. Значения  $F$  при таком подходе оказываются положительными на ветви подъема цикла и отрицательными на ветви спада.

Данная классификация показана на рис. 1 и в табл. 1 [Несмянович, 1965]. Следует заметить, что она является достаточно грубой, но в целом отражает основные закономерности изменения наблюдаемой конфигурации короны в картинной плоскости в ходе цикла. Принято считать, что причина указанных изменений связана с отклонениями гелиосферного токового слоя (ГТС) от плоскости гелиоэкватора, которые в общем случае также связаны с фазой цикла [Гуляев, 1992; Макаров и др., 1996; Gulyaev, 1997; Koomen et al., 1998; Пещеров и др., 2006]. В то же время отмечены случаи не типичных для данной фазы цикла отклонений ГТС от экватора, которые приводили к возникновению не соответствующих классификации Несмяновича конфигураций короны [Гуляев, 1992; Gulyaev, 1997; Пещеров и др., 2006]. Тем не менее, указанная классификация, по мнению авторов, в первом приближении может быть использована для оценки ситуации.

Очередное полное солнечное затмение наблюдалось 20 марта 2015 г. Силами экспедиции, организованной Иркутским государственным университетом, с двух точек острова Западный Шпицберген — на склоне г. Пирамида на высоте около 400 м и на берегу залива — были выполнены наблюдения затменной короны.

В статье представлены результаты анализа новых изображений короны, полученных на постмаксимальной фазе солнечного цикла. Целью работы является изучение структуры короны 20 марта 2015 г., определение ее типа в соответствии с классификацией А.Т. Несмяновича и сопоставление со структурой крупномасштабных магнитных полей на Солнце. С точки зрения авторов, это исследование дополняет

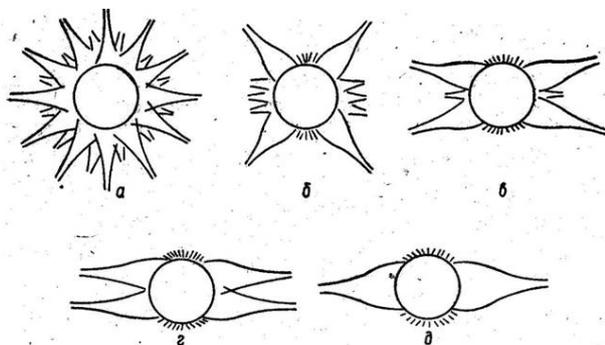


Рис. 1. Типы затменной короны по А.Т. Несмяновичу [Несмянович, 1965]: а — максимальный, б — предмаксимальный или послемаксимальный, в — предминимальный или послеминимальный, г — минимальный, д — идеально-минимальный

банк данных, которыми располагает гелиофизика, о характере развития 24 цикла.

## ПРОГНОЗ МОРФОЛОГИИ КОРОНЫ ВО ВРЕМЯ ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 г.

Согласно подходу Несмяновича, феноменология (тип) короны является функцией фазы цикла  $F$ . Текущий 24-й цикл солнечной активности начался в январе 2009 г. и достиг максимума в апреле 2014 г. спустя 64 месяца (5.3 года). Подобная продолжительность ветви роста  $T_r$  имеет прецеденты, типичные для эпохи конца XIX — первой половины XX в. Так, продолжительность  $T_r$  составила 4.0 года в 15 цикле, 4.5 года в 13 цикле, 4.8 года в 16 цикле, 5.0 года в 12 цикле, 5.3 года в 14 цикле. Таким образом, текущий цикл близок по некоторым своим характеристикам циклам с номерами 12–16. Это дает основания предположить, что 24 цикл может развиваться по сценарию одного из этих циклов (циклов сравнения), что позволяет сделать предварительную оценку ожидаемой продолжительности текущего цикла.

В работе [Язев, 2012] отмечалось, что изменения среднемесячных значений чисел Вольфа  $W$  в текущем цикле практически точно соответствовали их вариациям в 16 цикле (1923–1933 гг.). Был приведен график, аналогичный рис. 2, где последняя точка соответствовала августу 2012 г.; коэффициент корреляции кривых составлял 0.96. Однако, начиная с октября 2012 г. (46 месяц от начала цикла) синхронность кривых нарушается (практически они идут в противофазе, рис. 3). Год спустя, в октябре 2013 г. начался второй мощный импульс активности, обеспечивший главный максимум цикла. В основном повторился сценарий 16 цикла. Различие состоит в том, что в 16 цикле наблюдался импульс активности между двумя основными максимумами (в текущем 24 цикле этот импульс отсутствовал). В целом же следует отметить высокую степень схожести кривых, описывающих развитие обоих циклов, включая совпадение «возраста» и даже амплитуды соответствующих импульсов развития активности (рис. 2). Это обстоятельство позволяет использовать для сравнения графики, построенные на основе среднемесячных данных, а не сглаженные кривые, как это обычно делается.

Достаточно близкими кривой, описывающей развитие 24 цикла в единицах среднемесячных чисел Вольфа  $W$ , являются кривые для 12 и 14 циклов (рис. 3). Если схожесть 12 и 24 циклов на стадии фазы роста оказалась меньше, чем в случае с 16 циклом, то начиная примерно с 50 месяца от начала цикла степень схожести была достаточно высокой (рис. 3, а). То же можно сказать о 14 цикле (рис. 3, б).

