

УДК 523.62-726

ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И АНОМАЛЬНОЙ ПОГОДЫ ЛЕТА 2010 г. 2. СВЯЗЬ С ЗОНОЙ АКТИВНЫХ ДОЛГОТ. ЭФФЕКТЫ НА ЗАПАДЕ И ВОСТОКЕ ЕВРОПЫ

© 2012 г. К. Г. Иванов, А. Ф. Харшиладзе

Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: kivanov@izmiran.troitsk.ru

Поступила в редакцию 27.06.2011 г.

Подтверждается тесная синоптическая связь секторной структуры магнитного поля Солнца с приземным тропосферным давлением на примере трех европейских пунктов (Троицк, Рим, Юнгфрау) в период аномально жаркого лета в июне–августе 2010 г. Обосновывается положение, что такой связи способствовала аномально низкая солнечная активность, обусловленная суперпозицией минимумов 22-летнего и 180-летнего циклов. Посекторный анализ солнечно-тропосферных связей показал, что появление блокирующего антициклона в Подмосковье, его распространение на Рим и Юнгфрау и последовательное отступление сначала от этих пунктов, а затем и от Подмосковья было тесно связано с явлениями солнечной активности, продуцирующими, по современным представлениям, циклоническую активность посредством модулирования электрического поля Земли.

1. ВВЕДЕНИЕ

Более 40 лет назад обнаружена статистически значимая связь между секторной структурой ММП и зональной циркуляцией в атмосфере Северного полушария Земли и предположено, что так называемые естественные синоптические периоды в какой-то мере определяются структурой межпланетной среды [Дмитриев и др., 1978]. Недавно показано, что в одном важном частном случае, аномально жаркой погоды лета 2010 г., имела место синоптическая связь между секторной структурой солнечного и межпланетного магнитных полей (СМП и ММП) с одной стороны, приземным атмосферным давлением в подмосковном г. Троицке с другой [Иванов и Харшиладзе, 2011].

Цель данной статьи показать, что: во-первых, указанный выше синоптический тропосферный эффект секторной структуры был связан с одной из главных зон солнечных активных долгот (разд. 3); во-вторых, этот эффект в приземном атмосферном давлении имел как сходства, так и различия в пунктах наблюдения Восточной Европы, с одной стороны, и Западной — с другой (разд. 4). Кроме того, в разд. 5 дана общая характеристика солнечной активности соответствующего периода как аномально низкой, зависящей от фазы 22-летнего цикла, при которой наиболее вероятно проявление подобных синоптических солнечно-тропосферных связей. В разделе 6 рассматриваются посекторные солнечно-земные связи и обсуждается их возможная роль в динамике приземного тропосферного давления лета 2010 г. В обсуждении (разд. 7) и заключении (разд. 8) кратко

формулируются основные результаты и перспективы дальнейшей работы.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Синоптическая связь между секторной структурой СМП и ММП с одной стороны, и приземным атмосферным давлением в г. Троицке в период аномально жаркой антициклонической погоды лета 2010 г. с другой, была установлена [Иванов и Харшиладзе, 2011] по данным наблюдения давления [<http://cro.izmiran.rssi.ru/mosc>]. В данной работе с целью сравнения тропосферных эффектов секторной структуры этого периода в Восточной (Троицк) и в Западной Европе из этого же источника взяты данные о приземном давлении на станциях наблюдения космических лучей в Риме (Rome) и на Юнгфрау (Jungl).

Как и в предыдущей работе были использованы результаты сферического гармонического анализа (10 первых гармоник) наблюдений фотосферного магнитного поля [<http://wso.stanford.edu/synoptic/WSO>], выполненного по оригинальной методике [Харшиладзе и Иванов, 1994] для характеристики секторной структуры крупномасштабного открытого магнитного поля Солнца (КОМПС). Кроме того, по методике работы [Иванов и Харшиладзе, 2007] строились карты фотосферных источников и рассчитывались магнитные потоки КОМПС для характеристики их структуры, конфигурации, динамики, интенсивности, их отношения к явлениям солнечной активности и связям с околосолнечной секторной структурой ММП и

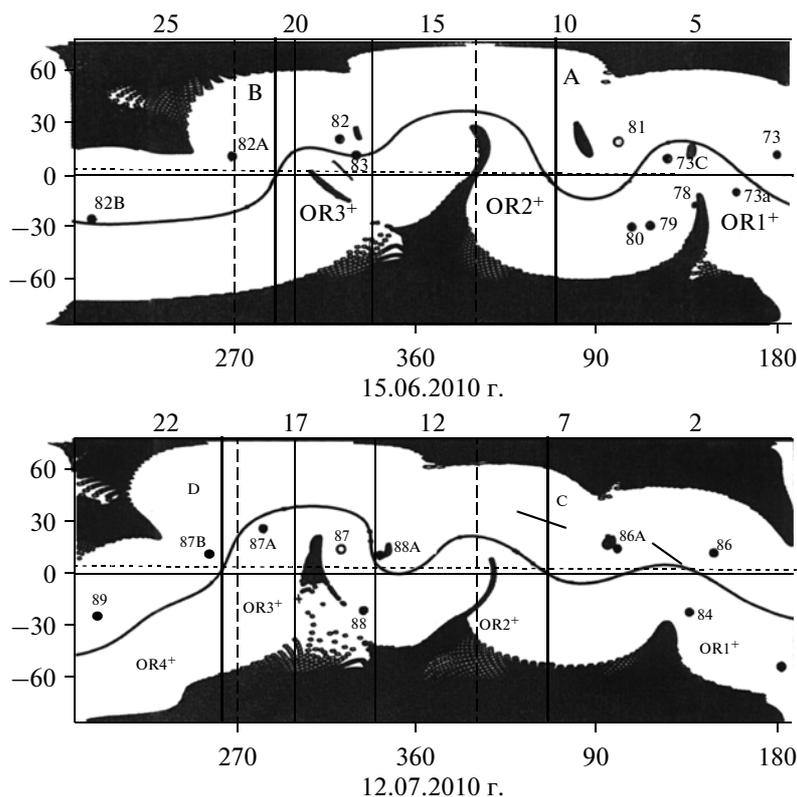


Рис. 1. Карты фотосферных источников (черным) крупномасштабного открытого поля Солнца (КОМПС), совмещенные с нулевыми линиями на поверхности источника ($2.5 R_{\odot}$). $OR1^+$, ... (Open Region 1^+) ... – структурные области КОМПС, положительно (от Солнца) направленного; кружки с цифрами – положения АО; отрезки – активные волокна. Вертикальные линии: тонкие – границы главной зоны активных долгот; прерывистые – границы окрестностей этой зоны, толстые – секторные границы, (а) – оборот, центрированный на 15.06.2010 г. с секторными границами *A*, *B*; (б) – оборот, центрированный на 12.07.2010 г. с границами *C*, *D*.

ее тропосферным синоптическим эффектом. Околосолнечная структура ММП, как и ранее, определялась по данным ИСЗ Wind (ведущий экспериментатор L. Lepping) и более детальным данным каталога OMNI (провайдеры J. H. King, N. Papatashvili). Кроме того, использованы данные о потоках низкоэнергичных протонов солнечных космических лучей (СКЛ) по измерениям на ИСЗ ACE (ведущий экспериментатор R. Gold) [<http://cdaw.gsfc.nasa.gov/>]. Явления солнечной активности (пятна, вспышки, активные волокна, корональные выбросы) рассматривались по данным из источников [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/] и [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/].

3. КРУПНОМАСШТАБНОЕ ОТКРЫТОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА ЛЕТА 2010 г.

Карты КОМПС лета 2010 г., центрированные на 15.06, 12.07, 8.08 и 4.09 2010 г. представлены на рисунках 1, 2. Это карты фотосферных проекций КОМПС (черные области), совмещенные с нулевой линией КОМПС на поверхности источника ($2.5 R_{\odot}$ от центра Солнца).

Границы окрестностей (270° и 30° LC) и самой зоны (300 – 340° LC) активных долгот обозначены соответственно прерывистыми и тонкими сплошными вертикальными линиями. Толстыми вертикальными линиями *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H* обозначены секторные границы КОМПС, межпланетные продолжения которых образовывали секторную структуру ММП, связанную с синоптическим тропосферным эффектом в Восточной Европе (Троицк) аномально жарким летом 2010 г. [Иванов и Харшиладзе, 2011].

Напомним, что синоптический тропосферный эффект в приземном атмосферном давлении состоял в том, что при пересечении указанных секторных границ изменялись какие-либо характеристики давления (величина, колебания), и в общем они сохранялись в пределах между двумя последовательными границами. Температура наземного воздуха следовала этой же закономерности.

