



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему «Анализ одновременной изменчивости земной и космической
погоды в районе г. Омска»

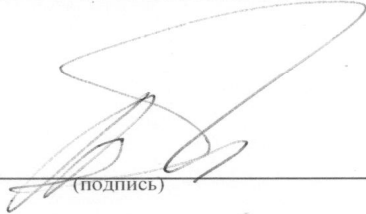
Исполнитель Ахмадиев Руслан Шаукатович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Головина Елена Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

Консультант Ступишина Ольга Михайловна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Абанников Виктор Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«04» 03 2019 г.

Санкт-Петербург
2019

СОДЕРЖАНИЕ

Сокращения.....	1
Введение.....	2
Глава 1. Солнце и космическая погода.....	3
1.1. Солнце и его атмосфера.....	3
1.1.1. Солнечная активность.....	8
1.1.2. Особенности 23-го и 24-го циклов солнечной активности.....	11
1.1.3. Солнечный ветер.....	14
1.1.4. Солнечные и галактические космические лучи.....	17
1.2. Околоземное космическое пространство.....	20
1.2.1. Магнитосфера и ионизация.....	20
1.2.2. Радиационные пояса Земли.....	25
1.2.3. Магнитные бури и ионосферные возмущения.....	26
1.2.4. Глобальная атмосферно-электрическая цепь как связующее звено процессов космической погоды и погоды нижней атмосферы.....	29
Глава 2. Характер циркуляции атмосферы на западе СФО.....	32
2.1. Главные закономерности атмосферной циркуляции.....	32
2.1.1. Классификация форм атмосферной циркуляции по В.Я. Вангенгейму.....	35
2.1.2. Классификация форм атмосферной циркуляции по Б.Л. Дзердзеевскому.....	39
2.2. Особенности циркуляции в начале XXI века.....	40
2.3. Климатические характеристики и специфика погоды в Омской области	44
Глава 3. Результаты исследования одновременной изменчивости характеристик космической погоды и циркуляции атмосферы в районе г. Омска.....	48

3.1. Методика исследования.....	48
3.2. Используемые в работе данные.....	52
3.3. Результаты исследования одновременной изменчивости атмосферной циркуляции и космической погоды в районе г. Омска.....	57
Заключение.....	74
Список литературы.....	75

Сокращения

СА–	солнечная активность
ГКЛ –	галактические космические лучи
СКЛ –	солнечные космические лучи
АО –	активные области
СЦ –	солнечный цикл
CMEs –	корональные выбросы массы
ICMEs –	межпланетные плазменные облака
ММП –	межгалактическое межпланетное поле
ОКП –	околоземное пространство
КЛ –	космические лучи
ГЭЦ –	глобальная электрическая цепь
МБ –	магнитная буря
ММКС –	мезомасштабные конвективные системы
ЭСП –	элементарный синоптический процессами
ЭЦМ –	элементарный циркуляционный механизм
ЦЧО –	центрально-черноземные области
ЕТР –	европейская территория России
ЦА –	циркуляция атмосферы
СФО –	Сибирский федеральный округ
ОЯП –	опасные явления погоды
КМЯ –	комплексное метеорологическое явление
МГП –	малоградиентное поле
КП –	космическая погода
БО –	барическое образование
ГМП –	геомагнитное поле
ГП –	градиентное поле
МГП ВД –	малоградиентное поле высокого давления
МГП НД –	малоградиентное поле низкого давления
ЛО поле –	ложбинообразное поле

Введение

Атмосферная циркуляция является одним из факторов изменения климата. Изменчивость атмосферной циркуляции является причиной изменения атмосферного давления, ветра, температуры воздуха и влажности в различных регионах Земли и во многом определяют вид и интенсивность хозяйственной деятельности населения. Поэтому одной из основных задач метеорологов является своевременный прогноз синоптической ситуации в конкретных регионах. В последнее время появляются научные работы, отражающие результаты исследования солнечно-земные связи, в частности, результаты исследования возможности влияния космической погоды на состояние нижней атмосферы.

Одной из интересных и важных задач физики атмосферы является исследование одновременной изменчивости характеристик космической и земной погоды при формировании различных видов барических образований. В своей работе характеристики космической и земной погоды я рассматриваю, как параметры природной среды и объединяю в единый комплекс параметры солнечной активности, околоземного космического пространства, геомагнитного поля и характеристики состояния атмосферы.

Целью нашей работы является исследование одновременной изменчивости параметров природной среды (космической и земной погоды) при формировании циркуляции атмосферы различной степени устойчивости в окрестностях г.Омска.

Для выполнения работы необходимо было решить следующие задачи:

- Формирование базы данных параметров космической и земной погоды вместе с базой одновременной синоптической информации;
- Статистическая обработка характеристик параметров космической и земной погоды;
- Выполнить расчеты и проанализировать их результаты, используя комплекс программ в среде «Statisica» для Windows, разработанную

Ступишиной О.М. в лаборатории метеорологического факультета “Погода и человек”.

В работе была использована следующая информация за периоды 2006-07 гг, 2017-18 гг.:

- Данные по приземному барическому полю и метеорологической информации получены из архива “Обь-Иртышского” управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.
- Данные по солнечной активности и вариациям ГМП были предоставлены всемирным центром NOAA в Боулдере (шт. Колорадо, США) (www.swpc.noaa.gov/today.html).

Глава 1. Космическая погода

1.1 Солнце и его атмосфера

Ближайшая к нам звезда Солнце является явным представителем звезд, находящихся в середине своей эволюции. Среднее расстояние от Земли до Солнца составляет $1,496 \cdot 10^{13}$ см, свет проходит этот путь за 498 с. Солнце имеет форму шара с весьма незначительной сплюснутостью к полюсам, равной 35 км. Масса Солнца составляет $1,99 \cdot 10^{33}$ г (в 332 448 раз превосходит массу Земли), средняя плотность его равна $1,41$ г/см³. Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца составляет $2,74 \cdot 10^4$ см/с². Солнце является медленно вращающейся звездой. Скорость его вращения на экваторе около 2 км/с, тогда как у быстро вращающихся звезд она порядка 100–200 км/с.