Основываясь на гипотезе о том, что текущий 24 цикл близок по своим параметрам «невысоким» 12, 14 и 16 циклам, можно рассчитать фазу  $F$  полного затмения 20.03.2015 г. для максимума 24 цикла, исходя из продолжительности циклов сравнения.

Если считать, что момент затмения  $T=67$  месяцев от начала цикла, максимум  $T_{\max}$  наблюдался на 64 месяце от начала цикла (рис. 1), то в соответствии с формулой (1) могут быть вычислены значения  $F$  фазы цикла, соответствующей моменту затмения,

Таблица 1

Типы короны по А.Т. Несмяновичу

	Тип короны	Полярные лучевые системы	Корональные лучи	Фаза цикла
1	максимальный	не наблюдаются	радиальные, на всех широтах	$ F  > 0.85$
2	предмаксимальный или послемаксимальный	наблюдаются хотя бы в одном полушарии	радиальные либо с небольшим наклоном, на высоких широтах	$0.5 <  F  < 0.85$
3	предминимальный или послеминимальный	хорошо развиты в обоих полушариях	сильно наклонены к плоскости экватора	$0.15 <  F  < 0.5$
4	минимальный	сильно развиты в обоих полушариях	параллельны плоскости экватора	$ F  < 0.15$
5	идеально-минимальный	сильно развиты в обоих полушариях	расположены вдоль плоскости экватора	$ F  < 0.05$

Таблица 2

Фаза цикла на дату затмения в зависимости от сценария цикла

Сценарий цикла	Продолжительность фазы роста $T_r$ , лет	Продолжительность цикла, лет/месяцев	$F$	Ожидаемый тип короны
16	4.8	10.2/122.4	0.95	1
14	5.3	11.9/142.8	0.96	1
12	5.0	10.7/128.4	0.95	1

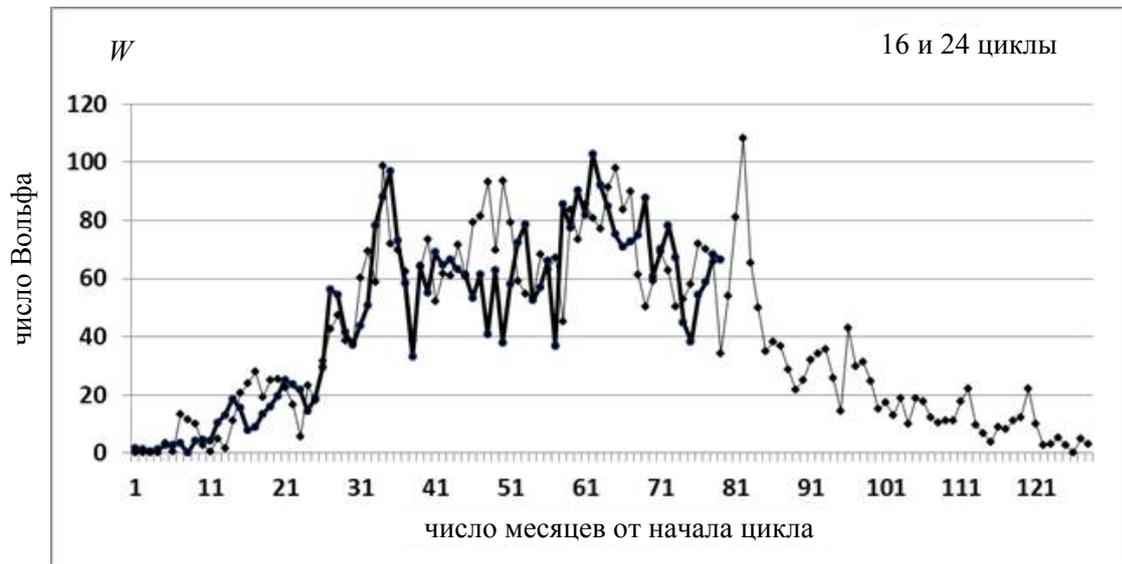


Рис. 2. Развитие 24 (жирная линия) и 16 (тонкая линия) циклов солнечной активности, выраженное в среднемесячных значениях чисел Вольфа. Последняя точка на оси абсцисс для 24 цикла соответствует июлю 2015 г.

исходя из предполагаемой продолжительности текущего цикла по типу трех циклов сравнения. Результаты приведены в табл. 2.

В случае реализации любого из трех сценариев сравнения (по типу 16, 14 либо 12 цикла), фаза цикла  $F$  на дату затмения 20.03.2015 г. оказалась равной 0.95–0.96. В соответствии с табл. 1, такая фаза соответствует максимальному типу короны (рис. 1, а).

### МОРФОЛОГИЯ КОРОНЫ 20 МАРТА 2015 г. ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 4 показано изображение короны Солнца, синтезированное по серии фотографий с различными экспозициями. При построении этого изображения было применено нормирование локальной яркости на усредненные по радиусу значения. Для

уменьшения влияния шумов и усиления мало контрастных корональных образований проводилась двумерная вейвлет-фильтрация нормированного изображения. Такая обработка позволила выявить тонкую структуру короны Солнца, которая едва угадывалась в комбинированном изображении, построенном с использованием исходных фотографий (рис. 5).

В работе [Pishkalo, 2011] дана сводка 170 значений индекса Людендорфа  $\epsilon$ , характеризующего сжатие короны по изофоте  $r=2R_s$ , где  $R_s$  — радиус Солнца. Индекс  $\epsilon$  численно характеризует форму короны в квазиэллиптическом приближении. Изофоты были построены многими авторами на протяжении столетия по зарисовкам и фотографиям короны для 60 затмений, наблюдавшихся с 1851 по 2010 г. В работе [Pishkalo, 2011] подтвержден вывод, сделанный рядом авторов о том, что величина  $\epsilon$  систематически меняется с фазой цикла от нуля (во время максимума) до 0.4 (во время минимума).