Из рассмотрения рисунков 1, 2 мы делаем следующие выводы. 1) Секторные границы КОМПС попарно, *A* и *B*, *C* и *D*, *E* и *F*, *G* и *H* охватывали с некоторым избытком указанную главную зону активных долгот. 2) В пределах этих секторных

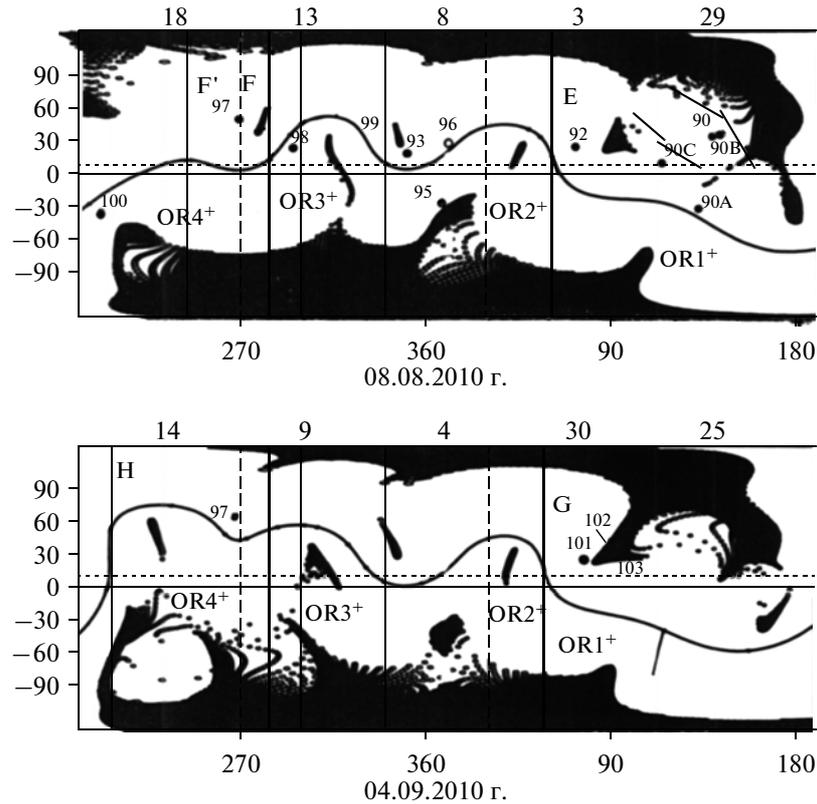


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но (а) — оборот, центрированный на 08.08.2010 г., с секторными границами E , F и F'' (уточненная); (б) — на 4.09.2010 г., с границами G и H .

границ доминировало положительное КОМПС, т.е. направленное от Солнца, ответственное за положительные сектора ММП около Земли. 3) В пределах границ B и C , D и E , F и G поле КОМПС было преимущественно отрицательное; соответственно Земля пересекала сектора с преимущественным отрицательным полем.

В таблице даны сведения о секторах КОМПС: даты пересечения границ с гелиопроекцией Земли, знаки и магнитные потоки обоих знаков в пределах каждого сектора. Эти сведения ниже (разд. 5 и 6) используются для характеристики общего состояния солнечной активности, связей комплексов активности с КОМПС и комплексной геоэффективностью секторов, включая магнитосферные, геомагнитные и тропосферные эффекты.

4. СРАВНЕНИЕ СВЯЗЕЙ СЕКТОРНОЙ СТРУКТУРЫ ММП С ПРИЗЕМНЫМ АТМОСФЕРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ В ВОСТОЧНОЙ И ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЕ ЛЕТОМ 2010 г.

На рисунке 3 иллюстрируются и сравниваются связи секторной структуры ММП со структурой вариаций приземного атмосферного давления P в

Восточной (Москва—Троицк) и Западной (Рим и Юнгфрау) Европе в июне—августе 2010 г.

Этот рисунок допускает следующие выводы. 1) Связь секторной структуры ММП с атмосферным давлением проявляется в том, что при пересечении всех секторных границ на всех этих станциях давление P изменяется в том или ином отношении (средней величине, амплитуде, частоте или стабильности колебаний) и становится специфическим для каждого данного сектора относительно соседних. 2) В Восточной Европе наблюдалась последовательность пяти секторов высокого давления AB , BC , CD , DE , EF и конечного сектора низкого давления FG , положившего конец антициклону. 3) В Западной Европе антициклон устанавливался позднее, в секторах BC и CD , с вытеснением его циклоном в следующем секторе DE и возобновлением в секторе EF . 4) В секторе DE вытеснение антициклона намечалось также и в Восточной Европе, но как видно по динамике колебаний P в этом и в последующем секторе EF антициклон успешно противостоял циклону до заключительного сектора FG .

Таким образом рис. 3 иллюстрирует упорядочение приземного атмосферного давления по секторной структуре ММП (СМП) как на одном из репрезентативных пунктов Восточной Евро-

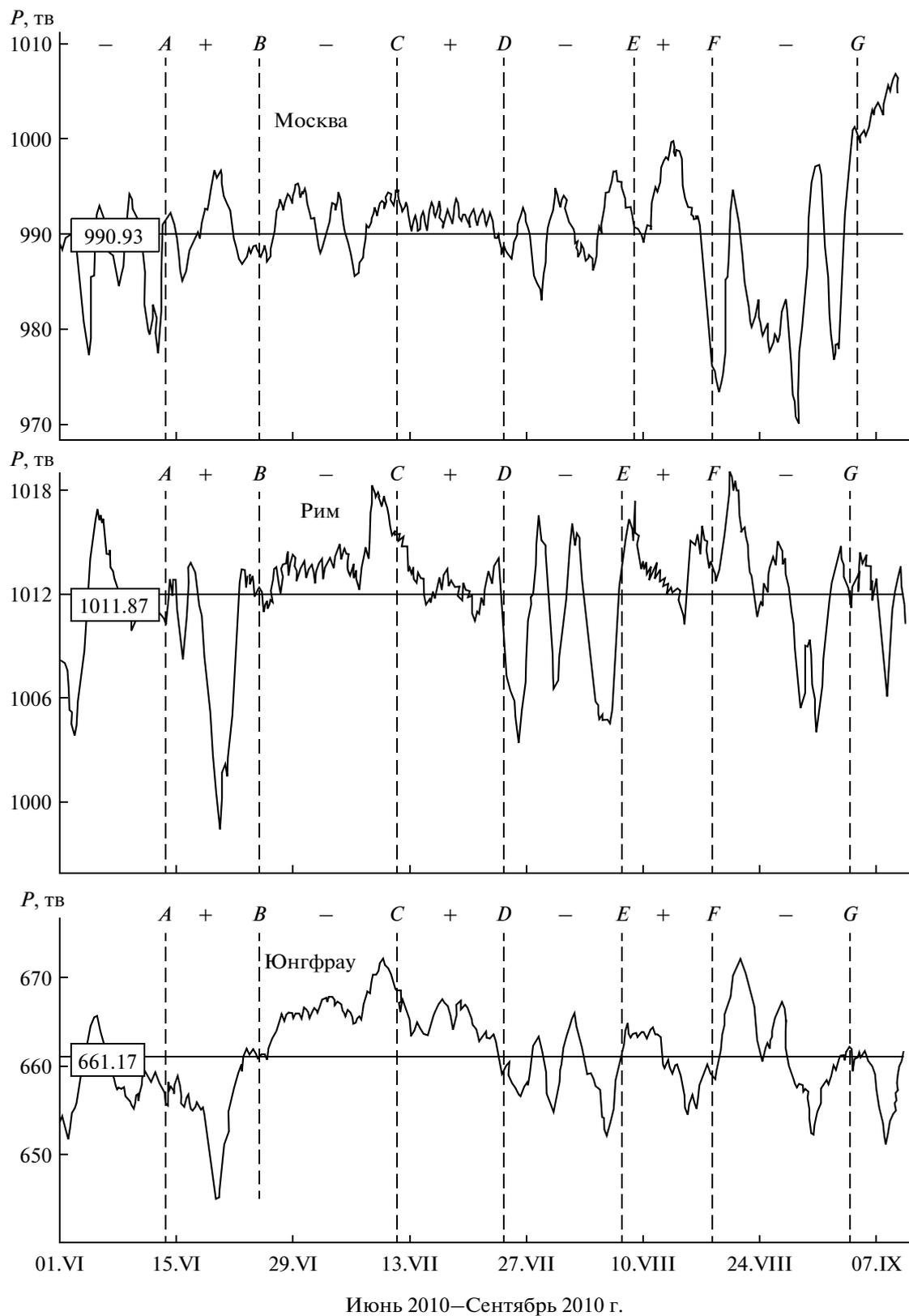


Рис. 3. Вариации приземного атмосферного давления в Москве (Троицк), Риме и на Юнгфрау в июне–сентябре 2010 г. A, B, \dots – секторные границы ММП, соответствующие границам КОМПС на рис. 1 и 2.

