

**АКТИВНЫЕ ДОЛГОТЫ И СТРУКТУРА КРУПНОМАСШТАБНОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ****ACTIVE LONGITUDES AND THE STRUCTURE
OF THE LARGE-SCALE MAGNETIC FIELD AT SOLAR MINIMUM****В.М. Григорьев** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vgrig@iszf.irk.ru***Л.В. Ермакова** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, lermak@iszf.irk.ru***V.M. Grigoriev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vgrig@iszf.irk.ru***L.V. Ermakova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, lermak@iszf.irk.ru*

Аннотация. По данным каталогов групп солнечных пятен RGO и USAF/NOAA рассмотрены глубокие минимумы 11-летних циклов солнечной активности 13–14, 14–15, 22–23, 23–24, 24–25. Все они имеют большое количество беспятенных дней. Несмотря на это, активные долготы как предпочтительные зоны, где возникают солнечные пятна, проявляются на этой стадии цикла. Анализ синоптических карт и отдельных ежедневных магнитограмм WSO (Wilcox Solar Observatory), отражающих структуру слабого крупномасштабного поля, обнаруживает неосимметричную компоненту магнитного поля Солнца. В минимуме активности в структуре крупномасштабного магнитного поля наблюдаются вытянутые вдоль меридиана области положительной и отрицательной полярностей, пересекающие экватор. Наиболее заметные из них находятся в зоне активных долгот и часто связаны с полярными магнитными полями.

Обсуждается возможная природа меридиональных структур крупномасштабного поля в период минимума активности. Возможно, это связано с гигантскими ячейками конвекции, имеющими структуру банановых ячеек.

Ключевые слова: крупномасштабное магнитное поле, активные области.

Abstract. We have studied deep minima of 11-year solar activity cycles 13–14, 14–15, 22–23, 23–24, 24–25, using the RGO and USAF/NOAA sunspot group catalogs. All of them have a large number of spotless days. Nonetheless, active longitudes as preferred zones, where sunspots occur, appear at this solar cycle phase. Analysis of synoptic maps and WSO daily magnetograms reflecting the structure of a weak large-scale field shows a non-axisymmetric component of the solar magnetic field. At solar minimum in the structure of the large-scale magnetic field, there are regions of the magnetic field of positive and negative polarity elongated along the meridian and crossing the equator. The most pronounced of them are located in the zone of active longitudes and are often connected with the polar magnetic fields.

We discuss the possible nature of the meridional structures of the large-scale field during solar minimum. This might be due to giant convection cells with a banana cell structure.

Keywords: large-scale magnetic field, active regions.

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена проблеме распределения активности на поверхности Солнца. Давно известны закономерности широтной зависимости появления солнечных пятен на поверхности Солнца, которые служат критериями теоретического описания эволюции солнечного цикла в многочисленных моделях солнечного динамо. Позднее в ряде исследований было показано неслучайное распределение активных областей (АО) и по гелиографической долготе. Было обнаружено, что активные образования чаще возникают в некоторых определенных долготных интервалах. Такие объекты описывались как очаги солнечных пятен [Becker, 1955], гнезда активности [Gastenmiller et al., 1986], комплексы активности [Gaizauskas et al., 1983; Vumba, Howard, 1965b], горячие пятна [Bai, 1988], активные долготы

[Berdygina, Usoskin, 2003; Obridko, 2010]. Все эти активные образования независимо от названий определяются появлением в атмосфере Солнца магнитного поля [Vumba, Howard, 1969] и его крупномасштабным распределением.

Одно из первых исследований крупномасштабной структуры магнитного поля в фотосфере основано на магнитографических измерениях в обсерватории Маунт-Вилсон. Анализ серии ежедневных магнитограмм с пространственным разрешением 23" в течение 4.5 лет и построение синоптических карт для каждого солнечного оборота были выполнены в работе [Vumba et al., 1964], где было показано существование больших регулярных структур магнитного поля. В следующих работах [Vumba, Howard, 1965a, b] авторы показали, что крупномасштабные структуры магнитного поля, размером до 400000 км

образуют комплексы активности, которые формируют несколько импульсов активности на определенных долготных интервалах. В комплексах активности обнаруживается структура магнитных ячеек, которая может сохраняться в течение нескольких оборотов.

Большая часть исследований крупномасштабного распределения магнитных полей, основанная на анализе синоптических карт, подтверждает тенденцию появления нового магнитного потока в предпочтительных долготных зонах. Преимущественно использовались данные о достаточно сильных магнитных полях в периоды максимальной солнечной активности (СА) или на нисходящей фазе солнечного цикла [Berdygina, Usoskin, 2003; Obridko, 2010]. Представляется важным проследить появление нового магнитного потока, в том числе и в форме малых короткоживущих солнечных пятен, на фазе минимума СА, особенно в период перехода от одного цикла к другому.

В минимуме СА структура крупномасштабного магнитного поля (КМП) меньше всего подвержена активным процессам. В литературе имеется незначительное количество исследований в переходный от цикла к циклу период, однако большая часть наблюдательных данных относится к периодам относительно высокой СА [Kostuchenko, Benevolenskaya, 2014; Kramynin, Mikhalyna, 2016; Vernova et al., 2020]. В работе [Bumba, 1970] по синоптическим картам Маунт-Вилсон рассмотрены несколько оборотов Солнца в период низкой СА 1966 г., сразу после перехода от цикла 19 к циклу 20. В это время обнаруживались также активные долготы. Отмечено, что, несмотря на то, что в это время около минимума СА полярность структур магнитного поля изменяется от старого цикла к новому, регулярная структура магнитных ячеек прослеживается.