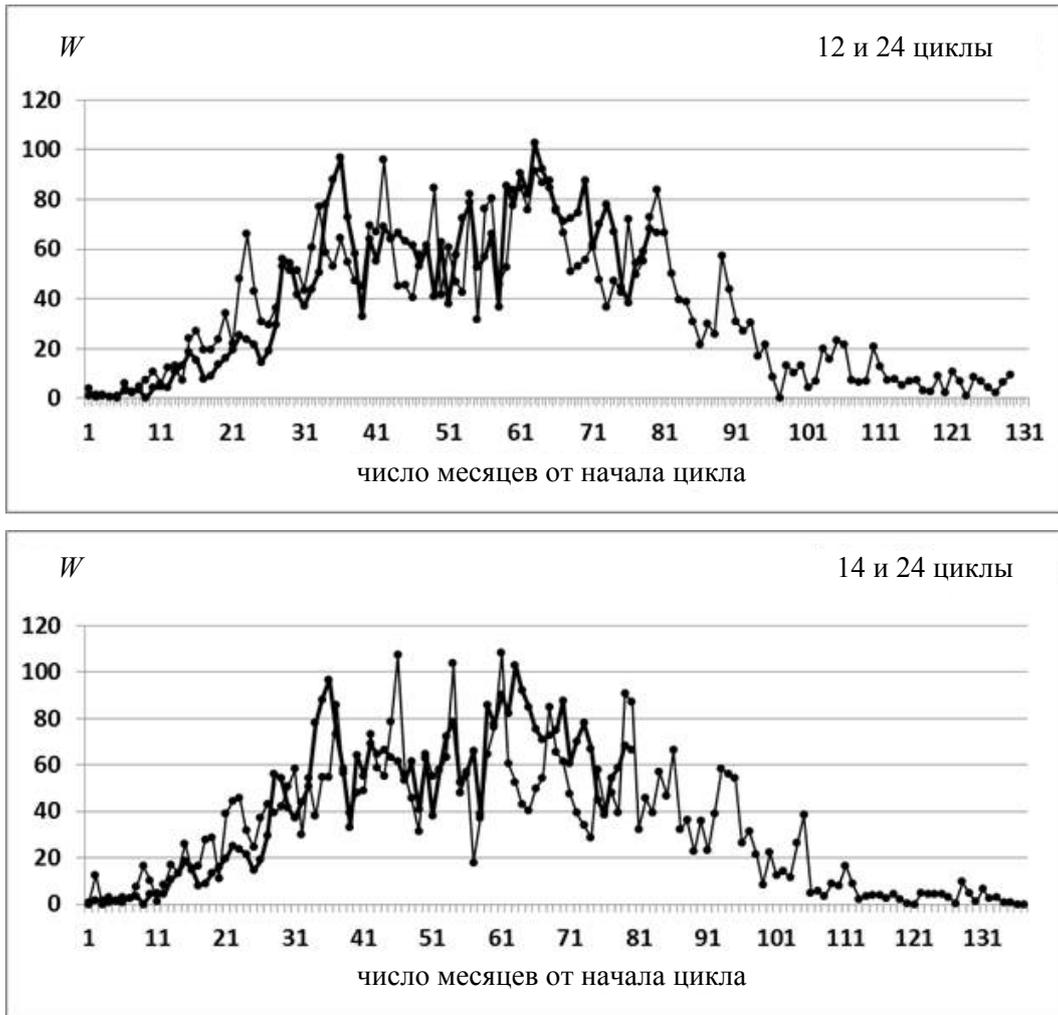


Рис. 3. Развитие 24 (толстая линия, а, б), 12 (тонкая линия, а) и 14 (тонкая линия, б) циклов солнечной активности, выраженное в среднемесячных значениях чисел Вольфа. Последняя точка на оси абсцисс для 24 цикла соответствует июлю 2015 г.

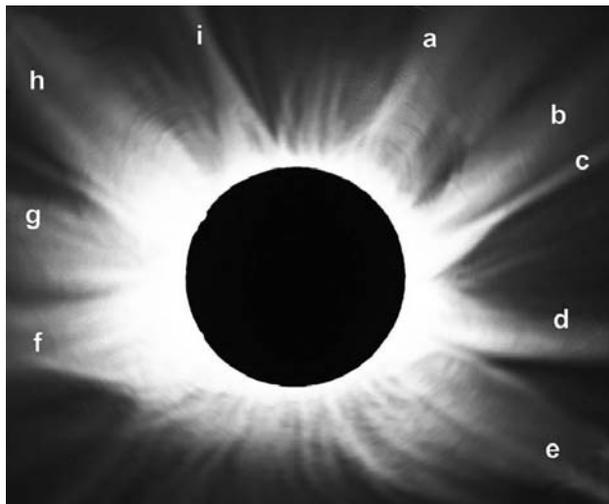


Рис. 4. Корона во время затмения 20.03.2015 г.: комбинированное изображение на основе серии снимков, выполненных М.В. Чекулаевым. Буквами а-і показаны наиболее протяженные корональные лучи

Для серии изображений короны 20 марта 2015 г. был получен набор изофот с максимальным экваториальным радиусом, равным  $2R_s$  (рис. 5). По внешней изофоте с использованием методики, описанной в

[Pishkalo, 2011], был вычислен индекс Людендорфа  $\epsilon=0.09$ . Судя по сводке [Pishkalo, 2011], аналогичные значения отмечались во время затмений 4 декабря 2002 г. при фазе цикла  $F=-0.71$  (тип короны 2), 8 июня 1937 г. при  $F=0.95$  (тип короны 1) и 16 февраля 1980 г. при  $F=-0.97$  (тип короны 1). Можно утверждать, что значение индекса Людендорфа  $\epsilon=0.09$  характерно для фазы максимума цикла.