Таблица 1. Сектора КОМПС: (границы A, \dots , даты, знаки на гелиопроекции Земли и магнитные потоки (в 10^{21} мкс) в фотосферных источниках $OR1^+, \dots$

Сектора	Даты	$OR1^-$	$OR2^-$	$OR3^-$	$OR4^-$	$OR1^+$	$OR2^+$	$OR3^+$	$OR4^+$
– ? A	1–10.06.	>–3.6	–0.4			5.1	0.1		
+ AB	11–21.06.			–1.3	–0.1			9.4	0.2
– BC	21–8.07.	–19	–0.1			5.4		2.2	
+ CD	8–20.07.			–1.7	–0.2			7.2	5.9
– DE	20–4.08.	–10.7	–0.8			1.5			0.6
+ EF	4–14.08.			–2.8	–0.3			3	3.3
– FG	14–31.08.	–8.8	–1.9			1.5			
+ GH	31–16.09.			–2.8	–0.3			3	6.9

Таблица 2. Коэффициент корреляции между давлением на ст. Москва, Рим, Юнгфрау

Сектор	Интервал	М–Р	М–Ю	Р–Ю
? A	1.06.–14.06.	–0.05	–0.30	0.85
AB	15.06.–25.06.	–0.88	–0.74	0.85
BC	20.06.–13.07.	0.26	0.19	0.80
CD	13.07.–24.07.	0.62	0.65	0.50
DE	25.07.–09.08.	0.29	0.34	0.84
EF	9.08.–18.08.	–0.42	–0.43	–0.03
FG	18.08.–03.09.	0.01	0.08	0.82

пы, так и на двух принятых к рассмотрению в данной статье пунктах Западной Европы. Подчеркнем, что упорядочение в данном событии наблюдается безотносительно знака поля ММП в секторе, как упорядочение специфических форм приземного давления в пределах границ одного-двух секторов, следующих друг за другом. Поясним выводы несколько подробнее.

В таблице 2 даны коэффициенты корреляции r между вариациями P для каждой пары станций, вычисленные отдельно для каждого сектора.

Для пары Рим–Юнгфрау эти коэффициенты положительны, за исключением сектора EF , и в основном с высоким значением ~ 0.8 . Для пар Москва–Рим и Москва–Юнгфрау r становится положительным в секторах BC , CD , DE (26 июня–9 августа), достигая максимума $r \approx 0.6$ в секторе CD (13–24 июля), в экстремуме жаркого лета.

Итак, рассмотрим тропосферный эффект секторной структуры на этих станциях более последовательно и детально. 1) До пересечения границы A (1–14 июня) в Москве наблюдалась серия ложбин и гребней на фоне пониженного давления; в Риме и Юнгфрау – гребень синоптического масштаба (~ 7 сут). 2) В секторе AB (15–25 июня) в Москве доминировал гребень (область высокого давления) синоптического масштаба, в Риме и Юнгфрау – столь же масштабная ложбина (циклон). Коэффициенты r между Москвой и

Римом ~ -0.9 , и 0.9 между Римом и Юнгфрау. 3) Последовательность секторов BC (26 июня–13 июля) и CD (13–24 июля) на всех трех станциях охватывает стационарный антициклон, модифицированный в Москве серией гребней и ложбин на фоне высокого давления (сектор BC), а в Риме и Юнгфрау высоким гребнем (сектор BC) синоптического масштаба. В Москве (сектор CD) наблюдалась замечательная стабильность высокого давления, модулированная большеамплитудными суточными колебаниями с амплитудой до 3 миллибар, характерными скорее для тропических антициклонов. Именно в этой последовательности секторов коэффициенты корреляции между давлениями в Москве и на остальных станциях становятся положительными (табл. 2), а в секторе CD значения r в парах Москва–Рим и Москва–Юнгфрау достигают максимума ~ 0.6 и даже несколько превосходят значение в паре Рим–Юнгфрау, равное 0.5. 4) В дальнейшем вариации атмосферного давления упорядочиваются относительно границ секторной структуры по-разному в Москве и на двух других станциях (рис. 3). В Москве границы последовательности двух секторов DE и EF (25 июля–18 августа) охватывает серию гребней и ложбин на фоне быстрорастущего сильного тренда высокого давления. В Риме и Юнгфрау в границах сектора DE (25 июля–8 августа) наблюдается существенное понижение дав-

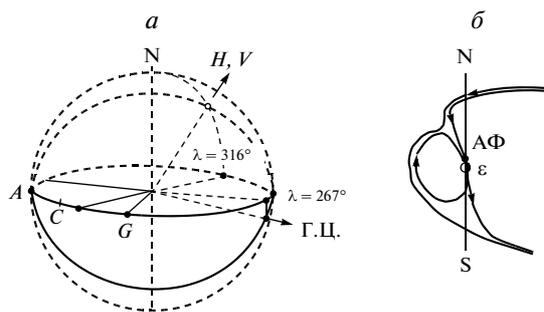


Рис. 4. (а) Эклиптические координаты: солнечного апекса — направления движения Солнца относительно звезд (I) в галактическом рукаве; долгота центра масс солнечной системы ($\Lambda = 312^\circ$), проекции направления на галактический центр ($\Lambda = 265^\circ$) и положения Земли на эклиптике ($70-170^\circ$) с 1.06.–4.09.2010 г. A, C, G — секторные границы ММП. (б) Типичная конфигурация спокойной магнитопаузы в июне–августе с проекцией Северо-Атлантического участка арктического климатологического фронта АФ под дневным магнитосферным каспом.

ления (циклон), модулированное серией ложбин и гребней. Заметим, что циклон в секторе DE привел к срыву антициклона и существенному понижению температуры приземного воздуха в Западной Европе; в Москве же сектора DF и EF с динамичной серией ложбин и возрастающих по амплитуде гребней, вызвали лишь незначительные понижения жары [Иванов и Харшиладзе, 2011]. 5) В конце рассматриваемого периода приземное атмосферное давление упорядочивается в Москве в секторе FG (18 августа–3 сентября), в Риме и Юнгфрау в последовательности секторов EF и FG (9 августа–3 сентября). В первом случае мощный циклон, модулированный на своей периферии глубокими ложбинами и высокими гребнями, вытесняет антициклон из Восточной Европы. В Риме и Юнгфрау вначале восстанавливается масштабная область высокого давления, сменяющаяся областью с существенным уменьшением давления.

В разделе 5 рассматривается более подробная и разносторонняя, чем в разд. 3, ситуация на Солнце летом 2010 г.

5. СИТУАЦИЯ НА СОЛНЦЕ ЛЕТОМ 2010 г.

Ниже последовательно: дается общая характеристика ситуации на Солнце, основанная на месте событий лета 2010 г. на специфических фазах солнечных циклов с периодами ~ 178 , 22 и 11 лет (5.1); рассматривается структура, конфигурация и динамика КОМПС в марте–сентябре 2010 г., от момента перехода двухсекторной структуры КОМПС в мультисекторную (5.2); в связи с динамикой КОМПС рассматриваются генерация и дестабилизация комплексов солнечной активности

в июне–августе 2010 г., классифицируются секторные границы КОМПС как активные и пассивные (5.3).

5.1. Суперпозиция 178-летнего и 22-летнего минимумов солнечной активности

178-летний цикл — это цикл влияния на солнечную активность пяти внешних массивных планет, а через них и галактических факторов [Васильева и др., 1972а, б, 1975], в синтезированной форме, представленное как влияние на солнечную активность центра масс солнечной системы (ЦМСС) [Петрова и др., 1978]. В 22-летнем цикле согласно работам [Васильева и Федоров, 1981; Васильева и др., 2002] имеется существенное влияние четырех планет земной группы на известную тенденцию к минимальной активности четных циклов по сравнению с нечетными.

Характеристики этих циклов, установленные в работах указанных авторов, позволяют предположить, что в исследуемый нами период имеет место суперпозиция минимумов обоих циклов. Действительно, что касается минимума 178-летнего цикла, то по работе Петровой и др. [1978] текущий цикл должен принадлежать к серии циклов с минимальной активностью из-за попадания ЦМСС в диапазон эклиптических долгот $270-360^\circ$. На рисунке 4 приводится, следующая из этой работы, современная долгота ЦМСС $\lambda = 312^\circ$, что подтверждает предположение, что в настоящее время солнечная активность находится в минимуме 178-летнего цикла. С другой стороны, минимумы 22-летних циклов, согласно работе Васильевой и Федорова [1981] имеют место в минимуме 11-летних четных, когда северный магнитный полюс солнечного диполя находится на севере Солнца и когда, по предположению Васильевой и др. [2002], Солнце замедляет вращение вокруг своей оси, из-за смещения ЦМСС относительно центра Солнца, теряя при этом энергию $\sim 10^{39}$ эрг. Поскольку именно такая фаза 22-летнего цикла наблюдается в настоящее время, то с учетом вышесказанного о текущем минимуме 178-летнего цикла, можно полагать, что имеет место суперпозиция минимумов этих двух циклов.

Следствия этого положения подтверждаются: характеристиками динамики КОМПС в марте–сентябре 2010 г. (5.2); крайне низким уровнем солнечной активности в рассматриваемый период (5.3), что на наш взгляд, было важным условием четкой синоптической связи (разд. 4) между секторной структурой КОМПС и ММП с одной стороны, и структурой приземного атмосферного давления с другой.

Рис. 5. Динамика нулевой линии КОМПС в марте–сентябре 2010 г. от перехода двухсекторной структуры в мультисекторную. *A, B, ...* секторные границы. Прерывистые вертикальные линии – границы окрестностей зоны активных долгот; сплошные – границы зоны (300–340 LC).