Периоды перехода от 21 к 22, 22–23 и 23–24 циклам рассмотрены в работах [Benevolenskaya, 2010; Benevolenskaya et al., 1999]. В первой работе использовались синоптические карты обсерватории Маунт-Вилсон, во второй — синоптические карты, построенные на основе ежедневных магнитограмм SOHO/MDI. Последние данные показывают распределение существенно более сильных полей, но подтверждают общую тенденцию динамики слабого магнитного поля. Магнитные потоки старого и нового циклов группируются и существуют в одних и тех же преимущественных долготных зонах. Переход от цикла 23 к 24 характеризуется чрезвычайно низкой активностью.

Период перехода от цикла 24 к 25 относится также к наиболее низкому уровню СА. Авторы [Григорьев и др., 2022] изучали пространственно-временную картину появления АО в это время и связь их со структурой и развитием КМП. Использовались данные WSO [Duvall et al., 1977] с пространственным разрешением 3'. Низкое пространственное разрешение дает более правильную информацию о слабом КМП. Было отмечено наличие двух долготных зон предпочтительного пятнообразования. Кроме того, в структуре КМП на ежедневных картах проявлялась меридиональная составляющая.

Вышеупомянутые исследования говорят в пользу того, что активные долготы прослеживаются в минимумах СА. Возникают вопросы, распространяется ли это на период, когда в минимуме длительное время не происходит пятнообразования, и какова структура слабого КМП в самый спокойный период СА.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовались данные о распределении солнечных пятен по кэррингтоновским долготам RGO USAF/NOAA [<http://SolarCycleSciences.com>], данные WSO по КМП, ежедневные и синоптические карты [<http://wso.stanford.edu>]. Для проверки гипотезы о существовании активных долгот в минимуме 11-летних циклов были отобраны пять глубоких минимумов, начиная с 1900 г. четыре из которых имели наибольшее количество беспятенных дней.

В табл. 1 приведены характеристики исследуемых минимумов СА по данным [<https://www.sidc.be/silso/spotless>; https://wiki5.ru/wiki/List_of_solar_cycles].

На рис. 1 (взято с [<http://SolarCycleSciences.com>]) показаны количество солнечных пятен и беспятенных дней для указанных в табл. 1 минимумов. Видно, что минимум 22–23 — самый непродолжительный и менее глубокий.

Анализ структуры КМП проводился для трех последних минимумов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Поскольку понятие «активная область» физически более полное, в дальнейшем будем использовать его применительно к данным о солнечных пятнах. На рис. 2 показаны гистограммы распределения АО по кэррингтоновской долготе в период минимумов циклов СА.

В минимуме частота образования АО низкая, длительное время пятна отсутствуют. Хотя полное число образовавшихся АО небольшое, видно, что во всех минимумах СА можно выделить 1–2 долготных интервала с более высокой концентрацией АО, что позволяет рассматривать их как вероятные активные долготы. В табл. 2 в столбце 4 приведено процентное содержание АО в каждой активной долготе по отношению к полному числу АО в данном минимуме, в столбце 5 — процентное содержание АО в активных долготах в данном минимуме. Таким образом, в активной долготе в период минимума содержится от 23 % (минимум 14–15, интервал 20°–80°) до 50 % (минимум 23–24) всех наблюдавшихся АО. Столбец 5 показывает, что более половины всех АО в период минимума может содержаться в зонах предпочтительного пятнообразования.

Для трех последних минимумов имеются данные по КМП — регулярные измерения в Стэнфорде (WSO) ведутся с 1976 г. Чтобы понять структуру КМП в области активных долгот, были построены синоптические карты, усредненные по нескольким кэррингтоновским оборотам. Выбирался временной интервал вблизи условного минимума. На рис. 3 показаны синоптические карты КМП для минимума

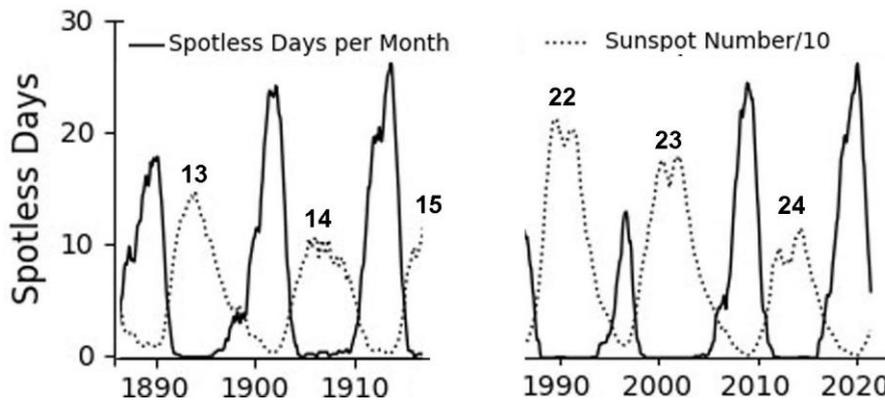


Рис. 1. Количество солнечных пятен (точечная линия, указаны номера солнечных циклов) и количество беспятенных дней (сплошная линия) для избранных периодов времени

Таблица 1

Характеристики минимумов солнечных циклов

| Циклы | Условное время минимума | Условная длит. | Амплитуда сглаж. мин | Длительные периоды беспятенных дней (≥ 30 дней) или их суммарное число | Период анализа |
|-------|-------------------------|----------------|----------------------|--|----------------------------------|
| 13–14 | 1902 г., январь | 2 года | 4.5 | 203 дня | январь 1901 г. – декабрь 1902 г. |
| 14–15 | 1913 г., июль | 2 года | 2.5 | 205 дней | июль 1912 г. – июнь 1914 г. |
| 22–23 | 1996 г., август | 1 год | 11.2 | 13 сентября – 24 октября 1996 г. | февраль 1996 – февраль 1997 |
| 23–24 | 2008 г., декабрь | 2 года | 2.2 | 21 июля – 20 августа 2008 г. 31 июля – 31 августа 2009 г. | январь 2008 – декабрь 2009 |
| 24–25 | 2019 г., декабрь | 2 года | 1.8 | 14 ноября – 23 декабря 2019 г. 2 февраля – 6 марта 2020 г. | январь 2019 – декабрь 2020 |

