
**ПОЯВЛЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ
В ПЕРИОД ЗАВЕРШЕНИЯ 24-ГО И НАЧАЛА 25-ГО ЦИКЛОВ АКТИВНОСТИ
APPEARANCE OF ACTIVE REGIONS
AT THE END OF SOLAR CYCLE 24 AND AT THE BEGINNING OF CYCLE 25**

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*

А.И. Хлыстова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, hlystova@iszf.irk.ru*

V.M. Grigoryev

*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*

A.I. Khlystova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, hlystova@iszf.irk.ru*

Аннотация. Изучение пространственно-временной картины появления активных областей и связи их возникновения со структурой и развитием крупномасштабного магнитного поля (КМП) проводилось в период смены 24-го и 25-го циклов солнечной активности. В этот период не отмечается бурного развития активности и поэтому динамика КМП в процессе появления новых активных областей наиболее заметна. Использовались данные SDO/HMI о продольном магнитном поле для определения времени и гелиографических координат места возникновения активной области и ежедневные карты WSO (Wilcox Solar Observatory) для сравнения со структурой КМП. Получены следующие результаты. В переходный период от одного цикла к другому новые активные области возникали в половине случаев на границе раздела полярностей КМП, причем почти исключительно на хейловских границах в соответствующих полушариях и циклах активности. В остальных случаях местом возникновения были униполярные области КМП без видимого преимущества в расположении областей поля по правилу Хейла. Образование активных областей предваряется или сопровождается изменениями в структуре КМП, при этом в тонкой структуре магнитного поля в фотосфере может наблюдаться усиление сетки магнитного поля на пространственном масштабе размера супергранул и более, а также появление малых областей нового магнитного поля обеих полярностей. Возникающие активные области концентрировались в двух узких долготных зонах, которые покрывали обе полушария Солнца. Новый цикл начинался в тех же долготных зонах, где затухала активность старого цикла.

Ключевые слова: магнитное поле, активные области.

Abstract. The spatial-temporal picture of appearance of active regions and the relationship of their appearance with the structure and development of a large-scale magnetic field were studied during the transition from solar cycle 24 to 25. During this period, solar activity is low, and therefore the dynamics of a large-scale magnetic field in the appearance of new active regions is most noticeable. We have used SDO/HMI data on the longitudinal magnetic field to determine the time and heliographic coordinates of the origin of an active region, as well as daily WSO maps (Wilcox Solar Observatory) to compare with the structure of the large-scale magnetic field. We have obtained the following results. During the transition from one cycle to another, new active regions appeared in half of the cases in the polarity inversion line of the large-scale magnetic field, and almost exclusively at the Hale boundaries in the corresponding hemispheres and solar cycles. In other cases, the places of appearance were unipolar regions of the large-scale magnetic field without a clear advantage in the location of the field regions according to the Hale law. The formation of active regions is preceded or accompanied by changes in the structure of the large-scale magnetic field. At the same time, in the fine structure of the magnetic field in the photosphere we can observe an increase in the magnetic field network on a spatial scale of the size of supergranules and larger, as well as the appearance of small regions of a new magnetic field of both polarities. The appearing active regions were concentrated in two narrow longitudinal zones that covered both hemispheres of the Sun. The new cycle began in the same longitudinal zones, where the activity of the old cycle decayed.

Keywords: magnetic field, active regions.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение закономерностей появления солнечных активных областей (АО) является одной из основных задач солнечной физики. Некоторые аспекты связи структуры крупномасштабного магнитного поля (КМП) с появлением АО рассматривались в работах [Bumba, Howard, 1965; McIntosh, Wilson, 1985; Степанян, 1985; Григорьев, Пещеров, 1986; Ogrishvili, 1988]. В [Bumba, Howard, 1965] было показано, что существует корреляция между локализацией новых областей и старым магнитным полем. Результаты работ указывали на связь возникновения АО с глобальными изменениями в системе КМП. С крупномасштабным процессом появления АО можно связать наличие последовательности сигмоидных структур на изображениях солнечной короны в мягких рентгеновских лучах [Matsumoto et al., 1998]. Такие образования иногда видны в приэкваториальной зоне в периоды высокой солнечной активности. В упомянутой работе предполагалось, что их появление связано со всплытием крупномасштабной скрученной трубки магнитного потока из конвективной зоны.

Вопрос связи места возникновения новых АО со структурой КМП остается нерешенным. В целом есть соответствие между картиной расположения крупных АО на поверхности Солнца и синоптическими картами КМП, построенными по магнитограммам Маунт-Вилсон или Na-фильтрограммам [McIntosh, 1981; McIntosh, Wilson, 1985]. Было отмечено, что крупные АО появляются вблизи линии раздела полярностей КМП. В [Ogrishvili, 1988] на основе большого материала (около 200 АО) был сделан вывод, что АО, возникающие вблизи границ, развиваются быстрее и достигают большей мощности в своем развитии. Надо отметить, что анализировался период времени 1979–1982 гг., относящийся к максимуму 21-го цикла.