5.2. Динамика КОМПС: возникновение мультисекторной структуры; твердотельная и пассивная секторные границы зоны активных долгот; расщепление магнитного потока и замедление его вращения

На рисунке 5 показаны последовательности нулевых линий КОМПС на поверхности источника (кэрингтоновские обороты CR 2094–2101, март–сентябрь 2010 г.), полученные на обсерватории им. Уилкокса (WSO). Этот рисунок позволяет сделать следующие выводы. 1) Двухсекторная структура КОМПС, существовавшая вплоть до марта 2010 г. (CR 2094), преобразовалась сначала в 4-секторную (CR 2095) и далее в мультисекторную (6-секторную). 2) Замечательной характеристикой этой структуры было возникновение и длительное существование (CR 2096–2101) твердотельно вращающейся секторной границы A° , *A*, *C*, *E*, *G*, *I*. Это была граница сектора, располагавшегося в западных окрестностях зоны активных долгот. 3) Сразу же, во время образования этой границы, появляются дополнительные сектора, сначала в зоне активных долгот и ее восточных окрестностях (CR 2096–2098), а затем и далее на восток (CR 2099–2101). 4) В конечном итоге возникает целый цуг из трех положительных и двух отрицательных секторов КОМПС, охватывающий большой интервал долгот, включая зону активных долгот, с головной твердотельно вращающейся границей *G* и хвостовой границей *H*, распространяющейся на восток в направлении противоположном вращению Солнца (медленно вращающейся).

Эта мультисекторная структура более детально иллюстрируется картами КОМПС, центрированными на зону активных долгот (рис. 1, 2). Эти карты характеризуют динамику структуры и конфигурации как нулевой линии на поверхности источника, так и фотосферных источников КОМПС. Ансамбль этих источников, обозначенных OR (Open Region) и пронумерованных с запада на восток OR1⁺, OR2⁺, OR3⁺, OR4⁺, находится в однозначном соответствии с секторами КОМПС. В таблице 3 даны магнитные потоки в этих источниках, вычисленных для 4-х оборотов лета 2010 г.

Эти данные позволяют сделать следующие выводы. 1) Общий положительный магнитный поток Солнца в течение этих четырех оборотов, существенно не изменяясь по величине, замедляется во вращении, расщепляется в соответствии с

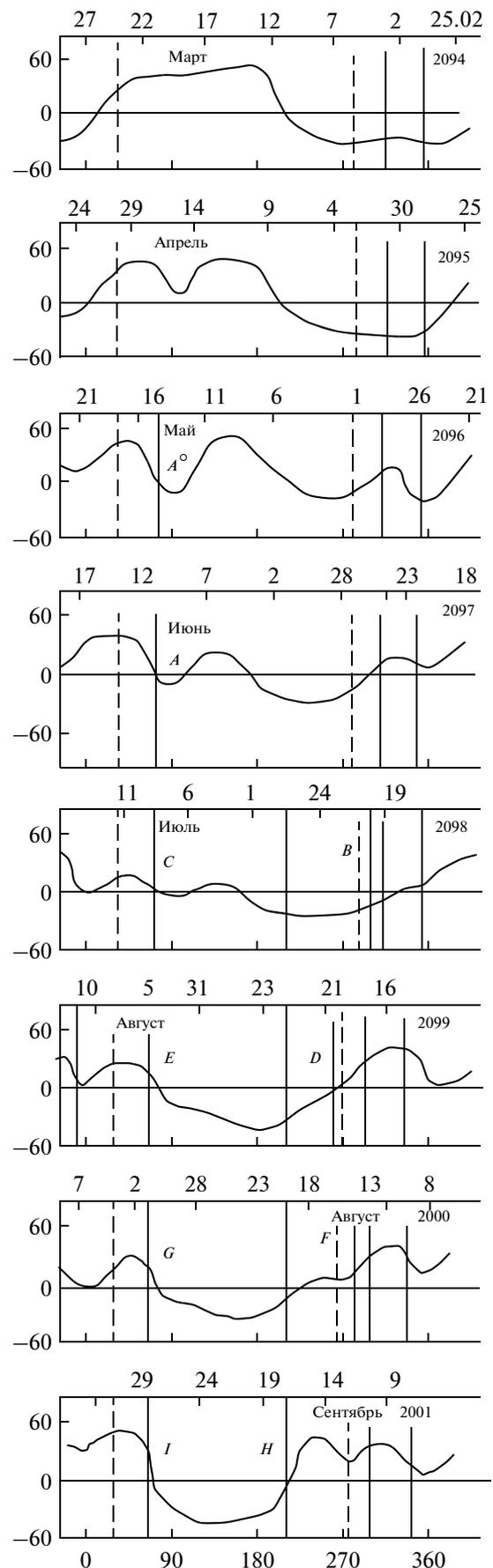


Таблица 3. Магнитные потоки (10^{21} мкс) в положительных секторах мультисекторной структуры лета 2010 г.

Оборот	OR1 ⁺	OR2 ⁺	OR3 ⁺	OR4 ⁺	Σ
15.06.2010 г.	5.5	6.5	3	0	15
12.07.2010 г.	5.0	5.0	5.5	1.5	17
08.08.2010 г.	1.5	4.0	6.5	3.5	15.5
04.09.2010 г.	1	3.0	5	5.5	15.5

Таблица 4. Распределение по секторам КОМПС: числа активных областей АО, пятен N , вспышек и субвспышек sf , активных волокон AF, корональных выбросов CME энерговыделения (ед. 10^{28} эрг) во вспышечную светимость ε_f и кинетическую энергию выбросов ε_c

Сектор	-A	+AB	-BC	+CD	-DE	+EF	-FG	Σ
АО	7	2	6	4	8	5	5	37
N	41	15	8	18	44	55	20	201
sf	22	2	1	42	8	11	1	88
AF	3	1	3	0	7	1	4	18
CME	54	27	51	35	40	23	51	281
ε_f	8.5	0.8	0.5	17.5	25	4.5	0.4	57.2
ε_c	0.5	0.3	0.8	0.4	0.4	0.2	0.5	3.1

секторной структурой и перераспределяется по секторам с возрастанием с запада на восток. 2) Проявляется тенденция к преимущественной концентрации магнитного потока в зоне активных долгот и ее окрестностях. 3) Твердотельно вращающаяся секторная граница A, C, E, G наблюдалась в головной части мультисекторной структуры в течение всех четырех оборотов; хвостовая, пассивная граница B, D, F, H испытала в конечном итоге сильное замедление и продвинулась на восток в направлении, противоположном вращению Солнца. 4) Вполне допустимо предположение о правовинтовом спиральном движении фотосферных источников КОМПС и соответствующем изгибе нулевой линии на поверхности источника даже в течение 4-х рассматриваемых оборотов.

5.3. Явления солнечной активности лета 2010 г.

В таблице 4 дано распределение по секторам КОМПС числа активных областей, пятен, вспышек и субвспышек, активных волокон, корональных выбросов, энерговыделение во вспышечную светимость и кинетическую энергию корональных выбросов. На рисунках 1, 2 показаны активные области (кружки) и исчезающие волокна (прямые отрезки).

Из этих данных можно сделать следующие выводы. 1) Активных областей было очень мало, и почти все они были с крайне низким уровнем

пятнообразования и вспышечной продуктивности. 2) Несмотря на большое количество корональных выбросов, все они относились к очень слабым, ниже порога (10^{26} эрг) возможной оценки их энергии. 3) Энерговыделение как во вспышечную светимость, так и в кинетическую энергию выбросов было крайне низким как внутри каждого сектора, так и в сумме по всем секторам. 4) Столь низкий уровень солнечной активности подтверждает предположение (подраздел 5.1) о суперпозиции 178-летнего и 22-летнего минимумов солнечной активности.

Выше предполагалось, что именно столь низкий уровень солнечной активности был важнейшим условием возникновения синоптической связи между секторной структурой ММП и приземным атмосферным давлением. Основанием для этого предположения является то, что, если в условиях умеренной и высокой активности в пределах каждого сектора действует целый ряд разнообразных геоэффективных факторов, допускающих лишь статистическую связь между секторной структурой ММП и тропосферой, как например – в работе [Дмитриев и др., 1978], то в условиях крайне низкой активности, геоэффективность каждого сектора может быть специфической и вполне обнаруживаемой синоптически, что подтверждается сопоставлениями, проведенными в разд. 4.

Для выяснения физического механизма тропосферного эффекта следующим шагом жела-

тельно (разд. 6): во-первых, рассмотреть специфические особенности каждого из секторов *AB* и т.д.; во-вторых, увязать эти особенности с их конкретными солнечными и межпланетными источниками.

6. ПОСЕКТОРНЫЕ ГЛОБАЛЬНЫЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ И СВЯЗИ С РЕГИОНАЛЬНЫМ ПРИЗЕМНЫМ АТМОСФЕРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ЛЕТА 2010 г.

Синоптическая связь между секторной структурой СМП и ММП, с одной стороны, и структурой приземного атмосферного давления, с другой, проявившаяся летом 2010 г. (разд. 4), указывает на существование цепочки физических процессов, обеспечивающих эту связь от Солнца до тропосферы. Возникает задача выявления этой цепочки, для начала хотя бы на качественном уровне. Перспективным для выявления этой цепочки процессов, на наш взгляд, является электрооптический механизм солнечно-тропосферного эффекта, согласно которому этот эффект реализуется посредством модуляции электрического поля Земли вторжениями солнечных космических лучей, магнитосферной конвекцией, геомагнитными бурями и суббурями [Жеребцов и др., 2005]. Задача усложняется тем, что даже при наличии синоптической связи проявление этих процессов более или менее специфично для каждого сектора. Это диктуется особенностями явлений солнечной активности в пределах каждого сектора и его окрестностей и проявляется в разнообразии соответствующих тропосферных секторных структур (в данном случае приземного атмосферного давления).