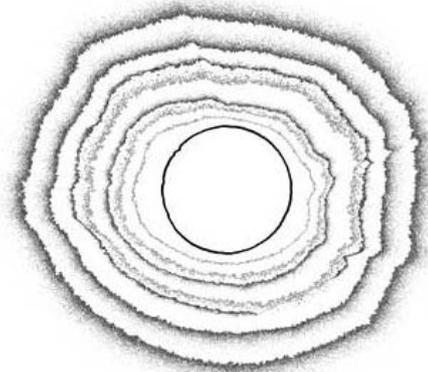


Рис. 5. Корона 20 марта 2015 г. Изофоты проведены на основе серии снимков, полученных М.Г. Гавриловым, В.В. Рябенко и М.В. Чекулаевым

Таблица 3

Свойства корональных структур во время затмения 20.03.2015 г.

Структура	Положение на лимбе	Широта основания на лимбе	Высота над лимбом, $R_s$	Свойства структуры
a	NW	50° N	1	радиальный луч
b	NW	17° N	1.6	радиальный луч
c	NW	8° N	2.1	радиальный луч
g	NE	27° N	1.6	радиальный луч
h	NE	42° N	1.5	корональный стример, широкий радиальный луч, в основании яркий протуберанец
i	NE	82° N	1.3	высокоширотный радиальный луч
d	SW	25° S	1.9	протяженный по позиционному углу корональный луч, отклонение к плоскости экватора
e	SW	57° S	1.5	корональный луч, отклонение к плоскости экватора
f	SE	20° S	1.8	протяженный по позиционному углу корональный луч, отклонение к плоскости экватора

Тем не менее, более детальный анализ структуры короны по снимкам затмения показал, что вывод о максимальном типе короны, который можно сделать на основе значения индекса Людендорфа, можно признать верным лишь отчасти (рис. 4, 5).

С использованием полученных изображений короны выделены, по крайней мере, девять ярко выраженных высоких корональных структур, в том числе шесть — в северном полушарии (рис. 4). Их основные характеристики приведены в табл. 3. Структуры (корональные лучи) обозначены буквами, их положение на лимбе (квадранты) указано во втором столбце. В третьем столбце приведены значения широты середины основания коронального луча на лимбе, в случаях протяженных по позиционному углу лучей **d**, **f** эта величина оценена приближенно. Максимальная высота лучей над лимбом, выраженная в радиусах Солнца (четвертый столбец), определена по оригинальным фотографиям короны, полученным В.В. Рябенко и М.Г. Гавриловым, с максимальной экспозицией (0.1 с). Реальная высота лучей существенно больше, речь идет о наиболее ярких участках, выделяемых на оригинальных (необработанных) изображениях. В пятом столбце таблицы указаны дополнительные свойства корональных структур.

При рассмотрении отдельно северного полушария может быть сделан вывод, что корона в этом полушарии соответствует типу 1 классификации А.Т. Несмяновича (табл. 1). В частности, корональные лучи **a**, **b**, **c**, **g**, **h**, **i** радиальны, расположены на всех широтах, включая высокие (южная граница луча **i** находится на восточном лимбе, северная — на западном, проекция луча на картинную плоскость — практически над полюсом). В северном полушарии не наблюдаются полярные лучевые структуры.

В отличие от северного полушария трудно говорить о соответствии короны южного полушария

максимальному типу. Широкий размытый и относительно неяркий на оригинальных снимках корональный луч **d** заметно отклонен от радиального направления к плоскости экватора. Сравнительно узкий луч **e** также отклоняется к плоскости экватора. На восточном лимбе южного полушария отмечен широкий протяженный по позиционному углу и размытый луч **f** (20° N), также заметно отклоняющийся к плоскости экватора от радиального направления. В основании этого луча наблюдался протуберанец.

На более высоких широтах южного полушария отсутствуют высокие корональные лучи, на снимках наблюдаются полярные лучевые структуры, квазирадиальные около полюса и отклоняющиеся к плоскости экватора (к востоку на восточном лимбе и к западу на западном лимбе) по мере уменьшения широты.

Согласно табл. 1, перечисленные признаки характерны для короны типа 3 (постмаксимальная корона), для которой характерны сравнительно низкоширотные корональные лучи, отклоняющиеся к плоскости экватора, и имеется полярная лучевая структура на полюсе. Корона 20 марта 2015 г. скорее может быть «сложена из половинок»: северное полушарие соответствует типу 1, южное — типу 2.

Таким образом, феноменологические характеристики короны во время затмения 20 марта 2015 г., по-видимому, формально не соответствуют ни одному из типов по классификации А.Т. Несмяновича. Очевидно, что это связано с существенной северо-южной асимметрией развития солнечной активности, наблюдаемой в течение 24 цикла и наметившейся в конце 23 цикла [Язев, 2015].