В ряде случаев обнаруживалось образование новых структур КМП до появления и развития АО (например, [Григорьев, Пещеров, 1986]). В [Григорьев и др., 2012] по данным SOHO/MDI было проведено пространственное усреднение продольного магнитного поля в области образования NOAA 10488. Усреднение проводилось по ячейкам размером 40"×40". За три часа до начала выхода нового магнитного потока произошла смена знака модифицированного таким образом магнитного поля непосредственно в месте выхода нового потока.

Во всех прежних работах процесс появления АО рассматривался на большом временном интервале внутри цикла активности. Кроме того, обычно использовались синоптические карты распределения магнитных полей, построенные либо по ежедневным магнитограммам, либо на основе Na-фильтрограмм. При таком анализе связи между местом возникновения АО и структурой КМП вероятна методическая ошибка. Синоптическая карта строится по ежедневным измерениям структуры поля вблизи центрального меридиана и отражает среднюю структуру поля, которую мы последовательно наблюдаем в течение

оборота Солнца. Истинное распределение КМП в момент появления нового магнитного потока и картина, определенная по синоптической карте, чаще всего различаются. Если АО возникла восточнее центрального меридиана, синоптическая карта отражает произошедшие изменения в структуре КМП, если западнее, — отражается структура поля, предшествующая по времени моменту возникновения АО.

В настоящее время закономерности появления АО во времени и пространстве остаются неясными. Целью данной работы является дальнейшее исследование взаимосвязи КМП и локальных магнитных полей, а также пространственно-временного распределения мест возникновения АО.

Для исследования связи мест возникновения АО со структурой и развитием КМП был выбран период январь 2019 – май 2021 г., поскольку он приходится на минимум солнечной активности и охватывает конец 24-го и начало 25-го циклов. В это время фоновое магнитное поле в солнечной атмосфере почти не возмущено предыдущей активностью Солнца, поэтому информация о местах возникновения новых АО и предшествующих их появлению изменениях в структуре КМП наиболее достоверна. С другой стороны, этот период замечателен тем, что одновременно на Солнце можно наблюдать рождение АО обоих циклов, что может способствовать пониманию взаимосвязи сменяющихся друг друга циклов активности.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные SDO/HMI по продольному магнитному полю [Scherrer et al., 2012] и стэнфордские (Wilcox Solar Observatory, WSO) карты КМП [Duvall et al., 1977]. В первом случае временное разрешение используемых нами данных составляет 3–15 мин, во втором — ~1 сут. Пространственное разрешение составляет соответственно ~0.5" и 3'. Рассматривались все АО, появившиеся на видимом диске Солнца в течение указанного периода в интервале гелиодолгот E70–W50. АО, для которых исходные данные были неполными, исключались из рассмотрения. Были исключены также две АО (NOAA 12762 и 12747) по причине неопределенности вида структурной КМП-связи. Кроме того, вторая АО (низкоширотная) должна принадлежать 24-му циклу, но она либо являлась антихейловской, либо зашла из другого полушария. Всего для 24-го и 25-го циклов оказалось соответственно 11 и 22 АО, пригодных для определения связи места возникновения со структурой КМП. Расположение полярностей магнитного поля в рассматриваемых АО соответствовало правилу Хейла. Положение места возникновения АО относительно КМП определялось в первые сутки для момента времени, ближайшего ко времени получения карты КМП.

Для построения синоптической карты возникновения АО использовался период 2019–2020 гг., когда возникла 61 АО, из которых 21 относится к 24-му, 40 — к 25-му циклам.

В дальнейшем будем использовать три определения: магнитное поле АО (SDO/HMI), КМП (WSO)

Таблица 1

Рассматриваемые АО

Цикл	Полушарие	Номер АО по каталогу NOAA	Дата появления	Координаты	КМП
24	N	12735	15.03.19	N03E63	(+) f
		12736	19.03.19	N08W16	(+/-) хейл
		12737	31.03.19	N13E50	(+) f
		12739	17.04.19	N06W17	(+) f
		12742	23.06.19	N03W17	(+/-) хейл
		12743	24.06.19	N02W50	(-) l
		12748	31.08.19	N13E37	(+/-) хейл
		12751	02.11.19	N06W15	(+/-) хейл
	12766	02.07.20	N07E50	(+/-) хейл	
	S	12745, 12746	05.08.19	S06E22	(-) f
		12760	23.04.20	S07E68	(-/+ хейл
25	N	12763	30.04.20	N31E20	(+) l
		12772	16.08.20	N18E00	(+) l
		12784	19.11.20	N32E60	(-/+ хейл
		12799	20.01.21	N23 E00	(-) f
		12800	25.01.21	N18 E10	(+) l
		12801	30.01.21	N31W03	(-) f
		12804	22.02.21	N19W03	(-/+ хейл
		12813	03.04.21	N20W20	(+) l
		12817	17.04.21	N19W17	(+/-) антихейл
		12826	24.05.21	N24W35	(+) l
	S	12744	06.07.19	S28E58	(+/-) хейл
		12750	31.10.19	S28E46	(+/-) хейл
		12761	26.04.20	S17E05	(+/-) хейл
		12771	11.08.20	S19E67	(+) f
		12778	24.10.20	S20E12	(+/-) хейл
		12796	15.01.21	S22W04	(+/-) хейл
		12805	22.02.21	S23E06	(+) f
		12806	28.02.21	S31E30	(+) f
		12815	15.04.21	S20W07	(-) l
		12820	23.04.21	S21E23	(+/-) хейл
		12821	24.04.21	S22W04	(+/-) хейл
12823	09.05.21	S23E52	(+/-) хейл		

и фоновое магнитное поле (поле, видимое на магнитограммах SDO/HMI или WSO до появления АО).