Для центра Солнца характерны следующие значения температуры, плотности и давления: $T_C = 13,6 \cdot 10^6$ К, $\rho_C = 98$ г/см³, $P_C = 2,0 \cdot 10^{17}$ дин/см². Столь высокая температура обеспечивает возникновение термоядерных реакций. От центра к поверхности температура понижается почти на три порядка, плотность — на семь, а давление — на девять порядков. На рис. 1.1 показана внутренняя структура Солнца.

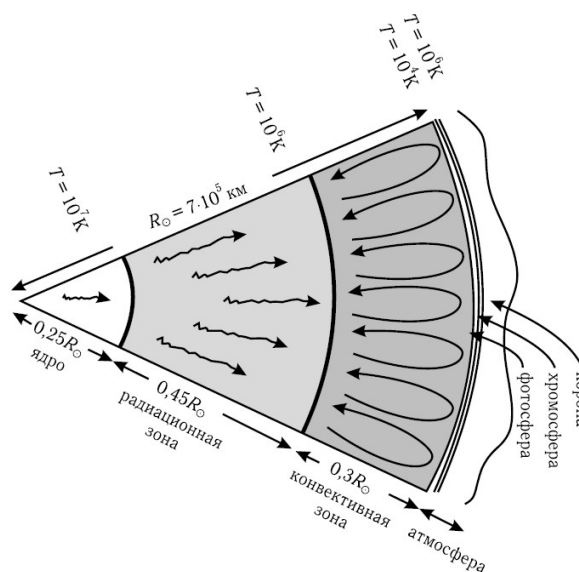


Рис. 1.1. Разрез внутренней структуры Солнца

Перенос энергии из недр Солнца к его видимой поверхности (фотосфере) до расстояния 0,8–0,9 солнечного радиуса происходит путем лучеиспускания. Ближе к поверхности, приблизительно до глубины 60–100 тыс. км, простирается его конвективная оболочка, перенос энергии в которой производится преимущественно конвективными потоками крупного масштаба. Фотосфера считается видимой поверхностью Солнца, вследствие ее небольшой толщины (порядка 400–1000 км). Она является основным источником непрерывного спектра излучения и многочисленных линий поглощения (фраунгоферовых линий). Последние образуются в результате поглощения и переизлучения в верхней части фотосферы, где температура понижается до 4000–5000K [1, 2]. Наблюдения показывают, что яркость фотосферы неоднородна и характеризуется гранулами, равномерно распределенными по солнечному диску. Вероятно, они связаны с сильными конвективными процессами, происходящими в фотосфере и непосредственно под ней.

В фотосфере часто наблюдаются спонтанные явления, такие как пятна и факелы, которые обуславливают изменения солнечного излучения в области коротких длин волн. Солнечные пятна представляют собой относительно темные области с температурой порядка 3000K и размером не более 50 000 км. Пятна обычно группируются в определенных местах солнечного диска, называемых активными областями. Пятна живут от нескольких суток до нескольких месяцев. Факелы представляют собой яркие образования, обычно также связанные с активными областями, по крайней мере на средних и низких широтах, но могут появляться в высоких широтах независимо от активных областей. Наблюдаются регулярные вариации появления активных областей с периодом около 11 лет, который называется солнечным циклом [1, 2].

Выше видимой солнечной поверхности располагается прозрачный для непрерывного спектра Солнца слой, называемый хромосферой, в котором возникают линии излучения (H, He, Ca) и происходит инверсия температуры. Хромосфера характеризуется крайне неоднородной волокнистой структурой,

быстро меняющейся во времени и простирающейся на расстояние 5–10 тыс.км. Температура ее — до 50 000K [3].

Самый внешний и наиболее разреженный слой атмосферы Солнца — солнечная корона. Именно из этого слоя, а также из верхней хромосферы в основном исходит рентгеновское и радиоизлучение Солнца. Солнечная корона является также источником линий излучения высокоионизованных атомов Fe, Ni, Ca. Корона наблюдается на расстоянии до 10^6 км и не имеет четкой границы. На орбите Земли ее температура составляет приблизительно $3 \cdot 10^5$ К [3]. Типичные изображения Солнца при наблюдениях показаны на рис.1.2.

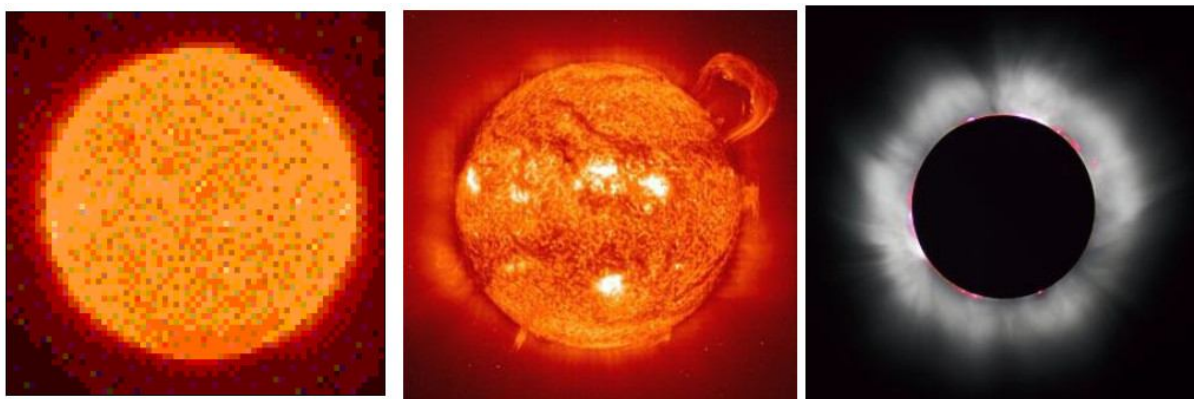


Рис.1.2. Изображения Солнца при наблюдениях:

1) в период малой активности (слева), где хорошо видны солнечные гранулы; 2) активных процессов в его атмосфере (в центре), где отчетливо проявилась его неоднородная структура, вспышки, протуберанцы и т.п.; 3) солнечного затмения (справа), где отчетливо видна корона.