Таблица 2

Активные долготы в период минимумов солнечной активности

| Минимум | Число АО | Акт. долготы, градусы | Доля АО, % | Сумм., % |
|---------|----------|-----------------------|------------|----------|
| 13–14 | 52 | 100–200 | 42 | 42 |
| 14–15 | 69 | 20–80; 160–240 | 23, 35 | 58 |
| 22–23 | 74 | 220–300 | 34 | 34 |
| 23–24 | 60 | 180–260 | 50 | 50 |
| 24–25 | 62 | 40–120; 240–320 | 31, 32 | 63 |

22–23. Этот минимум (см. табл. 1 и рис. 1) является самым непродолжительным и наименее глубоким. Диапазон кэррингтоновских долгот, в который попадают 25 из 74 АО, составляет 220° – 300° (отмечен на рис. 3 белыми линиями). Для кэррингтоновских оборотов 1912–1915 построены синоптические карты, по которым можно проследить формирование структуры КМП в области активной долготы с августа по октябрь 1996 г. Этот промежуток времени завершается окончанием периода полного отсутствия пятен на видимой стороне диска Солнца. Последний фрагмент, полученный в результате усреднения четырех предыдущих, дает наиболее приближенную к реальной картину КМП в период данного минимума СА. Две вытянутые меридиональные структуры, связанные одним концом с полярными магнитными полями, пересекают экватор, достигая 50° гелиошироты. Их положение совпадает с зоной активных долгот. Меридиональная ориентированность структур видна и за пределами активной долготы, при этом существует некоторая периодичность расположения структур по долготе. Раньше мы отмечали [Григорьев и др., 2022], что в структуре КМП на еже-

дневных картах в период минимума СА проявляется меридиональная составляющая.

По ежедневным картам КМП для минимума 22–23 видно, как в области активной долготы формируется меридиональная составляющая, которая с ростом активности теряется (рис. 4). Начиная с мая, собирается пара крупных меридионально ориентированных полюсов, включающих остатки АО двух полушарий и двух циклов. Так, например, в мае вблизи кэррингтоновской долготы 260° располагались АО 07962, 07964 старого цикла в южном полушарии на широте 5° – 10° и малая АО 07963 нового цикла в северном полушарии на широте 24° . Постепенно происходит образование устойчивой меридиональной двухполюсной структуры КМП в области активных долгот.

Видно, что уже в августе оба магнитных полюса соединяются с областями полярной шапки соответствующего знака, проходят через все полушарие и достигают широты 45° – 50° противоположного полушария. Ширина составляет $\geq 40^{\circ}$, 16 декабря видна деформация, после чего меридиональная структура КМП в области активной долготы разрушается. Таким

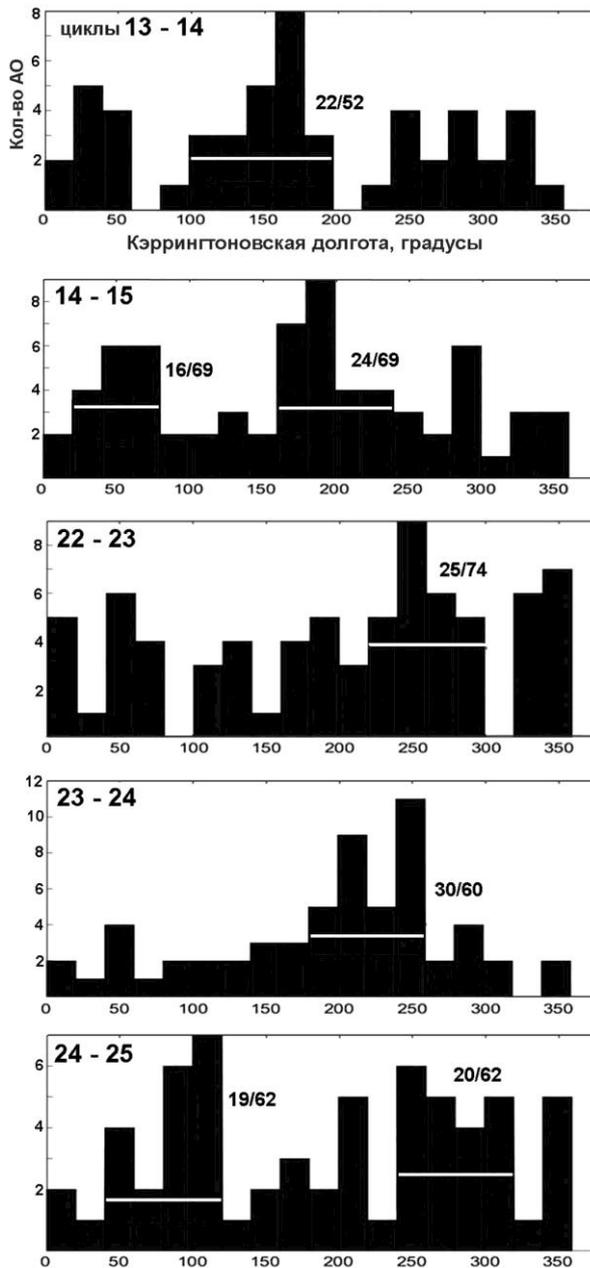


Рис. 2. Гистограммы распределения АО по кэррингтоновской долготе в период минимумов циклов СА. Белыми линиями выделены активные долготы, указано отношение числа АО в области активной долготы к полному числу АО

образом, в минимуме циклов 22–23 она видна с июля по октябрь. Период август–октябрь обнаруживает наиболее правильную меридиональную конструкцию. Она сформировалась при низкой активности за полтора месяца до периода отсутствия пятен, сохранялась в период отсутствия (13 сентября – 24 октября), после чего стала разрушаться.