СВЯЗЬ МЕСТА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АО СО СТРУКТУРОЙ КМП

Ниже приведены две таблицы. В табл. 1 указаны номера рассмотренных АО, дата начала выхода магнитного поля, гелиографические координаты, знак КМП (в скобках) в месте образования АО и характеристика его относительно закона распределения полярностей Хейла в АО в данном цикле и полушарии Солнца (f — последующая, l — лидирующая). Граница раздела полярностей областей КМП обозначена как +/- либо -/+ (направление с востока на запад), и хейл/антихейл. В табл. 2 приведены суммарные результаты.

Результаты анализа, представленные в табл. 1 и 2, показывают, что в половине случаев (17) новые АО возникали на границах раздела полярностей областей КМП, причем почти исключительно на хейловских границах в соответствующих полушариях и циклах активности. Только в одном случае новый поток появился на антихейловской границе. В остальных случаях (16) АО появлялись в униполярных областях КМП, при этом нет явного преимущества в расположении областей поля по правилу Хейла. Видимое преобладание отрицательной полярности областей КМП считаем несущественным из-за неравномерности появления АО по циклам и полушариям.

В переходный период от одного цикла к другому преимущественно возникали небольшие АО, содержащие поры и пятна площадью ~100 м.д.п. Магнитное поле в них систематически соответствовало закону Хейла в 24-м и 25-м циклах активности. Одно-

Таблица 2

Суммарные результаты положения АО относительно КМП по циклам и полушариям

Цикл 24		Цикл 25		Циклы 24 и 25
N-пол.	S-пол.	N-пол.	S-пол.	
(+)f — 3	(-)f — 1	(-)f — 2	(+)f — 3	(+) — 11
(-)l — 1	(-/+) хейл — 1	(+)l — 5	(-)l — 1	(-) — 5
(+/-) хейл — 5		(-/+) хейл — 2	(+/-) хейл — 8	f — 9
Всего 9	Всего 2	(+/-) антихейл — 1	Всего 12	l — 7
		Всего 10		хейл — 16
				антихейл — 1

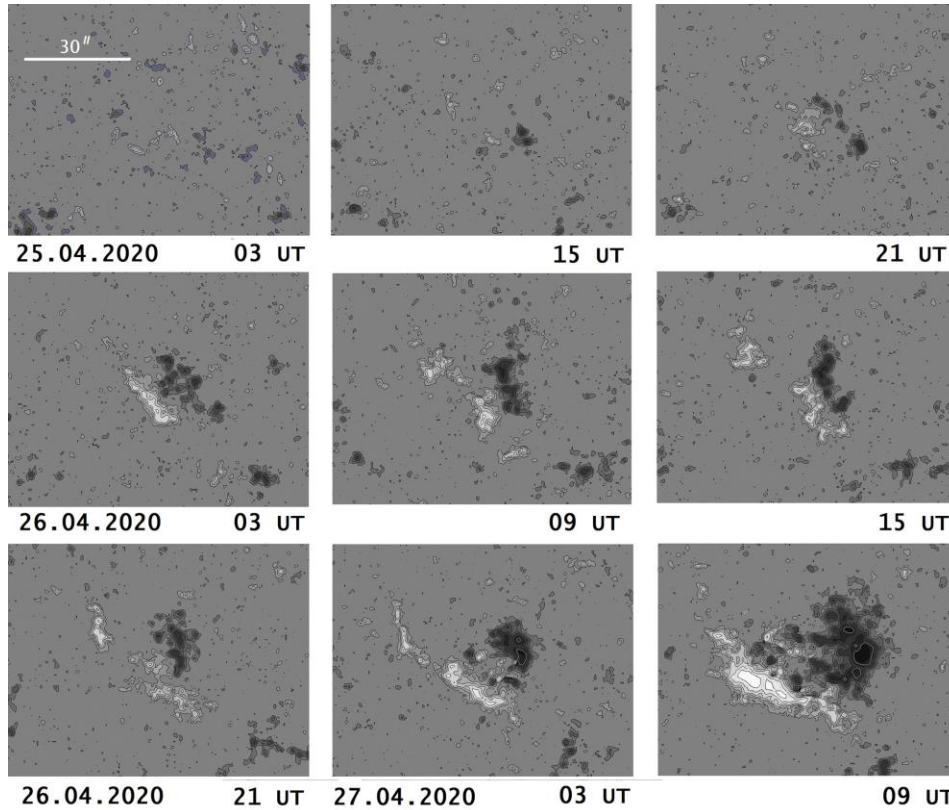


Рис. 1. Фрагменты магнитограмм SDO/HMI для области появления NOAA 12761. Черный цвет — отрицательное магнитное поле, белый — положительное

временное существование групп пятен нового и старого циклов в переходный период 2019–2020 гг. наблюдалось редко.