Ниже, (подразд. 6) с учетом этого последнего обстоятельства, для каждого сектора отдельно сопоставляются соответствующие явления солнечной активности, межпланетные и геомагнитные возмущения, и вариации приземного атмосферного давления (рисунки 6–9). Будем также иметь в виду, что сектора *AB*, *CD*, *EF* это по существу один и тот же положительный сектор (рис. 1, 2), модифицированный последовательными оборотами Солнца, тогда как *BC*, *DE* и *FG* — по преимуществу соответствующий отрицательный. Напомним, что в табл. 4 приведены данные о количестве активных областей, пятен, вспышек, активных волокон, корональных выбросов и энерговыделении при прохождении каждого сектора.

6.1. Сектор *AB* (15–25.06.2010): субвспышки, СМЕ, СКЛ, кратные пересечения возмущенной секторной границы, рост южной компоненты ММП, слабая магнитная буря, циклон в Риме и Юнгфрау, антициклон в Москве

Возмущения (рис. 6а, рис. 9) на твердотельно вращающейся (см. 5.2) секторной границы *A* и

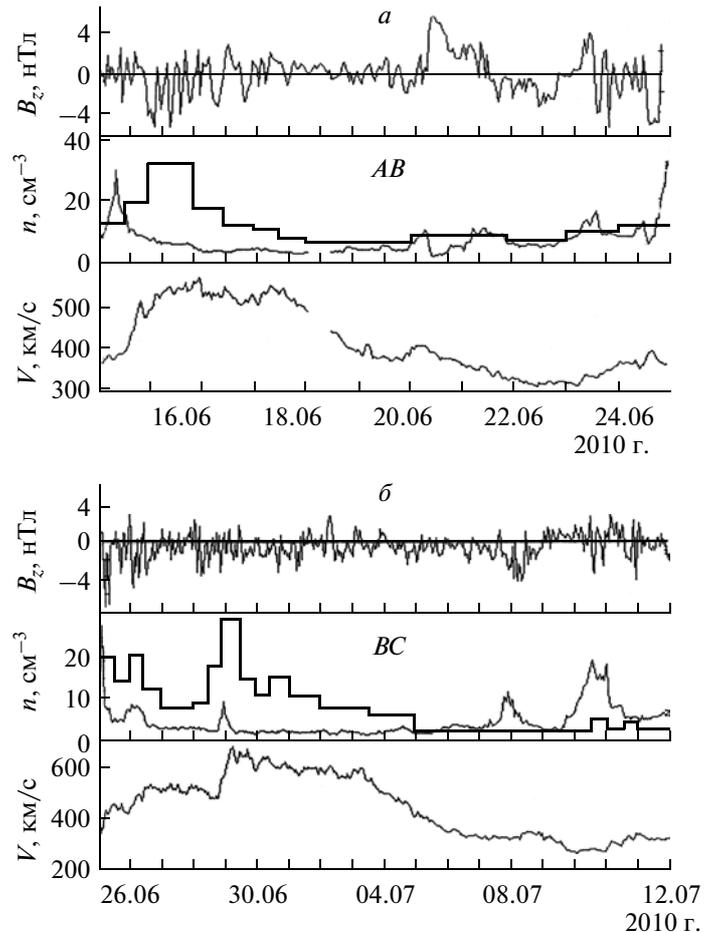


Рис. 6. Вариации вблизи Земли B_z -компоненты ММП, концентрации протонов n и скорости солнечного ветра (OMNI, провайдеры J.H. King и N. Papadatosvilli); A_p^* — полусуточные средние планетарного индекса геомагнитной активности: (а) — сектор *AB*, (б) — сектор *BC*.

внутри сектора *AB* инициировались активностью (табл. 5) в соседнем западном секторе СМП (рис. 1): субвспышками в АО11081, серией связанных с ними корональных выбросов СМЕ и эжекцией низкоэнергичных космических лучей СКЛ. Узость этого сектора и благоприятное долготное положение способствовали его относительно высокой геоэффективности: приходу СКЛ (рис. 9), распространению СМЕ с началом в 09:54 вдоль секторной границы *A*, возрастанию скорости солнечного ветра и западной компоненты его электрического поля, ответственной за рост внутримагнитосферной конвекции, колебаниям ММП, росту южной компоненты B_z , генерации небольшого планетарного геомагнитного возмущения (рис. 6а).

В общем, возникли все условия, способствующие, согласно электрооптическому механизму [Жеребцов и др., 2005], модуляции приземного

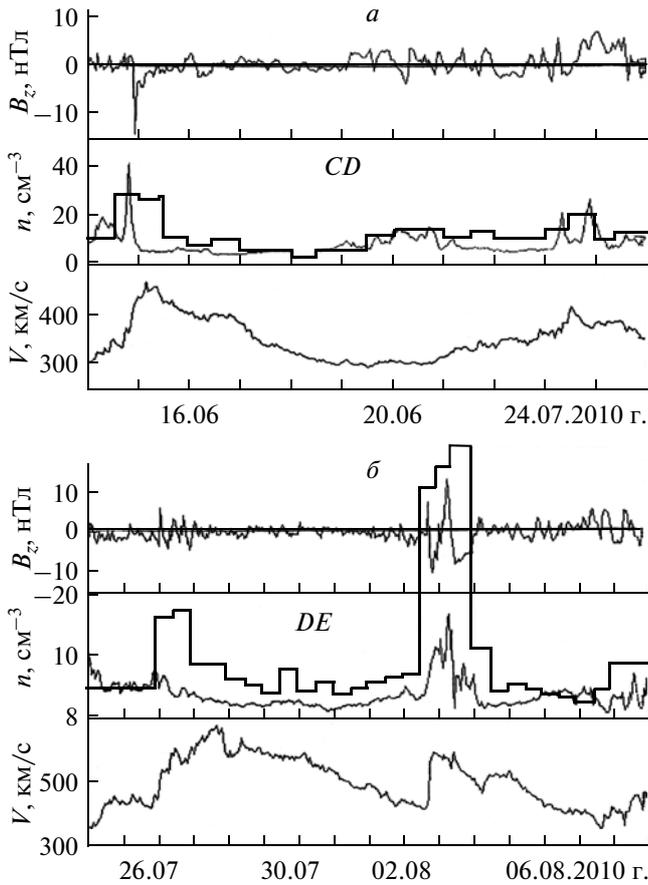


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но (а) – сектор *CB*, (б) – сектор *DE*.

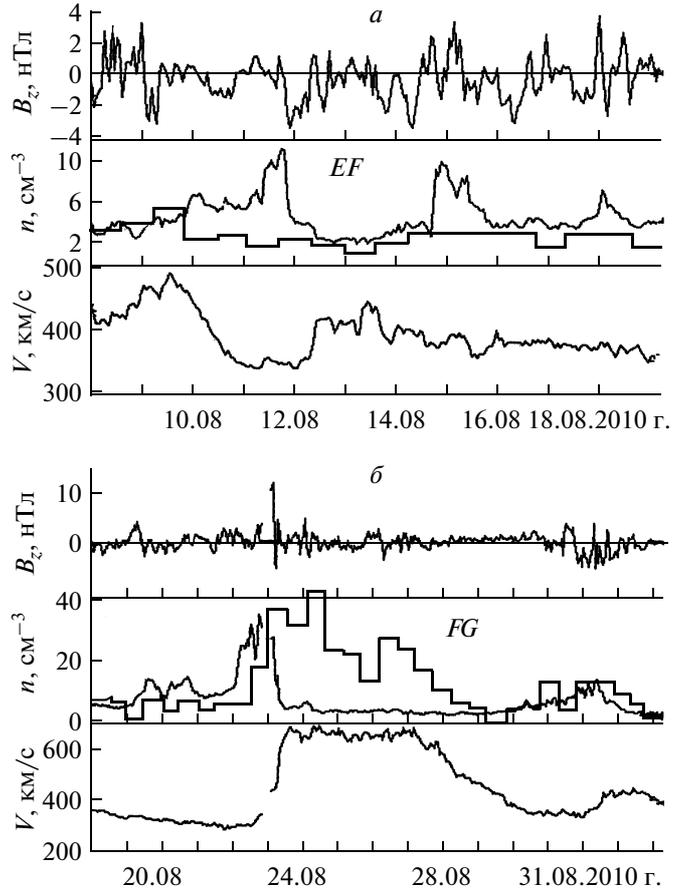


Рис. 8. То же, что на рис. 6, но (а) – сектор *EF* (F^o), (б) – сектор *F* (F^o)*G*.

электрического поля и возникновению тропосферного эффекта. Интересно напомнить, что по работе [Wilcox, 1979] секторные границы с низкоэнергичными СКЛ особенно эффективно воздействуют на тропосферу.