Одно из проявлений указанной асимметрии, в частности, следующее. Уже к июню 2014 г. на южном полюсе Солнца сформировалась асимметричная относительно гелиографического полюса обширная полярная корональная дыра, что, по-видимому,

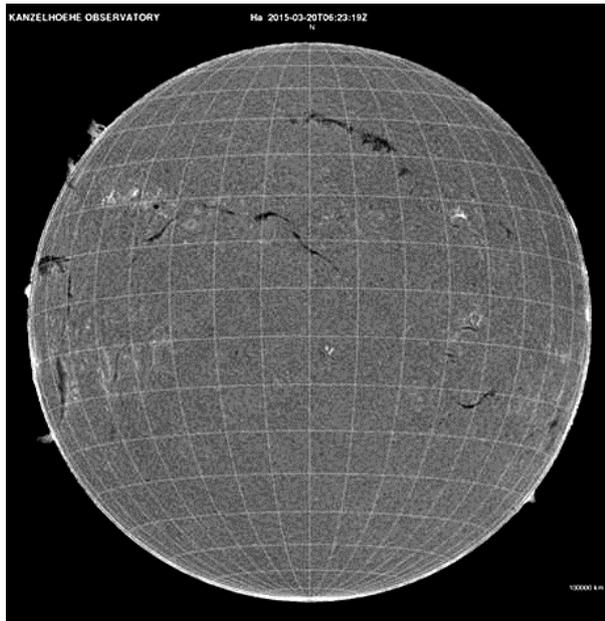


Рис. 6. Солнце в день затмения в линии На, обс. Kanzelhoehe

позволило развиваться полярным лучевым структурам, трассирующим основания линий открытого поля, уходящего из полярной области высоко в корону. В последующие месяцы указанная корональная дыра увеличивалась в размерах и становилась все более контрастной.

В северном полушарии в день затмения наблюдались высокоширотные (до  $40^\circ$  и выше) протуберанцы на лимбе и волокна на диске (рис. 6). Высокие протуберанцы (диффузные волокна) разделяют области с различной полярностью радиальной компоненты магнитного поля. Это означает, что здесь еще не сформировалась крупномасштабная униполярная магнитная область, которая может стать основой будущей корональной дыры.

Можно предположить, что низкая пятенная активность в северном полушарии в 2013–2014 гг. привела к уменьшению переноса остаточных хвостовых полей активных областей на высокие широты, что, в свою очередь, определило задержку процесса формирования корональной дыры и соответствующей конфигурации магнитного поля в полярной зоне. В результате во время затмения не наблюдались полярные лучевые структуры, но были отмечены высокоширотные корональные лучи.

### ТОНКАЯ СТРУКТУРА КОРОНЫ И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА

Известно, что крупномасштабное магнитное поле Солнца влияет на физические процессы в его атмосфере, во многом определяя структуру и вид короны [Кучми и др., 2011]. На рис. 7 показана тонкая структура короны во время полного солнечного затмения 20 марта 2015 г., комбинированное изображение короны получено М. Дрюкмуллером с помощью оригинальной методики [Druckmüller, 2013]. На диске Солнца контурами отмечены границы раздела полярностей крупномасштабных маг-

нитных полей по данным VSM/SOLIS. Вдоль этих границ располагаются хромосферные волокна, форма которых отображается черными утолщениями. Знаками «+» и «-» отмечены области, занятые магнитными полями соответствующих полярностей.

Контур со штриховкой указывает границы корональных дыр (КД). Наблюдаемые КД расположены в униполярных магнитных областях (УМО), их характерный наклон к гелиоэкватору указывает на то, что они сформированы меридиональными течениями и дифференциальным вращением Солнца [Wang et al., 2007; Eselevich et al., 1999]. Полярная КД на южном полюсе расположена в обширной УМО отрицательной полярности, которая сформировалась в результате меридионального переноса остаточных магнитных полей после распада долгоживущих комплексов активности, которые наблюдались в период максимума магнитной активности в южном полушарии [Мордвинов, Язев, 2013; Mordvinov, Yazev, 2014; Mordvinov et al., 2015]. В полярной зоне северного полушария наблюдается небольшая КД, расположенная внутри УМО положительной полярности. Структура этих высокоширотных образований также определяется дифференциальным вращением и меридиональными течениями.

В целом, как указано выше, корона имеет вид, характерный для периода максимума активности. Наблюдается также северо-южная асимметрия корональных структур. Протяженные лучи и стримеры (шлемы) составляют корону с восточной, северной и западной сторон, в то время как вблизи южного полюса сформировалась система полярных щеточек (перьев). Таким образом, в северном полушарии корона структурирована по типу, характерному для максимума активности, а в южном полушарии ее вид соответствует фазе перехода от максимума активности к минимуму.