В минимуме 24–25 выделяются две группы активных долгот: 40°–120° и 240°–320° (см. рис. 2, табл. 2), в которых сосредоточены более 60 % АО. Этот минимум является более продолжительным и более глубоким. Длительные беспятенные периоды приходятся на 14 ноября – 23 декабря 2019 г. и 2 февраля – 6 марта 2020 г., они разделены промежутком времени чуть больше месяца. На этот период приходится условное время минимума (декабрь 2019 г.).

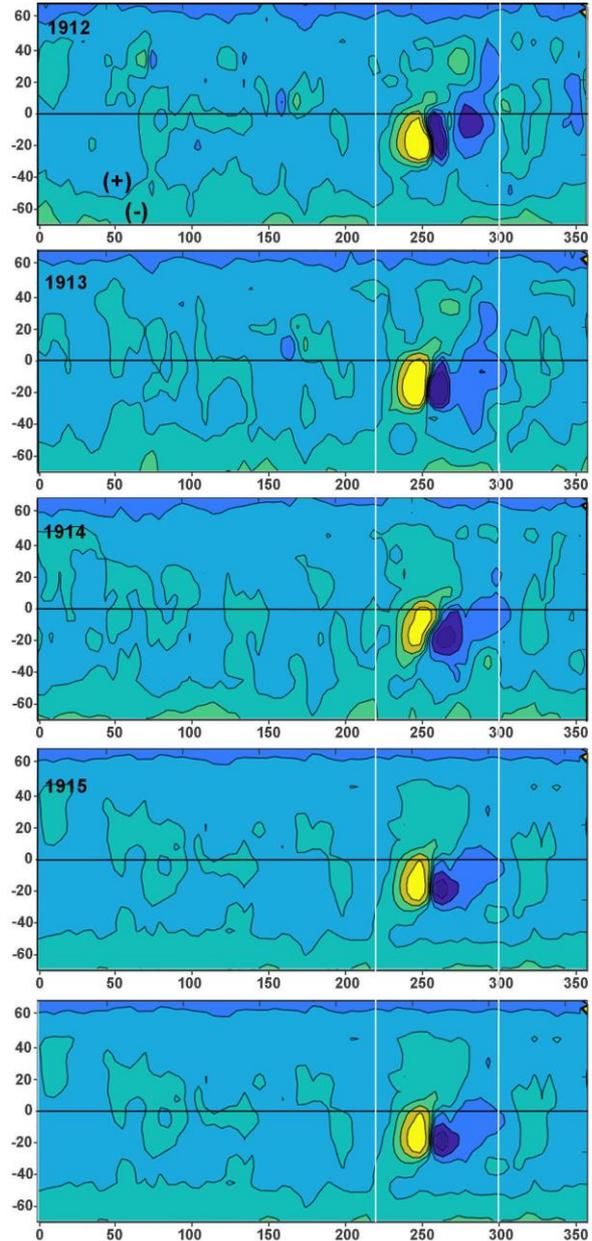


Рис. 3. Синоптические карты для кэррингтоновских оборотов 1912–1915 (помечены в верхнем левом углу) и карта, усредненная по четырем оборотам (внизу). Ось абсцисс — кэррингтоновская долгота, ось ординат — гелиоширота. Изолинии КМП: 0, ±100, 200, 500 μ T. Пояснения в тексте

За декабрь 2019 г. – январь 2020 г. данные по магнитным полям отсутствуют. Поэтому было выполнено усреднение для последующего периода времени. На рис. 5 показана усредненная по четырем кэррингтоновским оборотам (февраль – май 2020 г.) синоптическая карта КМП. Магнитное поле в этом более продолжительном минимуме значительно слабее, чем в предыдущем, поэтому изолиниям соответствуют более низкие значения напряженности. Белыми линиями выделены активные долготы.

В областях активных долгот видны по два сектора положительной и отрицательной полярностей, идущие от соответствующих полярных шапок до гелиошироты 50° противоположного полушария. За пределами активных долгот существует также меридиональная ориентированность крупных структур КМП.

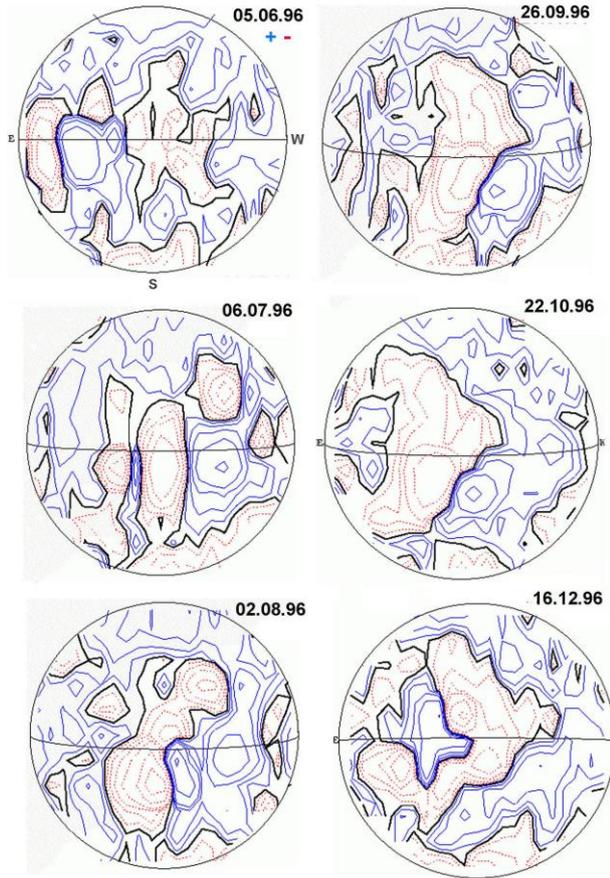


Рис. 4. Карты КМП WSO для минимума 22–23. Кэррингтоновская долгота центрального меридиана находится в пределах 255°–265°. Изолинии КМП: 0, ±20, 50, 100 ... μ T. Черным нанесена линия раздела полярностей