Для активных областей верхнего слоя Солнца характерны хромосферные флоккулы, протуберанцы, солнечные вспышки и усиления корональных эмиссий. Флоккулы представляют собой яркие области в хромосфере, которые чаще всего наблюдаются в интенсивной линии К кальция. Они обычно предшествуют появлению солнечных пятен и наблюдаются после их исчезновения. Спикулы представляют собой протуберанцы, всегда существующие в верхних слоях хромосферы. Время их жизни составляет всего лишь несколько минут. Протуберанцами называются большие достаточно

стабильные облака яркого газа в верхней части и несколько выше хромосферы. Солнечные вспышки — это интенсивные эруптивные явления, происходящие в активных областях хромосферы. Они сопровождаются быстрым увеличением яркости активной области и сильным увеличением интенсивности ионизирующего излучения (УФ- и рентгеновского). Вспышки длятся от нескольких минут до часа и делятся на три класса, которые определяют их влияние на земную атмосферу. Наиболее интенсивные вспышки сопровождаются выбросом большого количества энергичных частиц (протонов, альфа-частиц, электронов).

Солнце является также источником радиоволн. Интенсивность солнечного радиоизлучения меняется в течение солнечного цикла. Кроме того, она увеличивается (радиовсплески) во время активных явлений в хромосфере или короне [1, 2].

Количество энергии, излучаемой Солнцем за 1 с, т.е. его светимость, составляет $3,9 \cdot 10^{33}$ эрг/с. Солнечная постоянная (количество энергии, получаемой площадью в 1 см^2 , которая расположена перпендикулярно солнечным лучам на расстоянии среднего радиуса земной орбиты, за 1 мин) составляет $1,46 \text{ кал/см}^2 \text{ мин}$ или $1,367 \text{ кВт/м}^2$ [1], что соответствует эффективной температуре Солнца 5780 К . Около половины этой энергии доходит до поверхности Земли. Если предположить, что Солнце излучает энергию как абсолютно черное тело, его эффективная температура равна $\sim 6000 \text{ К}$.

Солнечная плазма как в атмосфере, так и в недрах Солнца имеет достаточно высокую ионизацию (значительную). Вместе с тем она находится в особых условиях, поскольку Солнце обладает магнитными полями. Взаимодействие магнитных полей с движениями солнечной плазмы обуславливает возникновение в атмосфере Солнца различных явлений, которые в комплексе называются солнечной активностью [2]. По мнению авторов монографии [2], основа солнечной переменности лежит не в изменении числа

солнечных пятен, вспышек, протуберанцев, других активных образований и даже не в изменении коротковолнового, радио- или корпускулярного излучения, а во временной эволюции магнитного поля Солнца. Еще в начале XX в. было установлено, что магнитные поля ведущих пятен в группах изменяют свою полярность при переходе от одного 11-летнего цикла к другому. 22-летний магнитный цикл проявляется в изменении со временем как напряженности интегрального магнитного поля, обусловленного активными областями вблизи экватора и полярными областями, так и его полярности. В этом смысле Солнце следует рассматривать как магнитно-переменную звезду.

Магнитное поле Солнца имеет весьма сложное строение. Оно состоит из двух компонентов: полоидального поля, вытянутого вдоль меридианов Солнца и расположенного вблизи полюсов до широты $\pm 55^\circ$, и тороидального поля, вытянутого преимущественно вдоль параллелей и находящегося в приэкваториальных зонах. Полоидальное поле значительно слабее тороидального. Взаимодействие между собой этих двух составляющих приводит к последовательному возникновению тороидального поля из полоидального, и наоборот, и чередованию полярностей [2]. Временами общее магнитное поле Солнца может быть очень малым.

1.1.1 Солнечная активность

К явлениям и проблемам солнечной активности в [4] отнесены:

- 1) солнечные пятна (частота их появления, распределение по диску Солнца, строение и история их жизни);
- 2) фотосферные и хромосферные явления, связанные с пятнами: тонкая структура хромосферы, факелы, хромосферные вспышки, их излучение в далекой УФ-области спектра, включая рентгеновские лучи, и в области радиочастот, а также выброс корпускул, включая космические лучи);

3) протуберанцы, которые по положению и свойствам занимают промежуточное место между хромосферой и короной и которые нельзя считать только продуктом или явлением, сопровождающим солнечные пятна;

4) возмущения в короне над солнечными пятнами, по-видимому, связанные как с протуберанцами, так и с солнечными пятнами.

Для количественной характеристики различных происходящих на Солнце изменений применяются различные индексы солнечной активности. Первым индексом солнечной активности было число солнечных пятен на видимом диске Солнца, которое позволило открыть 11-летний цикл солнечной активности. Позднее он был заменен относительным числом солнечных пятен, или числом Вольфа [5], определяемым формулой

$$W = k \times (10g + f),$$

где g — число групп пятен на видимом диске, f — число пятен во всех группах.