ИЗМЕНЕНИЯ В СТРУКТУРЕ ФОНОВОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПОЯВЛЕНИИ АО

Одной из первых работ, в которой обнаружены изменения в магнитном поле перед появлением АО, является работа [Варру et al., 1968]. Наблюдения проводились на вектор-магнитографе Саянской обсерватории с пространственным разрешением 18". Изменения в магнитном поле были зарегистрированы за три дня до образования группы пятен. Этот результат был подтвержден [Григорьев, Ермакова, 1976] наблюдениями в Саянской обсерватории на панорамном магнитографе с пространственным разрешением 4"×2".

Совместный анализ данных SDO/HMI и WSO дает возможность обнаружения крупномасштабных

и тонкоструктурных изменений в фоновом магнитном поле, предшествующих появлению нового магнитного потока АО.

Активная область NOAA 12761

Согласно магнитограммам SDO/HMI, 25 апреля 2020 г. в юго-восточном квадранте диска Солнца на широте S17 сформировалась область видимого усиления магнитного поля обеих полярностей (рис. 1). Примерно в 01:00–01:30 UT 27 апреля начался выход магнитного поля, и возникла АО нового цикла. В течение дня образовалось несколько небольших пятен, после чего началось разрушение АО. Нужно отметить, что усиление магнитного поля перед образованием АО происходило на масштабе, превышающем размер одной супергранулы. На рис. 2 показаны карты КМП WSO. В этом квадранте 24 апреля в 00:00 UT существовала обширная область КМП положительной полярности, в конце дня в ней появился остров отрицательной полярности (указан стрелкой). В течение последующих дней конфигура-

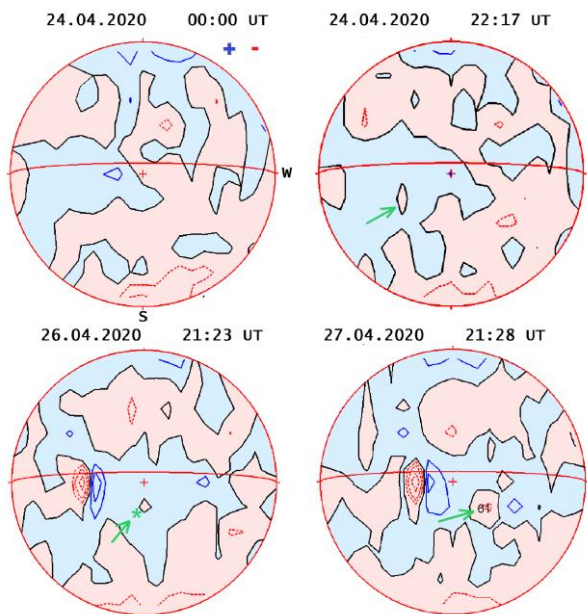


Рис. 2. Карты КМП WSO для периода возникновения NOAA 12761. Звездочка показывает место, где образуется АО, двузначный номер (последние две цифры номера АО) — место ее расположения, дополнительно эти участки помечены стрелками. Пояснения в тексте

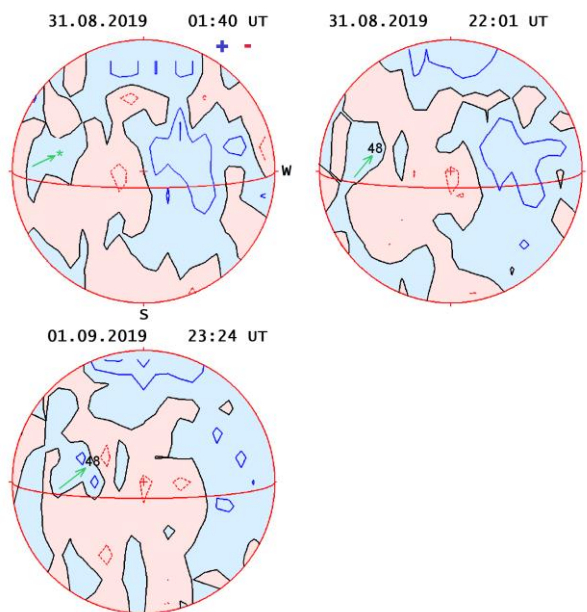


Рис. 3. Карты КМП WSO для периода возникновения NOAA 12748. Обозначения те же, что на рис. 2

ция КМП менялась, но область отрицательного поля сохранялась. Видно, что положения новой АО и нового структурного образования КМП совпадают.

Таким образом, примерно за два дня до появления первых пор будущей АО в структуре фонового магнитного поля наблюдается динамика, которая ведет к формированию крупномасштабной области нового магнитного потока. Изменения наблюдаются как по магнитограммам SDO/HMI, так и по WSO.

Активная область NOAA 12748

АО NOAA 12748 возникла 31 августа 2019 г. на участке с координатами N13E37. По магнито-

граммам SDO/HMI выход магнитного потока начался в 15:30 UT. Мы нанесли положение места выхода магнитного потока на карту КМП WSO, полученную 31 августа в 01:40 UT (рис. 3). Оно попало в центр ячейки поля положительной полярности. На карте WSO за 22:01 UT в этот же день центр АО располагался уже вблизи границы раздела полярностей КМП (+/-), а к западу от нее наблюдался небольшой остров поля положительной полярности. Очевидно, в течение 31 августа в месте возникновения АО появилось КМП отрицательного знака, разделившее область КМП положительного знака на две части. Нельзя установить, произошло ли это до возникновения АО или вслед за ним, но можно допустить, что оба процесса связаны с друг с другом.