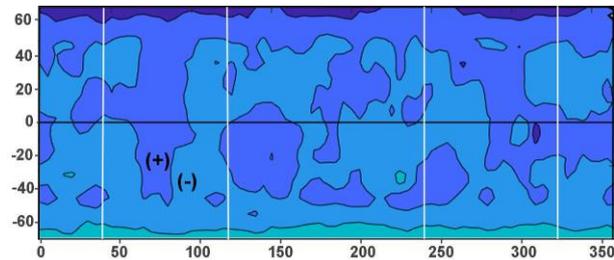


Рис. 5. Синоптическая карта, усредненная по четырем кэррингтоновским оборотам (2227–2230). Изолинии КМП: 0, ±50, 125 μ T. Пояснения в тексте

На рис. 6 показаны карты КМП для первой группы активных долгот 40°–120°. Видна некоторая упорядоченность расположения мелких магнитных полюсов обоих знаков относительно меридиана. Более четко выражена меридиональная структура в марте – июне 2020 г., сразу после окончания второго беспятенного периода. В июне в нее попадает АО 12765 в южном полушарии на широте 25°. Общая картина еще сохраняется, но к августу она разрушилась из-за роста активности в северном полушарии.

На рис. 7 показаны карты КМП для второй группы активных долгот 240°–320°. В апреле–мае 2019 г. в северном полушарии располагались сильные АО старого цикла. После их разрушения видны структуры КМП, простирающиеся от соответствующего гелиографического полюса до высоких широт проти-

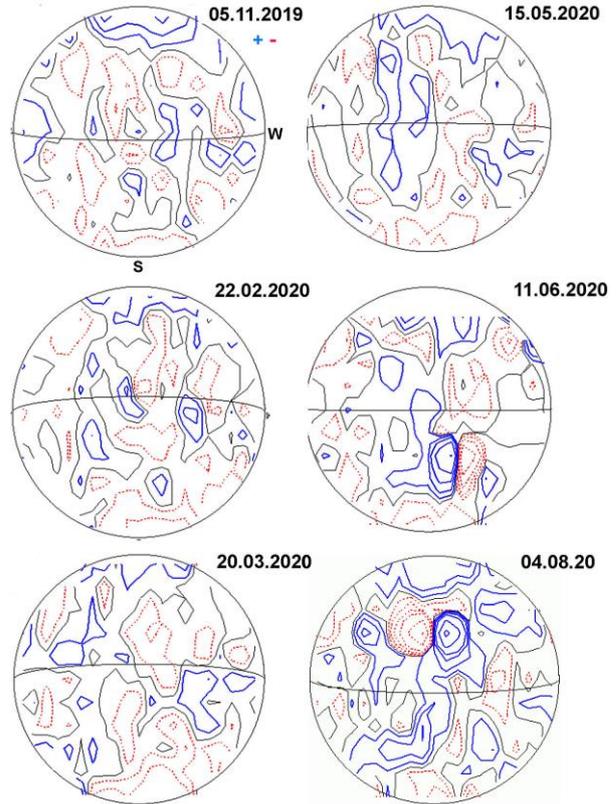


Рис. 6. Ежедневные карты КМП WSO для минимума 24–25. Кэррингтоновская долгота центрального меридиана близка к 90°

положного полушария. Наиболее упорядоченная картина существовала с июля по сентябрь 2019 г., но в целом меридиональная ориентированность сохранялась до августа–сентября 2020 г.

Минимум 23–24 также был продолжительным. Выделяется активная долгота 180°–260°. На рис 8 показана усредненная синоптическая карта для периода ноябрь 2008 г. – февраль 2009 г. с условным минимумом в декабре 2009 г.

Активная долгота отмечена сектором положительной полярности, соприкасающимся с южным полюсом и достигающим 50° N. За ее пределами видны более узкие меридионально-ориентированные структуры. Синоптические карты для минимумов 22–23 и 24–25 строились для периодов времени, включающих длительные интервалы беспятенных дней. Особенность минимума 23–24 состояла в том, что два длительных периода беспятенных дней были разделены почти годовым промежутком. Активность была очень низкой. Синоптическая карта отражает структуру поля именно в этот период.

В мае 2009 г. в области активной долготы в северном полушарии, а в июле в южном появлялись АО средних размеров нового цикла, после чего наступил второй длительный беспятенный период. На рис. 9 показаны ежедневные магнитограммы за июль – сентябрь 2009 г. Видно, что меридиональная ориентированность структур КМП на ежедневных картах сходна с наблюдавшейся в минимуме 22–23 и 24–25. Рост активности нового цикла приводит к искажению картины.