Рост чисел Вольфа и других индексов к максимуму активности обычно происходит быстрее спада от максимума к минимуму. Первые солнечные пятна нового цикла образуются на сравнительно высоких широтах. Средняя широта образования пятен уменьшается в течение цикла до тех пор, пока пятна не оказываются в конце цикла вблизи экватора [6]. Период этих циклических вариаций составляет приблизительно 11 лет. Магнитные полярности головного и хвостового солнечных пятен в каждом полушарии Солнца меняют свой знак на противоположный при переходе от одного цикла к другому. Таким образом, магнитная активность обнаруживает 22-летнюю повторяемость, называемую циклом Хейла [7].

Для выявления циклических закономерностей чаще используют более надежные, чем ежедневные, среднемесячные числа Вольфа. Кроме 11–22-летнего циклов пятен существует и «вековой» (80–90-летний) цикл.

Вариации, аналогичные 11-летним вариациям солнечных пятен, проявляются также в числе и суммарной площади факельных площадок, солнечных вспышек, протуберанцев (или волокон), корональных конденсаций, необычных явлений в радиодиапазоне длин волн [2].

Среднемесячная полная площадь всех солнечных пятен на видимом полушарии Солнца A в любой заданный момент времени коррелирует с числом солнечных пятен W :

$$A = 16,7W.$$

Плотность потока радиоизлучения на длине волны 10,7 см тесно связана с числами Вольфа. Частота появления солнечных вспышек связана эмпирической зависимостью с числом солнечных пятен [8]:

$$N_f = \alpha(\overline{W} - 10),$$

где N_f — число вспышек за один оборот Солнца (27 сут), W — среднее число солнечных пятен, α — константа ($\sim 1,5-2$).

Следует отметить, что 11-летний период не соответствует ни одному из естественных характерных времен: динамическому (5 мин — 1 час), тепловому ($\sim 10^7$ лет), периоду обращения (~ 27 сут), конвекции (несколько минут — несколько недель), диффузии (10^{13} лет) и др. Происхождение этого периода остается неизвестным. Что касается 27-дневных вариаций, то они явно связаны с вращением Солнца и повторным появлением на видимом диске достаточно долгоживущих активных областей. Амплитуда их растет с общим ростом активности в 11-летнем цикле. Однако в периоды, когда большое число активных областей равномерно распределено по солнечному диску, средняя УФ-радиация повышена, но 27-дневная вариация будет малой.

Все перечисленные выше характеристики можно считать индексами солнечной активности.

Солнечная (хромосферная) вспышка представляет собой внезапное увеличение яркости небольшой области поверхности Солнца, продолжающееся от нескольких минут до нескольких часов. С солнечными вспышками тесно связаны возмущения верхней атмосферы Земли, поскольку энергия, выделяемая за время вспышки, достигает 10^{32} эрг. Три вида солнечного излучения особенно влияют на процессы в верхней атмосфере и приводят к возникновению различного вида явлений (табл. 1.1) [3].

Излучение	Время распространения до Земли	Явления на Земле
Рентгеновское	8,3 мин	Внезапные ионосферные возмущения
Протоны с энергией 1–100 МэВ	Несколько часов	Поглощение в полярной шапке
Низкоэнергичная плазма (скорость ~1000 км/с)	1–2 сут	Магнитные бури и полярные сияния

Таблица 1.1. Характеристики различных типов солнечного излучения

1.1.2 Особенности 23-го и 24-го циклов солнечной активности

Точка минимума 22 цикла активности на Солнце зафиксирована в мае 1996 года. Первые события после окончания эпохи минимума обещали, что цикл будет большим (150-160 единиц чисел Вольфа по прогнозам). В сентябре 1997 года на диске Солнца появились две значительные по площади группы пятен, определившие первоначальную крутизну ветви роста 23-го цикла. К концу 1997 года можно было предполагать, что текущий цикл будет высоким (чем больше максимальное число солнечных пятен в этом цикле, тем короче ветвь его роста - правило Вальдмайера). Тем не менее в конце 1998 года солнечная активность вдруг резко упала и оставалась на сравнительно низком уровне почти полгода, так что возникло впечатление, что эта флуктуация уже предшествует завершению ветви роста, и цикл может быть нестандартным, с

короткой ветвью роста, но невысоким. Последующий рост активности в 1999 году скомпенсировал отрицательную флуктуацию, и только затем мы непосредственно приблизились к эпохе максимума 23-го цикла (рис. 1.3.). Основным максимум 23-го 11-летнего цикла солнечной активности наступил в апреле 2000 года, вторичный максимум – в ноябре 2001 года. Понятие вторичного максимума (максимум Гневышева) ввел Мстислав Николаевич Гневышев. Как правило, профиль солнечной активности имеет один или несколько вторичных максимумов, вторичный максимум наблюдается только в приэкваториальном районе. Перестройка генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца, наиболее вероятно начавшаяся на ветви спада 22 солнечного цикла, привела к значительному и очень длительному ослаблению магнитных полей в тенях солнечных пятен [9] и общего магнитного поля Солнца, что и обеспечило необычные свойства фазы минимума между 23 – 24 солнечными циклами. Фаза минимума, начавшаяся в мае 2005 г., продлилась до декабря 2010 г., захватив первые 24 месяца развития текущего 24 цикла солнечной активности [10]. Основные фазы развития 23-го солнечного цикла, такие как фаза роста, фаза максимума, фаза спада отчетливо проявляются при самостоятельном рассмотрении активности северного и южного полушария.