Как показано выше (разд. 4, рис. 3) при прохождении сектора *AB* в тропосфере Западной Ев-

ропы действительно наблюдался циклон, что согласуется со следствиями указанных работ и подтверждает эти работы. В то же время в Восточной Европе (Москва) наблюдался гребень высокого давления, что и стало началом сильной блокировки зональной циркуляции, метеорологическому аспекту которой посвящены недавние работы [Dole et al., 2011; Matsueda, 2011].

Численно геоэффективность этого и последующих секторов будем характеризовать величиной [Иванов и Микерина, 1972].

$$\Phi^* \sim B^2(1 + 6 \sin \alpha)^2 \sin(\theta/2)/n^{1/2},$$

$$\alpha = \arccos|BV/BV|,$$

где *B*, *V*, *n* – магнитное поле, скорость и концентрация протонов в солнечном ветре.

$$\Theta = \arctg|B_y/B_z| \text{ при } B_z > 0,$$

$$\Theta = 180^\circ - \arctg|B_y/B_z| \text{ при } B_z < 0.$$

Внутри каждого сектора выбираются сутки с наибольшим значением Φ^* ; в секторе *AB* $\Phi^* = 825$ (табл. 5) в течение 16 июня 2010 г.

Таблица 5. Солнечные источники возмущений сектора *AB*: субвспышки *sh*, *sf*, СМЕ (*PA* – позиционный угол, ΔW – ширина, *V* – скорость), СКЛ 12.06.2010 г.

Субвспышки	СМЕ			
	UT	<i>PA</i>	ΔW	<i>V</i>
<i>sh</i>	01:31	289	119	404
00:55–01:13	03:56	286	48	343
N23 W43	07:31	288	37	330
<i>sf</i>				
08:59–09:40	09:54	280	76	372
N22 W52	09:54	66	84	502
СКЛ				
СКЛ 12–17.06.2010 г. $\Phi^* \sim 825$ $A_p^* - 18$				

6.2. Сектор BC (26.06–12.07): абсолютное отсутствие вспышек и субвспышек, множество слабых СМЕ, ничтожный поток СКЛ, слабовозмущенная секторная граница В, высокоскоростной поток из полярной корональной дыры, околонулевая $B_z < 0$, малая скорость пересоединения, слабое геомагнитное возмущение, антициклон в Москве, Риме и на Юнгфрау

Солнечная активность и геоэффективность сектора BC была на крайне низком уровне (рис. 1, 2, 6б, 9, табл. 4). Наблюдалась всего одна странная, вне АО, субвспышка внутри этого сектора 29.06.2010 г. (05:00–05:07 UT N15 W14 (рис. 1)). Множество (52) очень слабых СМЕ, в том числе два 07.07 и 09.07.2010 г. на больших позиционных углах (339 и 333° с необычайно большим ускорением до 2226 и 2421 км/с. СМЕ 28.06 в 21:26 UT и упомянутая выше субвспышка сопровождалась небольшим возрастанием СКЛ в диапазоне энергии 1.91–4.75 Mev (рис. 9), почти на порядок меньшим, чем в секторе AB.

Граница сектора B и его головная часть оказались слабовозмущенными высокоскоростным потоком (рис. 6б) из полярной корональной дыры (рис. 1), усиленным после указанных выше субвспышек и СМЕ. Южная компонента B_z была вблизи нуля, максимальный темп пересоединения (29–30.06.) $\Phi^* = 425$, в два раза ниже, чем в секторе AB. В головной части – небольшое геомагнитное возмущение.

В целом низкая геоэффективность этого сектора не создавала условий для генерации циклонов в Северном полушарии, требующихся согласно работам [Wilcox, 1979; Пудовкин и Располов, 1993; Жеребцов и др., 2005], а скорее способствовала генерации антициклонов, что подтверждается дальнейшим усилением антициклона в Москве и распространением его на Рим и Юнгфрау (рис. 3).

6.3. Сектор CD (12–24.07.): Множество субвспышек, экранированных от Земли секторными границами, по-преимуществу вне сектора CD; множество очень слабых СМЕ, нулевой поток СКЛ; слабовозмущенная твердотельно вращающаяся секторная граница С; очень малая B_z ММП и скорость пересоединения; спокойное геомагнитное поле; антициклон в Москве, Риме и Юнгфрау (рис. 1, 3, 7а, 9, табл. 3 и 4)

Сектор практически был свободен от каких-либо возмущений. Твердотельно вращающаяся (5.3) головная граница С была слегка возмущена (рис. 7а) активным волокном DSF3 (01:24–13:14 UT 6.07.2010 г. N36E16) (рис. 2). Расщепление магнитного потока OR2⁺ (табл. 3) привело к возникновению в хвостовой части сектора CD активной области 11081, серия субвспышек из которой оказа-

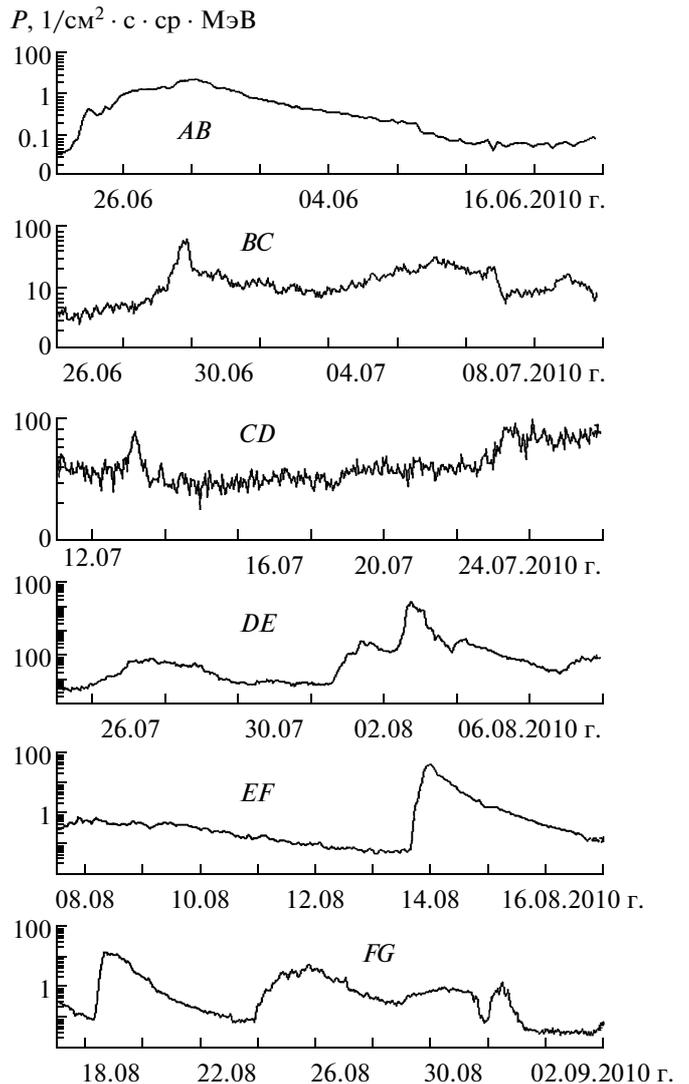


Рис. 9. Вариации потоков низкоэнергичных (1.91–4.75 МэВ) протонов по измерениям на ИСЗ ACE (ведущий экспериментатор R. Gold) в июне–августе 2010 г. внутри секторов ММП AB, BC, ... (рис. 3).

лась негеоэффективной ввиду экранирования Земли (рис. 1) изгибом секторной границы.

Поток низкоэнергичных СКЛ (1.91–4.15 Mev) был практически нулевым (рис. 9). B_z -компонента ММП флуктуировала около нулевого значения (рис. 7а), за исключением суток (15 июля) сразу же после прихода границы, когда наблюдался быстрозатухающий импульс $B_z \approx -15$ нТл. Тем не менее, скорость пересоединения в эти сутки была невелика $\Phi^* \sim 500$, что соответствовало небольшому быстротечному геомагнитному возмущению ($A_p = 10$) и последующему, очень спокойному геомагнитному полю.

Очевидно, что в этом секторе отсутствовали условия для генерации циклонов, предполагаемые в указанных выше работах. В этом секторе (рис. 3) антициклон господствовал в Москве, Риме и Юнгфрау. Приземное атмосферное давление в этих пунктах (табл. 2) было высокоррелированным, температура воздуха в Центральной России — экстремально высокая.

Следует, однако, заметить, что большинство субвспышек (31 из 41) и единственная вспышка балла 1f, наблюдавшаяся на Солнце при прохождении гелиопроекции Земли сквозь сектор *CD* и головную часть сектора *DE*, возникли в АО 11089 (рис. 1) 20–24.07.2010 г. Рост амплитуды флуктуации B_z во второй половине сектора *CD* (рис. 7а) обусловлен приближением Земли к секторной границе *D*, к юго-востоку от которой располагалась АО 11089, генерировавшая эти флуктуации. Эти флуктуации оказались способными несколько увеличить темп пересоединения (например 22.06.2010 г. $\Phi^* \sim 460$) и стать причиной длительного слабого геомагнитного возмущения 20–24 июля. Хотя относительно сильные возмущения на Солнце, в межпланетной среде и тропосфере наблюдались после пересечения границы *D*, тем не менее начало им было положено в секторе *CD*, и именно эта серия субвспышек была ответственна за возмущения в головной части сектора *DE*.