Активная область NOAA 12750

По магнитограммам SDO/HMI выход магнитного потока начался 31 октября 2019 г. в ~04:30 UT (координаты S28E52). Магнитограмма WSO получена в 21:16 UT, и образовавшаяся АО попадает на хейловскую границу КМП (+/-) (рис. 4). В предыдущие сутки, 30 октября, в этом месте знак КМП был положительным. Образование АО началось спустя 4–5 ч после получения магнитограммы WSO 30 октября. Следовательно, в течение суток граница отрицательной области КМП сместилась с запада на восток.

Малая АО цикла 25

Небольшая АО нового цикла протяженностью 3° (координаты S20E11, номер не присвоен) возникла 29 июня 2019 г. Она существовала 2 сут. Выход магнитного поля начался около 21 UT. Первые поры образовались 30 июня около полудня, усилились 1 июля, на следующий день исчезли. АО интересна тем, что за несколько часов до ее появления началось видимое усиление сеточных магнитных полей на поверхности, превышающей размер несколь-

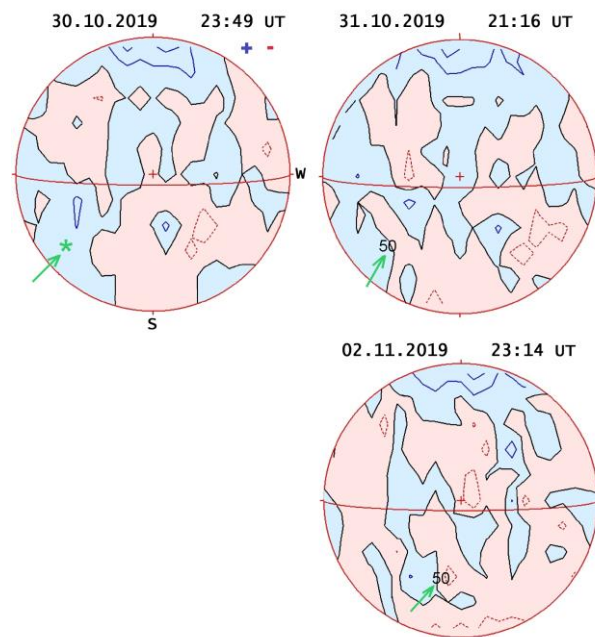


Рис. 4. Карты КМП WSO для периода возникновения NOAA 12750. Обозначения те же, что на рис. 2

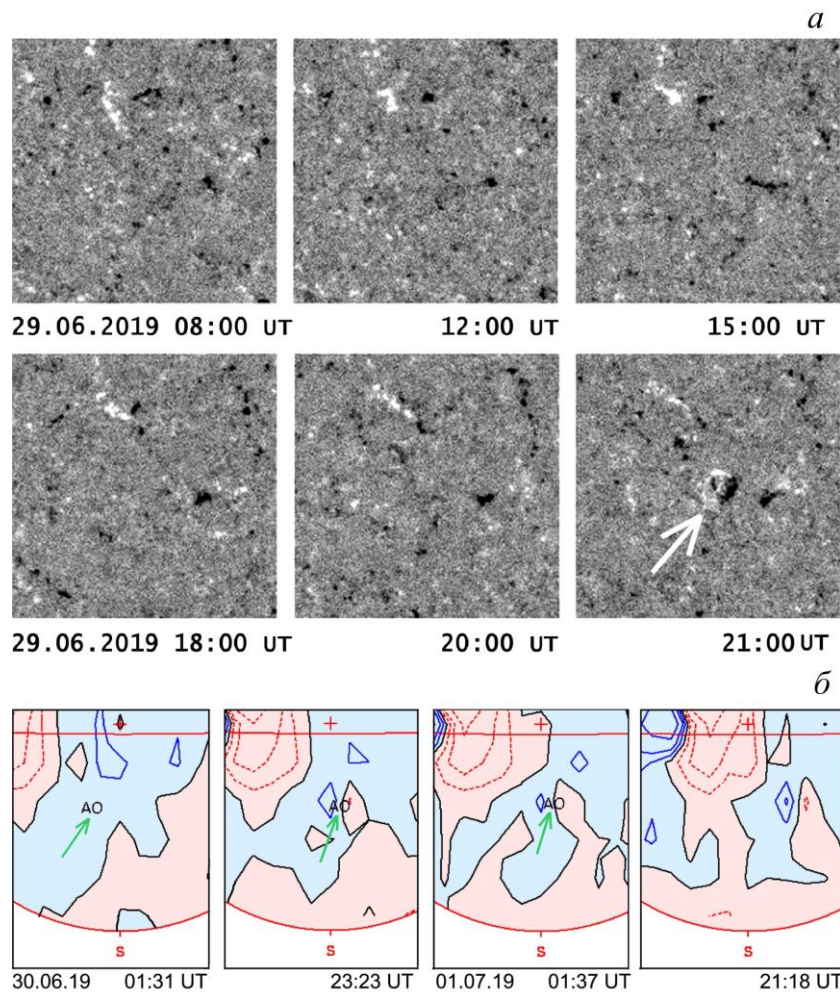


Рис. 5. Фрагменты магнитограмм SDO/HMI и SWO в месте появления малой АО. Пояснения в тексте