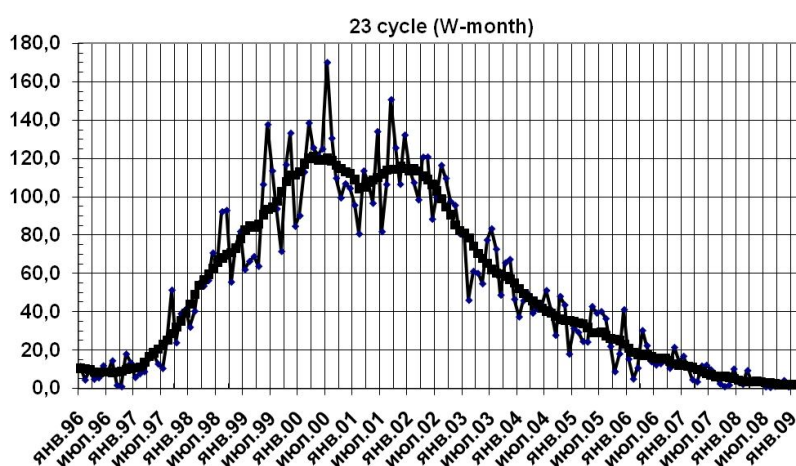


Рис. 1.3. 23-й цикл солнечной активности на основе среднемесячных чисел Вольфа и его сглаженных значений

Было установлено, что 24 текущий солнечный цикл (СЦ) приходится на фазу спада векового и 200-летнего циклов. Это факт подразумевает то, что уровень активности Солнца будет невысок в недалёком будущем [11].

Начало фазы минимума текущего 24 солнечного цикла формально можно считать с апреля 2016 г. Фаза максимума составила период с августа 2013 по ноябрь 2014 г. Это самая короткая (16 мес.) фаза максимума на достоверном ряде чисел Вольфа. Текущий СЦ развивается как цикл низкой величины с характерными отличиями:

- ветвь роста СЦ стала рекордной по продолжительности (54 мес.);
- средняя максимальная величина магнитного поля в тенях пятен, которая отражает значимость уменьшения среднего магнитного поля Солнца, заметно снизилась. Она вышла на характерный уровень для эпохи «пониженной» СА (~2200 Гс, что на ~600 Гс меньше, чем в начале 23 СЦ);
- активность в диапазоне основных вспышек находится на самом низком уровне за всю историю наблюдений за Солнцем;
- режим всплытия и взаимодействия новых магнитных потоков с уже существующим магнитным полем Солнца заметно поменялся, хотя основные закономерности появления больших вспышечных событий сохраняются. Время между наблюдением всплытия нового магнитного потока и началом периода осуществления крупных вспышек в выделенной активной области заметно снизилось.

Некоторые особенности развития последних трёх солнечных циклов СА и картина развития типичных для данного цикла активных областей подтверждают произошедшую смену режима генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца [12]. В результате количество АО уменьшится, что повлечет за собой рост количества корональных дыр. Такое изменение конфигурации структур на поверхности Солнца приведет к росту рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра, которые в свою очередь создадут условия для относительного роста числа рекуррентных малых геомагнитных

возмущений в ОКП. Параллельное значительное уменьшение числа событий в АО вспышечного типа приведет к снижению количества более сильных спорадических возмущений в геомагнитном поле. Такое снижение естественно создаст предпосылки к росту периодов спокойных геомагнитных условий. Ослабленный режим выноса магнитных полей Солнца привел к падению зоны модуляции ГКЛ в межпланетном пространстве и существенному росту их интенсивности в ОКП. Это вызвал рост радиационного фона на всем протяжении солнечного цикла, а не только в эпоху минимума.

Таким образом, в настоящем 24 цикле солнечной активности, наша звезда вошла во 2 эпоху «пониженной» СА. Эта эпоха, если учесть устойчивый характер достоверного ряда солнечных пятен, должна продлиться 5 солнечных циклов (около 55 лет). В эту эпоху вероятность появления высоких СЦ остается низкой. На данной статистике, внутри эпох, всегда выполнялось правило Гневышева-Оля. Поэтому предполагается, что следующий цикл СА будет средней величины. Такие низкие значения среднего магнитного поля Солнца в современную эпоху вызвали значимое падение величины ММП. Это привело к существенному росту (примерно на 20%) фоновых потоков галактических космических лучей в межпланетном пространстве (если сравнивать с максимальными значениями эпохи «повышенной» СА с 1944 по 1996 гг. [13].

1.1.2 Солнечный ветер

Солнечный ветер [14] представляет собой постоянный радиальный поток плазмы солнечной короны в межпланетное пространство. Поток энергии из недр Солнца нагревает плазму короны до $1,5\text{--}2 \cdot 10^6$ К. Постоянный нагрев не уравнивается потерей энергии за счет излучения, так как плотность короны мала. Избыточную энергию в значительной степени уносят частицы солнечного ветра ($\sim 10^{27} - 10^{29}$ эрг/с). Корона таким образом не находится в гидростатическом равновесии, она непрерывно расширяется. По составу солнечный ветер не отличается от плазмы короны и содержит главным образом

протоны, электроны, немного ядер гелия, ионов кислорода, кремния, серы, железа. У основания короны (в ~ 10000 км от фотосферы) частицы солнечного ветра имеют радиальную скорость порядка сотен метров в секунду, на расстоянии нескольких солнечных радиусов она достигает скорости звука в плазме (100–150 км/с), у орбиты Земли скорость протонов уже 300–750 км/с, а их концентрация — от нескольких частиц до нескольких десятков частиц в кубическом сантиметре.