Изображения короны, полученные во время затмений, позволяют непосредственно сопоставить отдельные корональные образования с магнитными полями

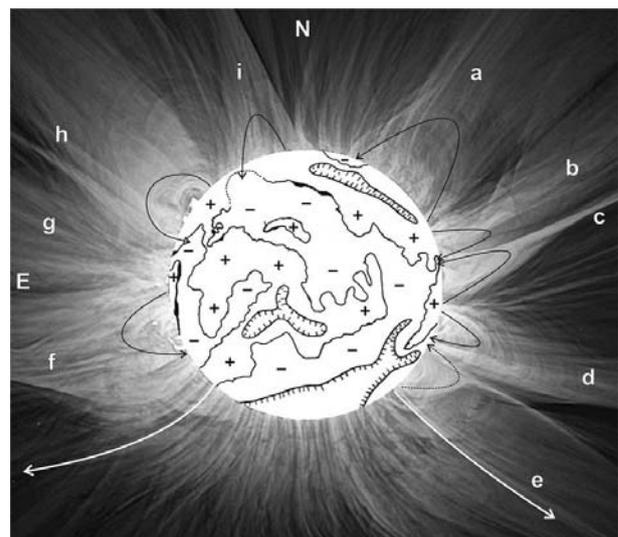


Рис. 7. Тонкая структура короны, крупномасштабные магнитные поля и корональные дыры на Солнце 20.03.2015 г. Комбинированное изображение короны приводится с разрешения автора (М. Druckmüller)

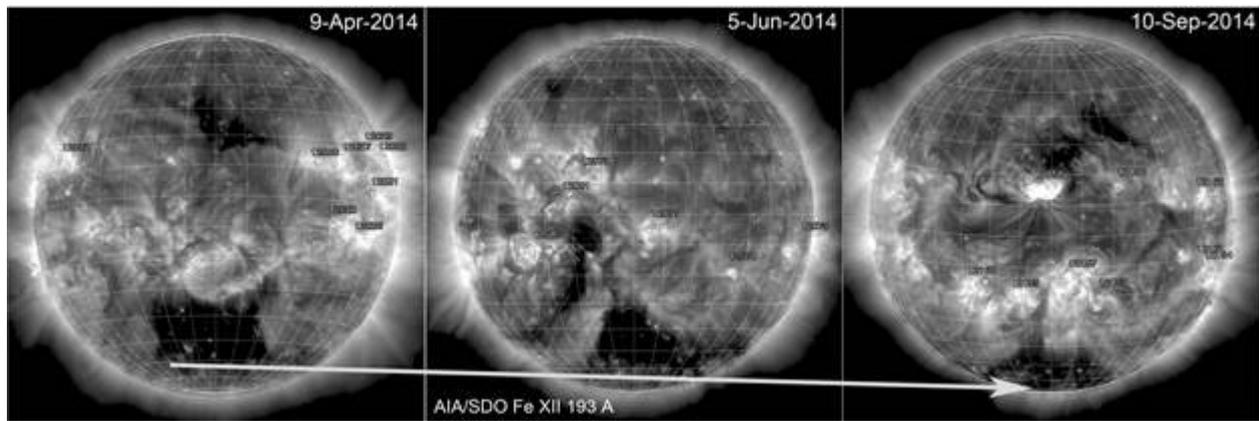


Рис. 8. Формирование полярной корональной дыры на южном полюсе Солнца

на поверхности Солнца. Известно, что корональные лучевые структуры визуализируют силовые линии магнитного поля в атмосфере Солнца. Наиболее протяженные лучевые структуры наблюдаются над корональными арками, основания которых приходятся на области магнитных полей противоположной полярности. На рис. 7 показана схема силовых линий магнитного поля (изображены черными стрелками) с учетом знака фотосферных полей и особенностей тонкой структуры корональных образований. Такая схема согласуется с существующими представлениями о типичных конфигурациях магнитного поля, существующих в поясах и цепочках стримеров [Wang et al., 2007; Eselevich et al., 1999].

Вблизи северного полюса наблюдался стример, лежащий в основании коронального луча **a**. Одно из фотосферных оснований стримера приходится на область отрицательной полярности, большая часть которой находится за лимбом. Такая ситуация иллюстрирует сложную структуру магнитного поля в полярной зоне северного полушария и объясняет, почему на северном полюсе еще не сформировалась устойчивая корональная дыра.

Корональные лучи **b**, **c** и **d**, **e** связаны со стримерами, в основаниях которых лежат двойные арки магнитного поля. Такие структуры, как правило, связаны с цепочками стримеров (псевдостримерами), магнитная структура которых на рисунке показана стрелками. Пунктирной стрелкой отмечена арка, видимые основания которой проецируются на области магнитного поля отрицательной полярности. Тем не менее, за сутки до затмения вблизи южного основания стримера наблюдалась область положительной полярности, которая в день затмения была скрыта за лимбом. Таким образом, корональные лучи связаны с цепочкой стримеров, противоположные края которых имеют положительную полярность.

Вблизи южного полюса Солнца наблюдались полярные щеточки, края которых отмечены белыми стрелками. Фотосферные основания полярных щеточек приходятся на обширную УМО положительной полярности, в которой сформировалась устойчивая КД, ее эволюция показана на рис. 8.

Корональные лучи **f**, **h**, **i** связаны со стримерами, основания которых приходятся на области противо-

положных полярностей. Магнитная структура этих образований схематически указана стрелками. Таким образом, пояс стримеров с восточной стороны Солнца находится над крупномасштабной линией раздела полярностей, вдоль которой расположены протуберанцы, видимые на лимбе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ данных, полученных в день полного солнечного затмения 20 марта 2015 г., позволил изучить структуру короны Солнца в связи с фотосферными магнитными полями. Показано, что структура короны в северном полушарии соответствует эпохе максимума активности, в южном — постмаксимальной эпохе.