Таким образом, в минимуме СА в структуре КМП наблюдаются вытянутые вдоль меридиана области

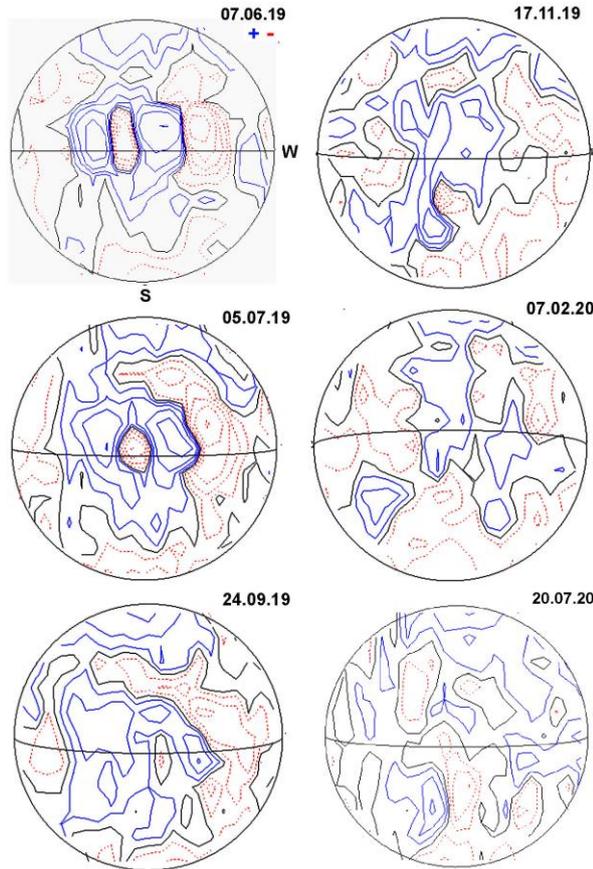


Рис. 7. Карты КМП WSO для минимума 24–25. Кэррингтоновская долгота центрального меридиана близка к 290°

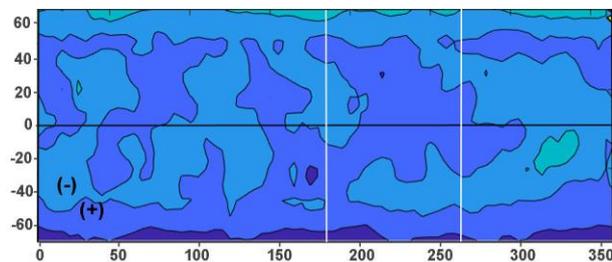


Рис. 8. Синоптическая карта, усредненная по четырем кэррингтоновским оборотам (2076–2079). Изолинии КМП: 0, ±50, 125 мТ

магнитного поля положительной и отрицательной полярностей, пересекающие экватор. Наиболее заметные из них находятся в зоне преимущественного появления АО.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ магнитограмм слабого КМП в солнечной фотосфере в эпоху глубокого минимума СА показывает наличие пересекающих экватор долготных секторов положительной и отрицательной полярностей. Наиболее выраженные меридиональные структуры наблюдаются в области активных долгот и часто связаны с полярными магнитными полями. Долготный размер таких структур составляет 35°–40°. Явление активных долгот рассматривается как наблюдаемое подтверждение солнечного неосесимметричного магнитного поля. Неосесимметричная крупно-

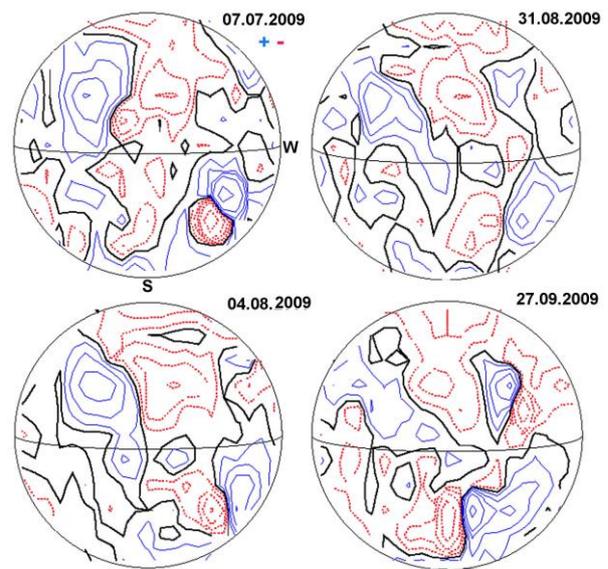


Рис. 9. Карты КМП WSO для минимума 23–24. Кэррингтоновская долгота центрального меридиана 205°–210°

масштабная структура магнитного поля изучалась во многих теоретических моделях солнечного динамо ([Pipin, Kosovichev, 2015] и ссылки в этой работе). В основном появление неосесимметричной моды КМП определяется нелинейными эффектами магнитной плавучести и магнитной спиральности. Но в моделях солнечного динамо эти эффекты рассматриваются на большой временной шкале порядка солнечного цикла и более. Мы изучали структуру магнитного поля в области активных долгот на временной шкале 10–20 оборотов. Появление пересекающих экватор долготных секторов в структуре магнитного поля указывает на нестационарную неосесимметричную моду на временной шкале порядка 1 год. В связи с тем, что структура и динамика магнитного поля отражают подповерхностные конвективные движения плазмы, можно предположить, что появление неосесимметричной компоненты КМП связано с существованием гигантских конвективных ячеек.

В работе [Simon, Weiss, 1968] была впервые представлена модель конвекции в политропной атмосфере на Солнце. Эта модель объясняла возникновение гранул и супергранул и предсказывала существование гигантских ячеек с горизонтальной шкалой около 300000 км. Ранее было обнаружено объединение АО в комплексы активности [Bumba, Howard, 19656], размеры которых совпадали с сеткой гигантских ячеек со шкалой около 400 000 км. Bumba [1970] предположил, что такая крупномасштабная структура поля соответствует гигантским ячейкам со временем жизни ~4 мес. Комплексы активности формируются в узлах этой сетки, а АО возникают в узлах супергрануляционной сетки. Передача движений из подфотосферных слоев в фотосферу осуществляется через магнитное поле и вязкость [Pikelnr, 1962; Parker, 1963]. Тогда структура магнитного поля отражает гигантские ячейки, которые существуют в глубоких слоях конвективной зоны от основания до высот, где образуется супергрануляция. Эти глобальные конвективные ячейки

проникают в верхние слои конвективной зоны, и динамика магнитных полей на поверхности в некоторой степени отражает их.