6.4. Сектор DE (25.07.–8.08.2010 г.): Слабая и сильная солнечно-земные бури; разрушение антициклона (циклон в Риме и на Юнгфрау), превращение “статического” антициклона в “динамический” в Москве (рис. 1, 3, 7б, 9, табл. 6)

Как отмечено в подразделе 6.3 вход Земли в сектор *DE* (рис. 2) привел к небольшому дальнейшему росту солнечно-земного возмущения от солнечных источников, связанных с АО 11089 (субвспышек, СМЕ и эжекции СКЛ — табл. 6).

В результате увеличился поток низкоэнергичных СКЛ (рис. 9), возрос темп пересоединения до $\Phi^* \sim 605$, возникла слабая $A_p^* = 19$ геомагнитная буря (рис. 7б, табл. 6). При переходе через границу *D* произошло разрушение “статического” антициклона во всех трех пунктах (рис. 3), формирование цуга ложбин и впадин синоптического масштаба.

В конце этого сектора, с приближением Земли к твердоотельно вращающейся секторной границе *E*, впервые с начала мая 2010 г., возникло сильное солнечно-земное возмущение, с существенным ростом геоэффективной южной компоненты B_z ММП (рис. 7б), скорости пересоединения ($\Phi^* \sim 2880$, табл. 6), вторжением интенсивного

потока СКЛ (рис. 9) и сильной геомагнитной бурей ($A_p^* = 51$).

Источником возмущения была ситуация на Солнце, порожденная взаимодействием мощной отрицательной области КОМПС $OR1^-$ с $OR1^+$ и $OR2^+$ (рис. 2). В итоге этого взаимодействия магнитный поток в положительном секторе (подраздел 5.2) перераспределялся по мультисекторной структуре этого сектора и смещался на восток, а в отрицательном секторе, в окрестностях твердоотельно вращающейся секторной границы *E*, сформировался (рис. 2) и практически одновременно (1.08.–3.08.2010 г.) дестабилизировался (табл. 6) специфический комплекс активности, с выбросом активных волокон, длительной субвспышкой и серией СМЕ, в том числе быстрого типа Гало.

Возникший на входе в сектор *DE* цуг ложбин и впадин в приземном тропосферном давлении интенсифицировался в ходе указанной сильной солнечно-земной бури (рис. 7). Но если в Риме и на Юнгфрау среднее давление упало (рис. 3) (господствовал циклон), то в Москве небольшое начальное понижение среднего давления сопровождалось его возрастанием с колебаниями растущей амплитуды (господствовал “динамический” антициклон).

Таким образом поведение солнечной активности, околосолнечных возмущений и приземного атмосферного давления и в этом секторе согласуются с предположениями о механизмах физической связи между этими явлениями в цитируемых выше работах.

В заключение хотелось бы обратить внимание на возможное фундаментальное значение специфической “волоконной” активности, проявившейся в этом секторе как следствие взаимодействия КОМПС различной полярности на твердоотельно вращающейся секторной границе *E*. Дело в том, что в начале и на всем протяжении предыдущего, 23-го цикла подобные взаимодействия приводили, как правило, к интенсивному пятнообразованию с высокой вспышечной продуктивностью [Иванов и Харшиладзе, 2004; 2009]. В данном же цикле, и сектор *DE* тому яркий пример, подобные взаимодействия сопровождаются чрезвычайно низким пятнообразованием (максимальное число пятен в АО 11092 и 11094 на рис. 3 равно соответственно 10-ти и 6-ти). Этот пример может свидетельствовать о радикальном отличии текущего цикла от предыдущего и подтверждать, следующие из работ [Васильева и Фёдоров, 1981; Васильева и др., 2002] (см. также работу [Еганова, 2004]) положения замедления вращения Солнца в минимуме 22-го цикла, усугубляемого его суперпозицией с минимумом 180-летнего (подраздел 5.1).

Таблица 6. Солнечные источники возмущений сектора DE : субвспышки (sf), исчезающие волокна (DSF), активные темные волокна (ADF), яркие выбросы на диске (DSD), CME, корональные выбросы, Φ , Λ – гелиокоординаты в градусах

Даты	Событие				CME			
	Тип	UT	Φ	Λ	UT	PA	ΔW	V
22.07.2010 г.	sf	12:10–12:38	S23	E39	12:12	34	8	588
	sf	15:14–15:19	S25	E39	18:24	245	8	554
СКЛ 22–30.07.2010 г. $\Phi^* \sim 605$ $A_p^* = 19$								
01.08.2010 г.	sf	07:55–09:46	N18	E33	13:42	Halo	–	1309
	DSF3	07:15–08:45	N36	W30				
	DSF2	07:50–08:11	N37	W32				
	DSF3	16:55–21:00	N19	W18	23:18	56	120	3728
	DSF1	17:12–05:04	N22	W18				
02.08.2010 г.	ADF1	07:40–08:38	N12	E13	11:12	93	21	221
03.08.2010 г.	BSD1	03:02–03:20	N13	E02				
СКЛ 1–8.08.2010 г. $\Phi^* \sim 2880$ $A_p^* = 51$								

6.5. Сектор EF (8–17.08), уточненный EF° (8–20.08.2010 г.): Дестабилизация комплекса активности $sf + DSF$ с интенсивной вспышкой СКЛ; спокойная геомагнитная обстановка; восстановление антициклона в Риме и на Юнгфрау; переход от антициклона к циклону в Москве

Необходимо уточнить (рисунки 2, 3 и 5) положение границы F этого сектора, заменив F на F° исправив неточность, допущенную в работе [Иванов и Харшиладзе, 2011]. Дело в том, что, как показано выше (разд. 5), ситуация на Солнце в течение лета 2010 г. характеризовалась взаимодействием фотосферных источников КОМПС на твердотельно вращающейся границе $A, C, E \dots$, следствием чего было расщепление магнитного потока положительного сектора, дрейф его пассивной границы $B, D, F \dots$ на восток. Это обстоятельство, подтверждаемое, в частности, конечным положением этой границы H (рис. 2, 5), не было правильно учтено в нашей предыдущей работе. Подтверждается необходимость такого исправления F на F° данными положения околоземных секторных границ ММП, что учитывается в дальнейшем.

В положительном КОМПС мультисекторной структуры, между границами EF° наблюдалась всего одна субвспышка в АО 11098 11.08.2010 г. (13:43, N14 E34), будучи экранированной от Земли (рис. 2). Земля проходила небольшой отрицательный сектор 13–16 августа (8–11 августа проекция гелиотраектории). Именно в этот интервал в этом секторе произошла серия из 10-ти субвспышек в АО 11099, наиболее длительная из которых (14.08.2010 г. 09:40–11:10 N12 W54) сопро-

вождалась в 10:12 UT быстрым (до 1200 км/с) CME типа Гало и интенсивным потоком СКЛ, достигнувшем Земли (рис. 9). Следующая вспышка СКЛ возникла в начале 18.08.2010 г. (рис. 9) и сопровождалась быстрым ($V = 1416$ км/с) CME типа частичного Гало 05:48 UT, однако без появления субвспышек в видимом диапазоне.

Геомагнитная обстановка оставалась спокойной (наибольшая скорость пересоединения в начале (9.08.2010 г.), сектора $\Phi^* \sim 660$ и малое возмущение $A_p^* = 9$. Вслед за этой вспышкой в Москве в секторе EF° наблюдался наибольший за все лето перепад приземного атмосферного давления (рис. 3) от наивысшего гребня до глубокой ложбины; появился циклон, положивший конец жаркой антициклонной погоды лета 2010 г. В то же время в Риме и на Юнгфрау наблюдалось восстановление антициклона.

6.6. Сектор $F^\circ G$: Высокоскоростной поток из корональной дыры, серия всплесков СКЛ, малая геомагнитная буря; циклон в Москве, переход от антициклона к циклону в Риме и на Юнгфрау

При прохождении этого сектора зарегистрирована всего одна далекая вспышка в АО 11100 (26.08.2010 г., 05:34 S21 W68) (рис. 2), сопровождавшаяся в 05:36 UT медленным ($V = 386$ км/с) CME без каких-либо околоземных эффектов. В этом секторе возникла целая серия “безвспышечных” всплесков СКЛ (рис. 9), сопровождавшаяся CME 24.08. (01:48), 28.08. (12:48) и 31.08. (21:17), причем последнее было типа Гало и очень быстрое ($V = 1267$ км/с). Кроме того, в этом секторе

24–28.08. наблюдались (рис. 8б) высокоскоростной поток из корональной дыры и соответствующая малая ($A_p^* = 23$) геомагнитная буря. В Москве господствовал циклон, установившийся в конечном итоге в Риме и на Юнгфрау.

Как видно, в этом секторе было достаточно солнечных источников, модулирующих, согласно электрооптическому механизму [Жеребцов и др., 2005], электрическое поле Земли и влияющих на тропосферу.