Солнечный ветер уносит с собой петли силовых линий солнечного магнитного поля, которые образуют межпланетное магнитное поле. Сочетание радиального движения с вращением Солнца придает этим линиям форму спиралей. Крупномасштабная структура магнитного поля в окрестностях Солнца имеет вид секторов, в которых поле направлено от Солнца или к нему (рис. 1.4) [14]. В окрестностях Земли столкновение потока частиц солнечного ветра с геомагнитным полем порождает стационарную ударную волну перед земной магнитосферой. За год Солнце теряет с солнечным ветром $\sim 2 \cdot 10^{-14}$ часть своей массы. Изменения интенсивности солнечного ветра, связанные со вспышками на Солнце, являются основной причиной возмущений геомагнитного поля и магнитосферы (магнитных бурь) [14]. В плазме солнечного ветра на орбите Земли содержится около 10 частиц в 1 см^3 , а средняя скорость потока составляет около 350 км/с. Электронная температура в ветре $\sim 1,5 \cdot 10^5$ К, протонная в 3–4 раза ниже. Параметры ветра группируются в два кластера, соответствующих двум типам солнечного ветра — медленного с характеристиками, близкими к приведенным, и быстрого со скоростями 400–800 км/с, но с пониженной плотностью $\sim 3 \text{ см}^{-3}$. Температура электронов в

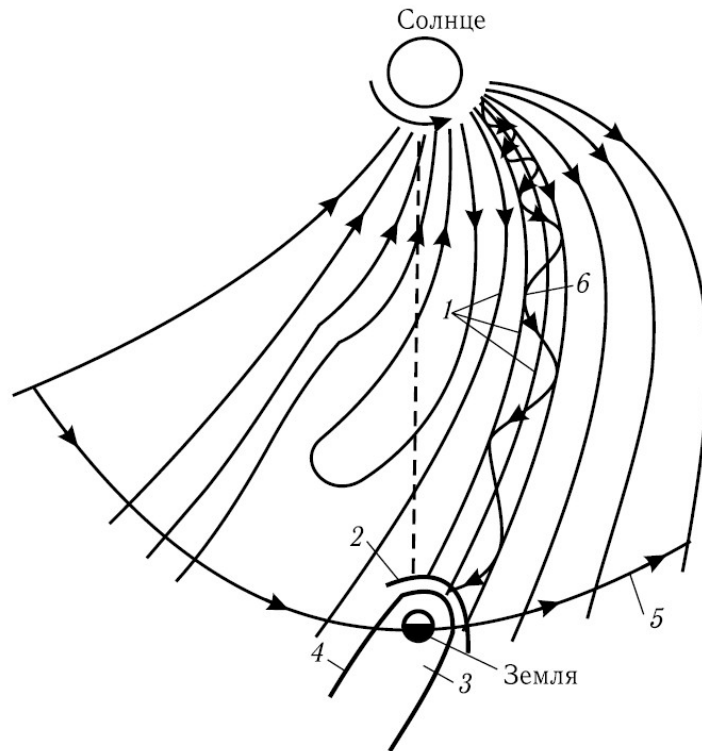


Рис. 1.4. Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли [12]

1 — силовые линии магнитного поля Солнца; 2 —ударная волна; 3 — магнитосфера Земли; 4 — граница магнитосферы; 5 — орбита Земли; 6 — траектория частицы солнечного ветра

быстром ветре примерно такая же, как и в медленном, а протонов — в 5–7 раз больше. Быстрый ветер — атрибут спокойного Солнца. Он возникает в той части короны, где силовые линии магнитного поля с поверхности уходят в межпланетное пространство («открытое» поле). Медленный ветер образуется над областями закрытого магнитного поля, силовые линии которого обоими концами закреплены в фотосфере. Кроме протонов и электронов, доминирующих в составе ветра, в нем присутствуют и более тяжелые частицы.

1.1.3 Солнечные и галактические космические лучи

Кроме электромагнитного излучения и потоков плазмы с «вмороженным» магнитным полем, идущих из атмосферы Солнца, неотъемлемым связующим звеном солнечно-земных взаимодействий являются энергичные частицы.

Образование таких частиц происходит прежде всего в результате очень мощных (взрывных) процессов в короне - вспышки в АО и CMEs, которые, кроме того, порождают повышенные потоки жёсткого электромагнитного излучения (гамма-, рентгеновского и ультрафиолетового диапазона), ICMEs, ударные волны и высокоскоростные потоки плазмы в гелиосфере. Это так называемые солнечные космические лучи (рис. 1.5) - частиц высокой энергии (с энергией протонов ≥ 1 МэВ). Потоки СКЛ после мощных солнечных вспышек могут достигать очень больших значений. Однако характерная величина их энергии обычно не превосходит 10^9 - 10^{10} эВ. Тогда как величины энергий галактических космических лучей достигают 10^{19} - 10^{20} эВ. Поэтому разделение космических лучей на галактические и солнечные имеет смысл, поскольку как характеристики, так и источники СКЛ и ГКЛ, совершенно различны [15, 16].

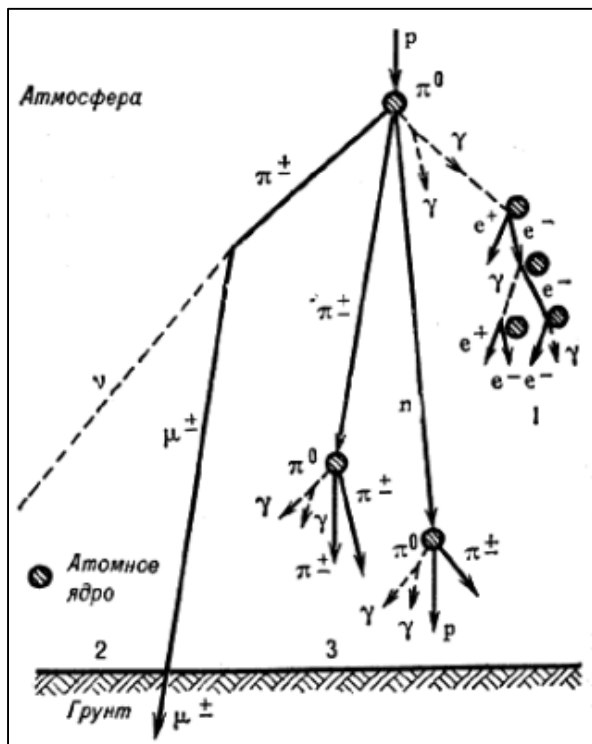


Рис. 1.5. Схема взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли. Первичное ядро высокой энергии p (обычно протон) разрушает ядра атмосферного азота или кислорода и порождает каскад вторичных частиц, поток которых условно разделяют на три компонента: электронно-фотонный (1), мю-мезонный (2) и нуклонный (3)