Grigoryev, Latushko [1992], используя структуры КМП как трассеры, показали, что существуют течения плазмы разных знаков, протяженные в северо-южном направлении и пересекающие экватор. Размер структур по долготе составляет 25° – 45° , горизонтальные скорости ~ 60 м/с. Они отражают крупномасштабные конвективные движения ниже фотосферы. Подобные долготные сектора положительной и отрицательной полярностей отмечены также в работе [Mc Intosh, 2005] при анализе синоптических $H\alpha$ -карт. Piddington [1971] предположил, что они должны быть следствием существования гигантских конвективных ячеек.

Основным доказательством этого стали наблюдения, показывающие крупномасштабные структуры в спектре движений в фотосфере [Hathaway et al., 1996, 2000, 2013; Beck et al., 1998]. В последней работе авторы измеряли перемещение супергранул, которое происходит от центров к границам гигантских ячеек большими долгоживущими потоками. Использовались измерения доплеровских смещений спектральной линии в фотосфере с помощью HMI/SDO. После предварительной обработки данных были получены карты скоростей в долготном и широтном направлениях, показывающие ячеистую картину движений, при этом ячейки на низких широтах были вытянуты в северо-южном направлении.

Гидродинамические модели конвективных движений во вращающейся конвективной зоне на Солнце показывают, что ячейки должны быть вытянуты в северо-южном направлении в области экватора [Gilman, 1979; Elliot et al., 2000; Miesh et al., 2008]. Эти банановые ячейки должны переносить угловой момент к солнечному экватору для установления дифференциального вращения. В работе [Hathaway et al., 2013] авторы отмечают, что было бы удивительным, если бы эти крупномасштабные долгоживущие потоки не влияли существенно на структуру и эволюцию магнитных полей. Наши результаты подтверждают влияние гигантских конвективных ячеек на структуру магнитного поля, особенно заметную в эпоху минимума солнечной активности.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ минимумов солнечной активности с наибольшим количеством беспятенных дней показал, что активные долготы как предпочтительные зоны, где возникают солнечные пятна, проявляются на этой стадии цикла. Анализ синоптических карт и отдельных ежедневных магнитограмм WSO, отражающих структуру слабого КМП, обнаруживает неосесимметричную компоненту магнитного поля Солнца. В минимуме СА в структуре КМП наблюдаются вытянутые вдоль меридиана области магнитного поля положительной и отрицательной полярностей, пересекающие экватор. Наиболее заметные из них находятся в зоне активных долгот и часто связаны с полярными магнитными полями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия №075-ГЗ/Ц3569/278). Данные Wilcox Solar Observatory, любезно предоставленные J.T. Hoeksema, были получены с веб-сайта [<http://wso.stanford.edu>]. Wilcox Solar Observatory в настоящее время поддерживается NASA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Появление активных областей в период завершения 24-го и начала 25-го циклов активности. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 4. С. 29–37. DOI: [10.12737/szf-84202202](https://doi.org/10.12737/szf-84202202).
- Bai T. Distribution of flares on the Sun during 1955–1985: "hot spots" (active zones) lasting for 30 years. *Astrophys. J.* 1988. Vol. 328. P. 860–874. DOI: [10.1086/166344](https://doi.org/10.1086/166344).
- Beck J.G., Duvall T.L., Scherrer P.H. Long-lived giant cells detected at the surface of the Sun. *Nature*. 1998. Vol. 394. P. 653–655. DOI: [10.1038/29245](https://doi.org/10.1038/29245).
- Becker U. Untersuchungen über die Herdbildung der Sonnenflecken. *Z. Astrophys.* 1955. Vol. 37. P. 47–66.
- Benevolenskaya E. Did recent large-scale evolution of the magnetic field presage the unusual current minimum? *ASP Conf. Ser.* 2010. Vol. 428. P. 93–101.
- Benevolenskaya E.E., Hoeksema J.T., Kosovichev A.G., Scherrer P.H. The interaction of new and old magnetic flux at the beginning of solar cycle 23. *Astrophys. J.* 1999. Vol. 517. P. L163–L166. DOI: [10.1086/312046](https://doi.org/10.1086/312046).
- Berdygina S.V., Usoskin I.G. Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence. *Astron. Astrophys.* 2003. Vol. 405. P. 1121–1128. DOI: [10.1051/0004-6361:20030748](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030748).
- Bumba V. Concerning the formation of giant regular structures in solar atmosphere. *Solar Phys.* 1970. Vol. 14. P. 80–88. DOI: [10.1007/BF00240162](https://doi.org/10.1007/BF00240162).
- Bumba V., Howard R. A study of the development of active regions on the Sun. *Astrophys. J.* 1965a. Vol. 141. P. 1492–1501. DOI: [10.1086/148237](https://doi.org/10.1086/148237).
- Bumba V., Howard R. Large-scale distribution of solar magnetic fields. *Astrophys. J.* 1965b. Vol. 141. P. 1502–1511. DOI: [10.1086/148238](https://doi.org/10.1086/148238).
- Bumba V., Howard R. Solar activity and recurrences in magnetic-field distribution. *Solar Phys.* 1969. Vol. 7. P. 28–38. DOI: [10.1007/BF00148402](https://doi.org/10.1007/BF00148402).
- Bumba V., Howard R., Smith S. Large-scale patterns of solar magnetic fields. *Astronom. J.* 1964. Vol. 69. P. 535. DOI: [10.1086/109387](https://doi.org/10.1086/109387).
- Duvall T.L.Jr., Wilcox J.M., Svalgaard L., et al. Comparison of $H\alpha$ synoptic charts with the large-scale solar magnetic field as observed at Stanford. *Solar Phys.* 1977. Vol. 55. P. 63–68. DOI: [10.1007/BF00150874](https://doi.org/10.1007/BF00150874).
- Elliot J.R., Miesh M.S., Toomre J. Turbulent solar convection and its coupling with rotation: The effect of Prandtl number and thermal boundary conditions on the resulting differential rotation. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 533. P. 546–556. DOI: [10.1086/308643](https://doi.org/10.1086/308643).
- Gaizauskas V., Harvey K.L., Harvey J.W., Zwaan C. Large-scale patterns formed by solar active regions during the ascending phase of cycle 21. *Astrophys. J.* 1983. Vol. 265. P. 1056–1065. DOI: [10.1086/160747](https://doi.org/10.1086/160747).
- Gastenmiller M.J.M., Zwaan C., Van der Zalm E.B.J. Sunspot Nests-Manifestations of sequences in magnetic activity. *Solar Phys.* 1986. Vol. 105. P. 237–255. DOI: [10.1007/BF00172045](https://doi.org/10.1007/BF00172045).
- Gilman P.A. Model calculations concerning rotation at high solar latitudes and the depth of the solar convection zone. *Astrophys. J.* 1979. Vol. 231. P. 284–292. DOI: [10.1086/157191](https://doi.org/10.1086/157191).
- Grigoryev V.M., Latushko S.M. E-W motions of large-scale magnetic field structures of the Sun. *Solar Phys.* 1992. Vol. 140. P. 239–245. DOI: [10.1007/BF00146311](https://doi.org/10.1007/BF00146311).
- Hathaway D.N., Gilman P.A., Harvey J.W., et al. GONG observations of solar surface flows. *Science*. 1996. Vol. 272. P. 1306–1309. DOI: [10.1126/science.272.5286.1306](https://doi.org/10.1126/science.272.5286.1306).