ких супергранул. Это видно на рис. 5, а. Размер кадра 90''×90''. Начиная с 15:00 UT постепенно прорисовывается черно-белая сетка. Место зарождения АО указано стрелкой. На панели б показаны фрагменты карт КМП WSO за 30 июня и 1 июля и положение АО. Данных за 27–29 июня нет, поэтому динамика КМП на ранней стадии образования АО неясна, но дальнейшие изменения говорят о развитии в этом месте участка отрицательной полярности и его объединении с полем южного полюса.

Таким образом, приведенные примеры показывают, что образование АО предваряется или, по крайней мере, сопровождается изменениями КМП. Перед появлением магнитного потока АО в тонкой структуре спокойной фотосферы появляются малые области нового магнитного поля обеих полярностей, может наблюдаться усиление сетки магнитного поля в масштабах, превышающих размер супергранулы. Вслед за этим происходит выход биполярной структуры, образующей АО. В это же время формируется новая область КМП.

АКТИВНЫЕ ДОЛГОТЫ В ПЕРИОД СМЕНЫ ЦИКЛОВ

Известно, что появление АО подчиняется некоторым пространственно-временным закономерностям [Витинский и др., 1986; Bai et al., 1995]. Размер

широтной зоны концентрации пятен составляет 10°–15° и в течение цикла перемещается от высоких широт к низким. Долготное распределение отличается значительной неоднородностью. Существуют долготные интервалы, в которых в течение длительного времени (до 20–40 солнечных оборотов) преимущественно появляются и развиваются АО. Природа этого явления до сих пор неизвестна и продолжает обсуждаться. Для изучения пространственного распределения возникающих АО в период перехода от 24-го цикла к 25-му была построена синоптическая карта, на которой в соответствии с кэррингтоновскими координатами показаны все АО за 2019 и 2020 гг., содержащие поры и пятна (рис. 6). Синие и красные кружки показывают АО, появившиеся соответственно в 2019 и 2020 г. Пятна нового и старого циклов значительно разнесены по широтным интервалам. Группы пятен и пор 24-го цикла располагаются в приэкваториальной зоне, от 15° N до 10° S. Для 25-го цикла активность сосредоточена преимущественно в северном полушарии выше 20°, а в южном — выше 15°. Горизонтальные линии по обе стороны экватора разделяют АО старого и нового циклов. На стадии затухания 24-го цикла активность преобладает в северном полушарии, в начале 25-го — в южном. Подавляющее большинство пятен в этот период имели малый размер.

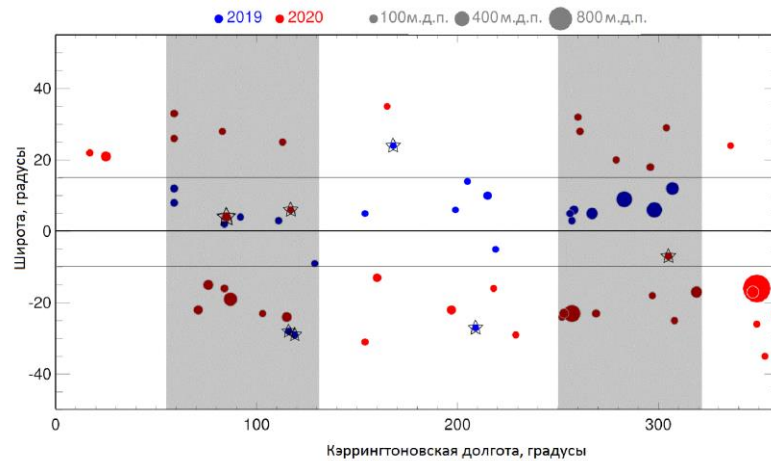


Рис. 6. Синоптическая карта АО за 2019–2020 гг. Пояснения в тексте

Таблица 3

Распределение АО по долготным интервалам

	60–130	130–250	250–320	320–360(0)–60
24 цикл	8	5	8	0
25 цикл	12	8	13	7
24 и 25 циклы	20	13	21	7

Видно, что солнечная активность преимущественно группируется в двух узких долготных зонах во время перехода от 24-го цикла к 25-му. Ширина долготных зон составляет около 70° (затемнены на рис. 6). Они расположены на 60°–130° и 250°–320° кэррингтоновской долготы, т. е. разнесены на ~180° и разделены двумя долготными зонами с низкой активностью по 120° и 100°. Концентрация возникающих групп пятен и пор в узких долготных зонах происходит независимо от полушария. Количество АО во всех долготных интервалах показано в табл. 3.

Преимущественные долготные зоны активности сохраняются при переходе от 24-го цикла к 25-му. Хотя практически не наблюдалось одновременного существования групп пятен нового и старого циклов, конец 24-го цикла и начало 25-го накладывались друг на друга. В 2019 г. возникли четыре группы пятен нового цикла на широтах выше 20°, а в 2020 г. три группы пятен старого цикла образовались на широтах ниже 10° (на рис. 6 соответствующие кружки обрисованы звездочками).

ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее распространенные модели АО объясняют ее появление на фотосфере подъемом омега-петли тороидального магнитного поля из глубины конвективной зоны. Первые изменения в структуре слабого КМП в фотосфере и эволюция мелкомасштабных сильных магнитных полей показывают, что всплывающий магнитный поток не является однородным, а представляет крупномасштабную систему магнитных арок. Следовательно, появление АО является крупномасштабным процессом выхода системы магнитных петель, охватывающей значительную часть солнечной атмосферы. От направления тороидального поля зависит полярность сол-

нечных пятен, составляющих АО. Полярность пятен, а значит, направление тороидального поля, изменяется от цикла к циклу в согласии с законом Хейла. Преимущественные долготные зоны активности сохранялись при переходе от 24-го цикла к 25-му, следовательно, затухание активности и тороидального поля старого цикла происходило преимущественно в тех же долготных зонах, где начал развиваться новый цикл.

Ранее подобный результат был получен [Venevolenskaya et al., 1999] при анализе перехода активности от 22-го цикла к 23-му в период минимума с июля 1996 по апрель 1998 г. В работе использовались синоптические карты, построенные по магнитограммам полного диска SOHO/MDI. Крупномасштабные структуры магнитного поля на последовательных оборотах появлялись на постоянных долготах и таким образом отражали магнитные активные долготы, названные так в работе [Vumba, Howard, 1965].

Надо отметить, что время жизни крупномасштабных магнитных структур значительно больше, чем время жизни групп малых пятен и пор, поэтому положение магнитных структур в большей степени подвержено влиянию собственных движений и дифференциального вращения в фотосфере. Определение преимущественных долготных зон появления групп пятен и пор отражает существование именно в этих долготных зонах в недрах Солнца источников генерации АО. Современные теории динамо и солнечного цикла пока не дают объяснения существованию долготных зон активности. Предлагаются различные механизмы такого явления. Например, в работе [Ruzmaikin, 1998] предполагается существование неосесимметричной моды α - Ω -динамо, что приводит к появлению нового магнитного потока на выделенных долготах.

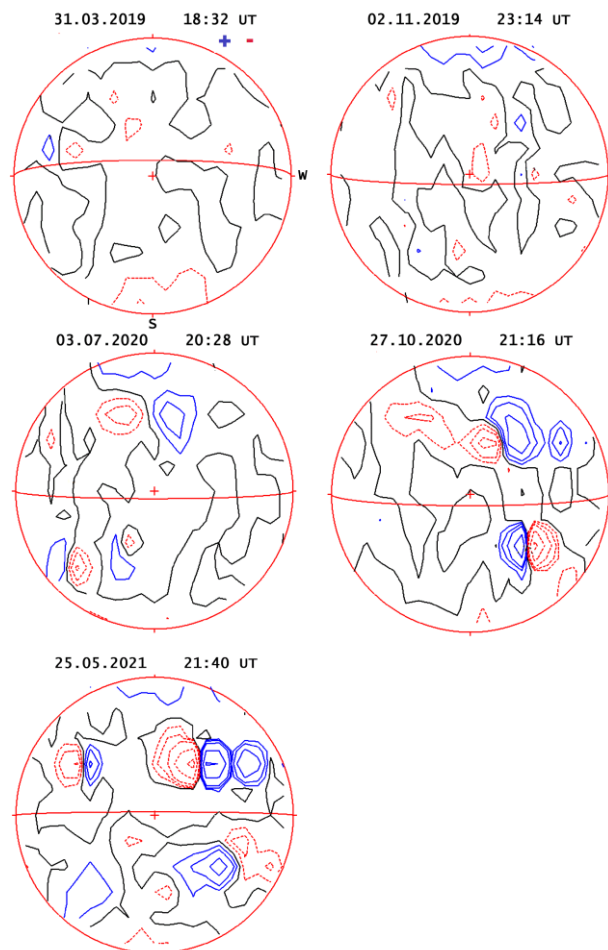


Рис. 7. Структура КМП в период смены 24–25-го циклов солнечной активности

Результаты нашей работы и работы [Benevolenskaya et al., 1999] показывают, что преимущественный долготный интервал покрывает обе полусферы Солнца. Этот факт позволяет допустить существование глобальных конвективных ячеек, вытянутых по меридиану и способствующих выходу тороидального магнитного поля на разных широтах нового и старого циклов активности. На рис. 7 показано, как меняется общая картина линий раздела полярностей КМП в период смены циклов. В структуре КМП в период минимума солнечной активности проявляется меридиональная составляющая, которая «теряется» с ростом активности. Численное моделирование солнечной конвекции обычно показывает в спектрах мощности скоростей конвективных течений кроме гранул и супергранул еще и гигантские ячейки [Miesch et al., 2008]. Убедительные наблюдательные подтверждения существования гигантских ячеек получены при анализе данных обсерватории SDO [Hathaway et al., 2013]. Размер ячеек оценивается в $2 \cdot 10^5$ км, скорость течения в поверхностных слоях очень мала (~ 8 м/с). Особый интерес всегда представляли секториальные или «банановые» ячейки, которые, возможно, ответственны за установление дифференциального вращения и перенос углового момента [Hotta et al., 2015]. Роль таких ячеек в появлении АО в предпочтительных долготных интервалах обсуждается и требует более тонкого подхода к моделированию.