Галактические космические лучи (приходящие извне Солнечной системы) состоят из протонов, ядер элементов и электронов с энергиями от $\sim 10^8$ до 10^{20} эВ. Основные их составляющие — протоны (93,6%) и альфа-частицы (6,3%). Остающиеся 0,14% включают все другие элементы. Измеренные интенсивности электронов с энергиями более 100 МэВ по крайней мере на порядок величины меньше, чем у протонов. Отношение числа позитронов к числу электронов равно одному-двум. Расстояние, проходимое галактическими космическими лучами (ГКЛ) в межзвездной среде, соответствует ~ 3 г/см², время жизни ГКЛ $\sim 3 \cdot 10^7$ лет. В интервале энергий от 10^{10} до 10^{15} эВ интегральный спектр всех частиц ГКЛ описывается степенной функцией $E^{-\gamma}$ с постоянным показателем степени $\gamma \approx 1,7$ (E — полная энергия). Однако на энергиях, меньших $E \sim 10^{10}$ эВ, рост замедляется и практически совсем прекращается при $E \leq 10^9$ эВ (спектр становится плоским). Это значит, что в ГКЛ почти нет частиц очень малых энергий (рис. 1.6). При больших энергиях в интервале 10^{15} – 10^{17} эВ падение интенсивности происходит быстрее с $\gamma \approx 2,2$. Излом в спектре исчезает при самых высоких энергиях [17]. Энергетическое

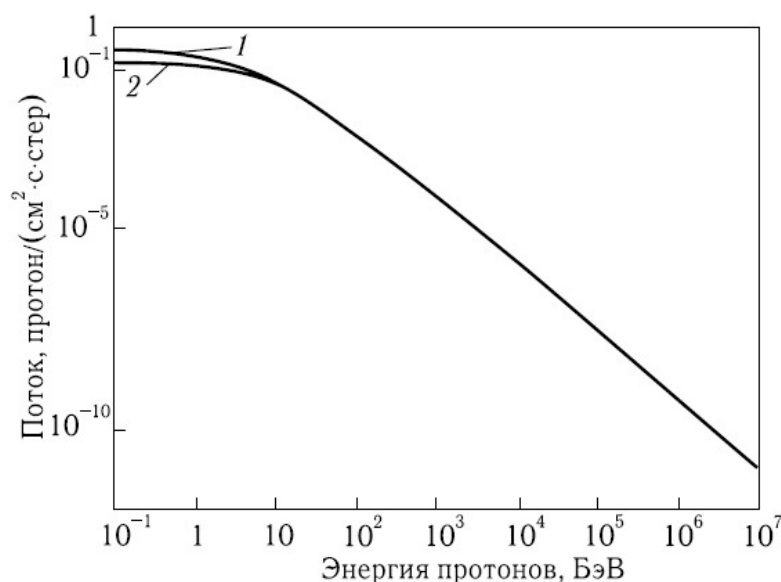


Рис. 1.6. Интегральный энергетический спектр космических лучей в минимуме (1) и максимуме (2) цикла солнечных пятен [18]

распределение ядер подобно распределению протонов. Наблюдаются вариации ГКЛ с циклом солнечных пятен для энергий, меньших ~ 5 БэВ. Измеренная величина потока частиц с энергией свыше 40 МэВ около максимума солнечных пятен составляет приблизительно $0,2$ частиц/см²с·стер. Эту величину надо увеличить примерно в 2,5 раза для минимума солнечных пятен. Плотность энергии ГКЛ составляет $\sim 10^{-12}$ эрг/см³ $\approx 0,6$ эВ/см³. Помимо ядерных взаимодействий ГКЛ с атмосферными составляющими происходит ионизация нижней мезосферы, стратосферы и тропосферы. ГКЛ — основной источник ионов в этих областях. Скорость ионообразования по мере проникновения в атмосферу растет экспоненциально, т.е. пропорционально плотности атмосферы, и достигает максимума на высотах 10–15 км. Поскольку частицы ГКЛ заряжены, их траектории искривляются магнитным полем Земли и низкоэнергичные частицы не достигают поверхности Земли на низких геомагнитных широтах (геомагнитное обрезание). Ограничивающим фактором служит так называемая жесткость: отношение импульса частицы к ее заряду (импульс обычно выражается в единицах БэВ/с, где с — скорость света). На рис. 1.7 [18] показан минимальный импульс, необходимый для проникновения на заданную геомагнитную широту вертикально падающим протонам и альфа-частицам.

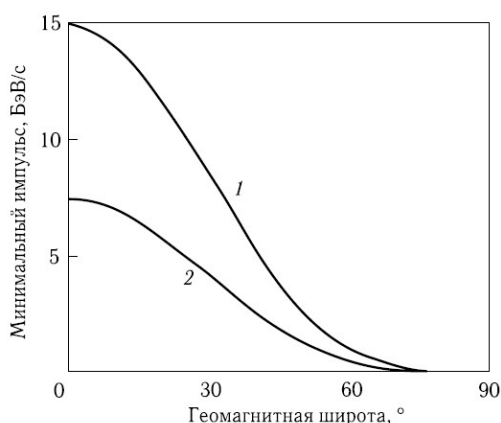


Рис. 1.7. Зависимость геомагнитных пороговых импульсов протонов (1) и альфа-частиц (2), вертикально падающих на Землю, от геомагнитной широты[18]

Вблизи геомагнитного экватора поверхности Земли могут достигать только протоны с импульсом, большим ~ 15 БэВ/с и альфа-частицы с импульсом, большим $\sim 7,5$ БэВ/с. В результате интенсивность ГКЛ на поверхности Земли на экваторе на 10% меньше, чем вблизи полюса. Но широтный эффект сильно увеличивается с высотой. Уже на высоте 6 км он возрастает до 40% [19].