Затменные наблюдения короны сразу после смены полярностей на полюсах Солнца позволили выявить особенности крупномасштабных магнитных полей, влияющих на формирование полярных корональных дыр. Представлены аргументы в пользу предположения о том, что наблюдавшиеся во время затмения корональные образования связаны с асинхронным развитием магнитной активности в северном и южном полушариях Солнца. Значительная северо-южная асимметрия солнечной активности в текущем цикле привела к различиям в структуре магнитных полей в полярных областях Солнца. Эти особенности наглядно проявились в асимметрии полярных КД: на южном полюсе устойчивая КД сформировалась в конце 2014 г., тогда как вблизи северного полюса наблюдаются лишь короткоживущие зачаточные КД.

Работа выполнена при частичной поддержке государственным заданием в сфере научной деятельности (проектная часть) № 3.615.2014/К. Авторы выражают благодарность участникам экспедиции под научным руководством С.А. Язева: М.Г. Гаврилову, А.Л. Мананникову, М.А. Меркулову, В.В. Рябенко, Д.В. Семенову, Е.Д. Скарденевой и М.В. Чекулаеву за участие в получении наблюдательных данных во время затмения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воронцов-Вельяминов Б.А. Очерки истории астрономии в России. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1956. С. 327–329.

Всехсвятский С.К., Никольский Г.М., Иванчук В.И., Несмянович А.Т., Пономарев Е.А., Рубо Г.А., Чередниченко В.И. Солнечная корона и корпускулярное излучение в межпланетном пространстве. Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1965. 216 с.

Гуляев Р.А. Внешняя солнечная корона как оптическое проявление гелиосферного токового слоя // Успехи физ. наук. 1992. Т. 162. Вып. 12. С. 155–159.

Клепиков Д.В., Филиппов Б.П. Поведение магнитных фокусов полярного поля в цикле солнечной активности по данным SOHO/EIT // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. С. 1436–1438.

Кучми С.Л., Мерзляков В.Л., Молоденский М.М. О трехмерной структуре солнечной короны // Астрон. журнал. 2001. Т. 78, № 10. С. 953–960.

Макаров В.И., Тлатов А.Г., Фатянов М.П. Трехмерное моделирование короны на различных фазах солнечного магнитного цикла. Период: 1870–1991 гг. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 10. С. 1268–1274.

Мордвинов А.В., Язев С.А. Распад комплексов активности и формирование корональных дыр на Солнце // Астрон. журнал. 2013. Т. 90, № 6. С. 491–500.

Мордвинов А.В., Язев С.А., Рыкова Е.Г., Дворкина-Самарская А.А. Долговременные изменения геометрии полярного магнитного поля Солнца по наблюдениям полных солнечных затмений // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 18. С. 69.

Перель Ю.Г. Выдающиеся русские астрономы. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1951. С. 194–211.

Пещеров В.С., Язев С.А., Ожогина О.А. и др. Наблюдения солнечной короны во время затмения 29 марта 2006 г. // Избранные проблемы астрономии: материалы научно-практической конференции «Небо и Земля» (Иркутск, 21–23 ноября 2006 г.). Иркутск: Изд-во ИГУ, 2006. С. 151–156.

Язев С.А. Каталог комплексов активности на Солнце на фазе роста 24-го цикла Швабе–Вольфа // Известия ИГУ. Сер. «Науки о Земле». 2012. Т. 5, № 2. С. 295–303.

Язев С.А. Комплексы активности на Солнце в 24-м цикле солнечной активности // Астрон. журнал. 2015. Т. 92, № 3. С. 260–269.

Druckmüller M. A noise adaptive fuzzy equalization method for processing solar extreme ultraviolet images // *Astrophys. J. Suppl.* 2013. V. 207, article id. 25, 5 pp. DOI: 10.1088/0067-0049/207/2/25.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona // *Solar Phys.* 1999. V. 188. P. 277–297.

Gulyaev R.A. Solar cycle variation on the solar corona shape: A new outlook // *Astron. Astrophys. Trans.* 1997. V. 13, N 2. P. 137–144.

Hansky. Die totale Sonnenfinsterniss am 8 August 1896 // *Bull. Acad. Imper. Sci. St. Petersburg.* 1897. V. 6. P. 251–270.

Judge P.G., Burkepile J., de Toma G., Druckmüller M. Historical eclipses and the recent solar minimum corona // *ASP Conf. Ser.* 2010. V. 428. P. 171–176.

Koomen M.J., Howard R.A., Michels D.J. The shape of the outer corona during cycle 21 // *Solar Phys.* 1998. V. 180. Iss. 1/2. P. 247–263. DOI: 10.1023/A:1005039609265.

Mordvinov A.V., Grigoryev V.M., Erofeev D.V. Evolution of sunspot activity and inversion of the Sun's polar magnetic field in the current cycle // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55. Iss. 11. P. 2739–2743. DOI: 10.1016/j.asr.2015.02.013.

Mordvinov A.V., Yazev S.A. Reversals of the Sun's polar magnetic fields in relation to activity complexes and coronal holes // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 1971–1981.

Pishkalo M. Flattering index of the solar corona and the solar cycle // *Solar Phys.* 2011. V. 270, iss. 1. P. 347–363. DOI: 10.1007/s11207-011-9749-y.

Tlatov A.G. The centenary variations in the solar corona shape in accordance with the observations during the minimal

activity epoch // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 522. Id. A27. 5 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201014082.

Wang Y.-M., Sheeley N.R.J., Rich N.B. Coronal pseudo-streamers // *Astrophys. J.* 2007. V. 658, iss. 2. P. 1340–1348. DOI: 10.1086/511416.