Hathaway D.N., Beck J.G., Bogart R.S., et al. The photospheric convection spectrum. *Solar Phys.* 2000. Vol. 193. P. 299–312. DOI: [10.1023/A:5200809766](https://doi.org/10.1023/A:5200809766).

Hathaway D.N., Upton L., Colegrove O. Giant convection cells found on the Sun. *Science.* 2013. Vol. 342. P. 1217–1219. DOI: [10.1126/science.1244682](https://doi.org/10.1126/science.1244682).

Kostuchenko I.G., Benevolenskaya E.E. Active longitudes in minima of solar activity. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014. Vol. 54. P. 1019–1025. DOI: [10.1134/S001679321408009X](https://doi.org/10.1134/S001679321408009X).

Kramynin A.P., Mikhalyina F.A. Active longitudes in the period of overlap of 11-year cycles. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2016. Vol. 56. P. 1006–1009. DOI: [10.1134/S0016793216080132](https://doi.org/10.1134/S0016793216080132).

McIntosh P.S. Motions and interactions among large-scale solar structures on H-alpha synoptic charts. *ASP Conference Series.* 2005. Vol. 346. P. 193–200.

Miesch M.S., Brun A.S., De Rosa M.L., et al. Structure and evolution of giant cells in global models of solar convection. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 673. P. 557–575. DOI: [10.1086/523838](https://doi.org/10.1086/523838).

Obridko V. Large-scale patterns and “active longitudes”. *Proc. IAU Symp.* 2010. Vol. 264. P. 241–250. DOI: [10.1017/S1743921309992699](https://doi.org/10.1017/S1743921309992699).

Parker E.N. Kinematical hydromagnetic theory and its application to the low solar photosphere. *Astrophys. J.* 1963. Vol. 138. P. 552. DOI: [10.1086/147663](https://doi.org/10.1086/147663).

Piddington J.H. Large-scale motions in the Sun. *Solar Phys.* 1971. Vol. 21. P. 4–20. DOI: [10.1007/BF00155767](https://doi.org/10.1007/BF00155767).

Pikelner S.B. Formation of the chromospheric network and structure of the magnetic field. *Astr. Zh.* 1962. Vol. 39. P. 973.

Pipin V.V., Kosovichev A.G. Effects of large-scale non-axisymmetric perturbations in the mean-field solar dynamo. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 813. P. 134. DOI: [10.1088/0004-637X/813/2/134](https://doi.org/10.1088/0004-637X/813/2/134).

Simon G.W., Weiss N.O. Supergranules and hydrogen convection zone. *Zeitschrift für Astrophysik.* 1968. Vol. 69. P. 435–450.

Vernova E.S., Tyasto M.I., Baranov D.G., Danilova O.A. Nonaxisymmetric component of solar activity: the vector of the longitudinal asymmetry. *Solar Phys.* 2020. Vol. 296, iss. 6. Article id. 86. DOI: [10.1007/s11207-020-01651-x](https://doi.org/10.1007/s11207-020-01651-x).

URL: <http://SolarCycleSciences.com> (дата обращения 28 июня 2023 г.).

URL: <http://wso.stanford.edu> (дата обращения 28 июня 2023 г.).

URL: <https://www.sidc.be/silso/spotless> (дата обращения 28 июня 2023 г.).

URL: https://wiki5.ru/wiki/List_of_solar_cycles (дата обращения 26 июня 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Григорьев В.М., Ермакова Л.В. Активные долготы и структура крупномасштабного магнитного поля в минимуме солнечной активности. *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9, № 4. С. 30–37. DOI: [10.12737/szf-94202303](https://doi.org/10.12737/szf-94202303).