ВЫВОДЫ

Основные выводы можно сформулировать следующим образом.

1. В переходный период от 24-го цикла к 25-му преимущественно рождались небольшие АО, содержащие пятна площадью ~ 100 м.д.п., магнитные поля в которых соответствовали закону Хейла в данном цикле активности. Новые АО возникали в половине случаев на границе раздела полярностей КМП, причем почти исключительно на хейловских границах в соответствующих полусферах и циклах активности, в остальных случаях — в униполярных областях КМП без видимого преимущества в расположении областей поля по правилу Хейла.

2. Образование АО предваряется или сопровождается изменениями в структуре КМП, при этом в тонкой структуре магнитного поля в фотосфере может наблюдаться усиление сетки магнитного поля на пространственном масштабе размера супергранул и более, а также появление малых областей нового магнитного поля обеих полярностей.

3. В переходный период от 24-го цикла к 25-му возникающие АО концентрировались в двух узких долготных зонах, покрывающих обе полусферы Солнца. Новый цикл начинался в тех же долготных зонах, где затухала активность старого цикла. При этом одновременно происходило затухание старого цикла на низких широтах, и развитие нового на высоких.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Данные SDO/HMI любезно предоставлены NASA/SDO и научными командами AIA, EVE и HMI. Данные WSO, любезно предоставленные J.T. Hoeksema, взяты на [<http://wso.stanford.edu>]. В настоящее время WSO поддерживается NASA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. *Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца*. М.: Наука, 1986. 296 с.
- Григорьев В.М., Ермакова Л.В. Изменения магнитных полей при возникновении активной области. *Солнечные данные*. 1976. № 4. С. 83–92.
- Григорьев В.М., Пещеров В.С. О развитии фонового магнитного поля в процессе появления новой активной области. *Астрономический циркуляр*. 1986. № 1427. С. 4–6.
- Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Динамика трубок магнитного поля в процессе формирования солнечного пятна. *Астрономический журнал*. 2012. Т. 89, № 11. С. 967–975.
- Степанян Н.Н. Фоновые магнитные поля и солнечная активность. *Изв. КРАО*. 1985. Т. 71. С. 62–68.
- Bai T., Hoeksema J.T., Scherrer P.H. Hot spots and active longitudes: organization of solar activity as a probe of the interior. *Proc. the 4th SOHO Workshop on Helioseismology*. ESA SP, 1995. Vol. 376. P. 113.
- Vappu M.K.V., Grigorjev V.M., Stepanov V.E. On the development of magnetic fields in the active regions. *Solar Phys*. 1968. Vol. 4. P. 409–421. DOI: [10.1007/BF00147906](https://doi.org/10.1007/BF00147906).
- Benevolenskaya E., Hoeksema J.T., Kosovichev A.G., Scherrer P.H. The interaction of new and old magnetic fluxes 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).
- Bumba V., Howard R. A study of the development of active regions on the Sun. *Astrophys. J.* 1965. Vol. 141. P. 1492–1501. DOI: [10.1086/148237](https://doi.org/10.1086/148237).

Duvall T.L.Jr., Wilcox J.M., Svalgaard L., et al. Comparison of H α 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).

Hathaway D.H., 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).

Hotta H., Rempel M., Yokohama T. High-resolution calculation of the solar global convection with the reduced speed of sound technique. II. Near surface shear layer with the rotation. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 798. P. 51–66. DOI: [10.1088/0004-637X/798/1/51](https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/1/51).

Matsumoto R., Tajima T., Chou W., et al. Formation of kinked alignment of solar active regions. *Astrophys. J.* 1998. Vol. 493. P. L43–L46. DOI: [10.1086/311116](https://doi.org/10.1086/311116).

McIntosh P.S. The birth and evolution of sunspots. Observations. *Proc. the Conference "The Physics of Sunspots". Sunspot, NM, July 14–17, 1981. (A83-18101 06-92).* 1981. P. 7–54.

McIntosh P.S., Wilson P.R. A new model for flux emergence and the evolution of sunspots and the large-scale fields. *Solar Phys.* 1985. Vol. 97. P. 59–79. DOI: [10.1007/BF00152979](https://doi.org/10.1007/BF00152979).

Miesch M.S., Brun A.S., DeRosa M.L., Toomre J. 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).

Ograpishvili N.B. Large-scale structure of background fields and active region. *Solar Phys.* 1988. Vol. 115. P. 33–41. DOI: [10.1007/BF00146228](https://doi.org/10.1007/BF00146228).

Ruzmaikin A.A. Clustering of emerging magnetic flux. *Solar Phys.* 1998. Vol. 181. P. 1–12. DOI: [10.1023/A:1016563632058](https://doi.org/10.1023/A:1016563632058).

Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 207–227. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).

URL: <http://wso.stanford.edu> (дата обращения 15 мая 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

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).