## REFERENCES

Druckmüller M. A noise adaptive fuzzy equalization method for processing solar extreme ultraviolet images. *Astrophys. J. Suppl.* 2013, vol. 207, article id. 25, 5 pp. DOI: 10.1088/0067-0049/207/2/25.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona. *Solar Phys.* 1999, vol. 188, pp. 277–297.

Gulyaev R.A. Outer solar corona as an optical manifestation of heliospheric current sheet. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk [Physics-Uspekhi (Adv. In Phys. Sci.)]*. 1992, vol. 162, iss. 12, pp. 155–159 (in Russian).

Gulyaev R.A. Solar cycle variation on the solar corona shape: A new outlook. *Astron. Astrophys. Trans.* 1997, vol. 13, no. 2, pp. 137–144.

Hansky. Die totale Sonnenfinsterniss am 8 August 1896. *Bull. Acad. Imper. Sci. St. Petersburg*, 1897, vol. 6, pp. 251–270.

Judge P.G., Burkepile J., de Toma G., Druckmüller M. Historical eclipses and the recent solar minimum corona. *ASP Conf. Ser.* 2010, vol. 428, pp. 171–176.

Klepikov D.V., Filippov B.P. Behavior of the polar field magnetic focuses in solar cycle from SOHO/EIT. *Izvestiya RAN [Bull. Russian Academy of Sciences: Physics]*. 2006, vol. 70, pp. 1436–1438 (in Russian).

Koomen M.J., Howard R.A., Michels D.J. The shape of the outer corona during cycle 21. *Solar Phys.* 1998, vol. 180, iss. 1/2, pp. 247–263. DOI: 10.1023/A:1005039609265.

Kuchmi S.L., Merzlyakov V.L., Molodensky M.M. On 3D-structure of the solar corona. *Astronomicheskii Zhurnal [Astron. J.]*. 2001, vol. 78, no. 10, pp. 953–960 (in Russian).

Makarov V.I., Tlatov A.G., Fatianov M.P. Three-dimensional modeling of the corona in different phases of solar magnetic cycle. Period: 1870–1991. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radioelektronika [Radioelectronics and Communications Systems]*. 1996, vol. 39, no. 10, pp. 1268–1274 (in Russian).

Mordvinov A.V., Yazev S.A. Complexes of activity decay and formation of coronal holes on the Sun. *Astronomicheskii Zhurnal [Astron. J.]*. 2013, vol. 90, no. 6, pp. 491–500 (in Russian).

Mordvinov A.V., Yazev S.A., Rykova E.G., Dvorkina-Samarskaya A.A. Long-term changes in geometry of the Sun's polar magnetic field from observation of total solar eclipses. *Solnechno-Zemnaya Fizika [Solar-Terrestrial Physics]*. 2011, iss. 18, pp. 69 (in Russian).

Mordvinov A.V., Yazev S.A. Reversals of the Sun's polar magnetic fields in relation to activity complexes and coronal holes. *Solar Phys.* 2014, vol. 289, pp. 1971–1981.

Mordvinov A.V., Grigoryev V.M., Erofeev D.V. Evolution of sunspot activity and inversion of the Sun's polar magnetic field in the current cycle. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, iss. 11, pp. 2739–2743. DOI: 10.1016/j.asr.2015.02.013.

Perel Yu.G. *Famous Russian Astronomers*. Moscow, State publishing house of technical-theoretical literature, 1951, pp. 194–211 (in Russian).

Peshcherov V.S., Yazev S.A., Ozhogina O.A., et al. Solar corona observations during March 29, 2006 solar eclipse. Selected Problems in Astronomy: Materials of theoretical and practical conference “Sky and Earth” (Irkutsk, November 21–23, 2006). Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2006, pp. 151–156 (in Russian).

Pishkalo M. Flattering Index of the solar corona and the solar cycle. *Solar Phys.* 2011, vol. 270, iss. 1, pp. 347–363. DOI: 10.1007/s11207-011-9749-y.

Tlatov A.G. The centenary variations in the solar corona shape in accordance with the observations during the minimal activity epoch. *Astron. Astrophys.* 2010, vol. 522, id. A27, 5 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201014082.

Vsekhsvyatsky S.K., Nikolsky G.M., Ivanchuk V.I., Nesmyanovich A.T., Ponomarev E.A., Rubo G.A., Cherednichenko V.I. *Solnechnaya Korona i Korpuskulyarnoe Izluchenie v Mezplanetnom Prostranstve* [Solar Corona and Corpuscular Radiation in the Interplanetary Space]. Kiev, Kiev University Publ., 1965. 216 c. (in Russian).

Vorontsov-Vel'yaminov B.A. *Ocherki Istorii Astronomii v Rossii* [Essays in the History of Astronomy in Russia]. Moscow: State publishing house of technical-theoretical literature, 1956, pp. 327–329 (in Russian).

Wang, Y.-M., Sheeley, N.R.J., Rich, N.B. Coronal pseudo-streamers. *Astrophys. J.* 2007, vol. 658, iss. 2, pp. 1340–1348. DOI: 10.1086/511416/

Yazev S.A. Catalogue of complexes of activity on the Sun at the growth phase of Schwabe–Wolf 24 cycle. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seria "Nauki o Zemle"* (Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Ser.). 2012, vol. 5, no. 2, pp. 295–303 (in Russian).

Yazev S.A. Complexes of activity on the Sun in 24 cycle of solar activity. *Astronomicheskii Zhurnal* [Astron. J.] 2015, vol. 92, no. 3, pp. 260–269 (in Russian).