Таким образом, посекторное рассмотрение последовательности секторов лета 2010 г. подтвердило, что в каждом из них возможны существенные физические связи между явлениями солнечной активности и вариациями приземного тропосферного давления в качественном соответствии с предположениями, вытекающими из электрооптического механизма влияния солнечной активности на тропосферу.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные выше результаты подтверждают сделанные ранее выводы о реальности связи секторной структуры КОМПС с тропосферой Земли [Мансуров и др., 1974; Wilcox, 1979; Wilcox и др., 1974; Дмитриев и др., 1978; Burns et al., 1980; Сытинский и др., 2003].

Впервые однако, начиная с работы [Иванов и Харшиладзе, 2011] и в данной работе показано, что такие связи могут проявляться синоптически для некоторой непрерывной последовательности секторов, по крайней мере для специфических условий, какими были условия Европейского лета 2010 г.

Кроме того, на наш взгляд, установленная синоптическая связь и выполненный (разд. 6) посекторный анализ солнечно-тропосферных связей позволяют уточнить смысл влияния секторной структуры на тропосферу. Оказывается, в этом эффекте решающую роль играет весь комплекс явлений солнечной активности в данном секторе, (вспышки, всплески СКЛ, корональные выбросы и дыры, активные волокна), а не знак сектора ММП. Это означает, что в пределе, при полном отсутствии этих явлений в секторе, отсутствует и существенное воздействие на тропосферу, как это имело место в секторе *CD* (подраздел 6.5) в экстремуме жаркого лета (12–24.07.2010 г.). Отсюда следует вывод, что довольно четкая синоптическая связь между секторной структурой и тропосферой стала возможной в условиях очень низкой солнечной активности, когда в каждом секторе, рассмотренной последовательности секторов, явления солнечной активности или отсутствовали, или были единичными, специфическими для каждого сектора и легко идентифицируемыми как источники тропосферных эффектов, на базе существующих предположений о меха-

низме этих эффектов [Пудовкин и Распопов, 1993; Жеребцов и др., 2005].

Показано, что условия низкой солнечной активности стали, скорее всего, следствием суперпозиции минимумов 22-летнего [Васильева и Федоров, 1981] и 180-летнего [Петрова и др., 1978] циклов солнечной активности.

Что касается механизмов влияния солнечной активности на тропосферу, то, на наш взгляд, особенно полезным для качественной интерпретации обнаруженных связей и перспективным для дальнейшего, представляется механизм модуляции электрического поля Земли в пределах каждого сектора теми или иными явлениями (вторжениями СКЛ, магнитосферной конвекцией, бурями и суббурями) – электрооптический механизм [Жеребцов и др., 2005]. Согласно этому механизму модуляция электрического поля приводит к подъему отрицательно заряженных аэрозолей, превращению их в центры конденсации водяного пара и образованию облачности.

Мы хотели бы обратить внимание на то, что этот механизм можно увязать с бароклинной неустойчивостью климатологических фронтов, которая, как известно [Матвеев и Сераев, 1997], ответственна за генерацию атмосферных волн, продуцирующих циклоны и антициклоны.

В этой связи обратим внимание на то, что, как правило из-за экстремального наклона земного диполя к Солнцу в июне–июле [Савин, 2005] Северо-Атлантический участок Арктического климатологического фронта (рис. 28 из монографии [Матвеев и Сераев, 1997]) оказывается расположенным точно под магнитосферным каспом (рис. 4), на котором происходят интенсивные процессы, способствующие захвату и проникновению энергичных частиц и их возможному влиянию на Арктический фронт.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подтверждается синоптическая связь между секторной структурой солнечного и межпланетного полей с одной стороны, и секторной структурой приземного атмосферного давления с другой, в период аномальной антициклонической погоды лета 2010 г.

2. Показано, что такая связь наблюдалась в условиях низкой солнечной активности при суперпозиции минимумов 22- и 180-летнего циклов.

3. Посекторный анализ солнечно-земных связей в последовательности секторов июня–сентября 2010 г. показал, что динамика атмосферного давления в Москве, Риме и на Юнгфрау качественно соответствовала предположениям о модуляции электрического поля Земли явлениями солнечной активности.

Благодарим сотрудников WSO – за данные о магнитном поле Солнца, группу CDA Web, J.H. King'a,

N. Papatashvili, R. Gold'a — за данные околоземных ИСЗ, сотрудников центра данных в Потсдаме — за данные об a_p -индексах, А.И. Завойкину — за помощь в подготовке статьи.

Работа частично поддержана Программой Фундаментальных Исследований Президиума РАН VI.15 “Плазменные Процессы в Солнечной системе”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильева Г.Я., Фёдоров П.Н. К обоснованию принципа долгосрочного прогнозирования по переменной гелиоэффективности планет // Phys. Solar Intergr. Potsdam. № 17. P. 57–70. 1981.
- Васильева Г.Я., Кузнецов Д.А., Шпитальная А.А., Петрова Н.С. Движение планет и солнечная активность // Солнечные Данные. № 8. С. 106–115. 1972а.
- Васильева Г.Я., Кузнецов В.А., Шпитальная А.А. К вопросу о влиянии галактических факторов на солнечную активность // Солнечные Данные. № 2. С. 99–106. 1972б.
- Васильева Г.Я., Шпитальная А.А., Пыстина Н.С. Солнечная активность и структура межпланетной среды // Солнечные Данные. № 2. С. 76–84. 1975.
- Васильева Г.Я., Нестеров М.М., Черных Ю.В. О процессе генерации магнитного поля на Солнце при изменении динамических параметров Солнечной системы // Иоганн Кеплер: Сб. № 2. СПбФ ИИЕТ РАН, СПб: Борей Арт. С. 127–138. 2002.
- Дмитриев А.А., Малинников В.А., Мансуров С.М. Связь секторной структуры межпланетного магнитного поля с зональной циркуляцией атмосферы // Физика ионосферы и магнитосферы. М.: АН СССР. ИЗМИ РАН. 172 с. 1978.
- Еганова И.А. О проявлении динамики структуры мира в геофизике // Поиск математических закономерностей мироздания. Новосибирск; Ин-т математики РАН. Т. 2. С. 90–100. 2004.
- Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли // Оптика атмосферы и океана. Т. 18. № 12. С. 1042–1050. 2005.
- Иванов К.Г. Микерина Н.В. Вариации параметров солнечного ветра, геомагнитная активность, электроны хвоста магнитосферы и внешней радиационной зоны // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 12. № 4. С. 688–692. 1972.
- Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. Динамика открытого магнитного поля Солнца и ее особенности в зоне активных долгот // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 6. С. 723–733. 2004.
- Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. Солнечно-земные бури октября 2003 г. 2. Пятифазная динамика бури 28–30 октября // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 6. С. 831–847. 2007.
- Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. МГД-природа возникновения, динамики, геоэффективности и исчезновения четырехсекторной структуры геомагнитного поля Солнца на фазе спада 23-го цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 3. С. 291–307. 2009.
- Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. Динамика солнечной активности и аномальной погоды лета 2010 г. 1. Секторные границы: становление и разрушение антициклона // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 4. С. 1–6. 2011.
- Мансуров С.М., Мансурова Л.С., Мансуров Г.С. Связь между секторной структурой ММП и атмосферным давлением в сопряженных точках и ее статистический анализ // Солнечно-земная связь в теории климата и прогнозах погоды. Л.: Гидрометиздат. С. 259–270. 1974.
- Матвеев Н.П., Сераев Н.А. Воздушная оболочка Земли. М.: Изд-во ПГУ. 348 с. 1997.
- Петрова Н.С., Шпитальная А.А., Васильева Г.Я. Сопоставление пространственно-временного положения центра масс Солнечной системы относительно центра Солнца с солнечной активностью // Солнечные Данные. № 12. С. 89–99. 1978.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы, метеопараметрии и климат // УФН. Т. 163. № 7. С. 113–116. 1993.
- Савин С.П. Экспериментальное исследование нелинейных взаимодействий и процессов переноса плазмы в критических областях на границе магнитосферы // Автореферат диссертации д. ф.-м. н. ИКИ РАН. 378 с. 2005.
- Сытинский А.Д. Боков В.Н., Оборин Д.А. Зависимость циркуляции атмосферы Земли от процессов на Солнце и в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 1. С. 136–142. 2003.
- Харшиладзе А.Ф., Иванов К.Г. Сферический гармонический анализ магнитного поля Солнца // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 34. № 4. С. 22–28. 1994.
- Burns G.B., Bond F.R., Cole K.D. An investigation of the southern hemisphere vorticity response to solar boundary crossings // J. Atmos. Terr. Phys. V. 42. P. 765–769. 1980.
- Dole R., Hoerling M., Perlwitz J. et al. Was there basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? // Geophys. Res. Lett. V. 38. L06702. doi: 10.1029/2010GL046582. 2011.
- Matsueda M. Predictability of Euro-Russian blocking in summer of 2010 // Geophys. Res. Lett. V. 38. L06801. doi: 10.1029/2010 CL046557. 2011.
- Wilcox J.M. Tropospheric circulation and interplanetary boundaries followed by MeV proton streams // Nature. V. 259. № 5707. P. 840–842. 1979.
- Wilcox J.M., Svalgaard I., Scherrer P.H. Seasonal variation and magnitude of the solar sector structure atmospheric vorticity effect // Nature. V. 255. № 5509. P. 539–540. 1974.