Такая зависимость от солнечной активности объясняется тем, что при высокой активности происходит частичное «выметание» ГКЛ из солнечной системы усилившимся потоком частиц солнечного ветра. Поток ГКЛ и соответствующая скорость образования пар ионов при этом уменьшаются по сравнению со случаем минимума активности.

1.2. Околоземное космическое пространство

1.2.1 Магнитосфера и ионизация

Свойства околоземного космического пространства (ОКП) в значительной мере определяются наличием земного магнитного поля и его взаимодействием с набегающим на Землю солнечным ветром. В результате такого взаимодействия магнитное поле Земли как бы вырезает в потоке солнечного ветра некоторую полость, имеющую со стороны, обращенной к Солнцу, приблизительно полусферическую форму, а с ночной стороны — форму, вытянутую в виде очень длинного цилиндра длиной в сотни тысяч километров. Эта полость, ограничивающая геомагнитное поле конечной областью пространства, получила название «магнитосфера» (рис. 1.8) [2, 3, 20]. С дневной стороны поток плазмы солнечного ветра сжимает геомагнитное поле, искажая его дипольный характер, на ночной стороне силовые линии магнитного поля вытягиваются в так называемый магнитный хвост. Линии геомагнитного поля,

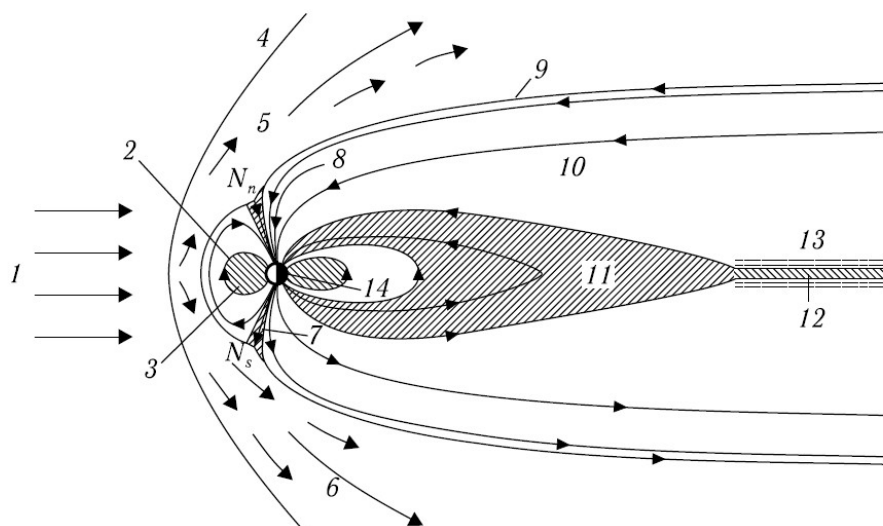


Рис. 1.8. Магнитосфера Земли и ударная волна, образующаяся в сверхзвуковом течении солнечного ветра [8]

Основные области магнитосферы и их граничные поверхности: 1 — сверхзвуковой солнечный ветер; 2 — плазмопауза; 3 — плазмосфера (внутренняя магнитосфера); 4 — ударная волна; 5 — переходная область; 6 — сверхзвуковое течение; 7 — полярный касп; 8 — полярная шапка; 9 — магнитопауза; 10 — геомагнитный хвост; 11 — внутренняя часть плазменного слоя; 12 — нейтральный слой; 13 — удаленный плазменный слой; 14 — Земля.

N_s , N_n — нейтральные точки.

расположенные выше плоскости эклиптики, направлены к Солнцу ниже — от Солнца. Поля противоположных направлений в хвосте разделяет токовый слой. Внутри токового слоя напряженность поля близка к нулю. Здесь давление полей различных направлений уравнивается давлением горячей плазмы, поэтому часто говорят, что противоположно направленные поля в геомагнитном хвосте разделены нейтральным слоем. Давление магнитного поля уравнивается давлением плазмы и вдоль всей границы магнитосферы. Границу магнитосферы при грубом рассмотрении можно считать непрозрачной для солнечного ветра.

Граница магнитосферы — магнитопауза — на дневной стороне проходит на расстоянии $10\text{--}12 R_E$ от Земли в спокойные периоды и на расстоянии $\sim 6,6\text{--}8 R_E$ во время возмущений. Толщина магнитопаузы составляет $100\text{--}200$ км. Хвост магнитосферы имеет вид овального цилиндра, причем в плоскости нейтрального слоя его ширина составляет $\sim 40 R_E$, а в перпендикулярной плоскости — $\sim 60 R_E$. В центральной части ночной стороны хвоста на расстоянии от Земли приблизительно от 8 до $30 R_E$ имеется резервуар энергичных плазменных частиц. Эта область называется «внутренней частью плазменного слоя». Геомагнитные силовые линии в ней еще замкнуты, но вытянуты и имеют каплеобразную конфигурацию. В окружающем нейтральный слой удаленном плазменном слое содержатся электроны и протоны с концентрацией около $0,1\text{--}1 \text{ см}^{-3}$ и энергиями $\sim 100\text{--}500$ эВ (электроны) и $1\text{--}5$ эВ (протоны). Толщина плазменного слоя составляет $4\text{--}6 R_E$ в центре хвоста и $8\text{--}12 R_E$ вблизи утренней и вечерней границ хвоста. Толщина нейтрального слоя имеет порядок $0,1\text{--}1 R_E$.

Сверхзвуковой поток солнечного ветра при обтекании магнитосферы вызывает формирование бесстолкновительной ударной волны. Между ударной волной и лежащей ближе к Земле магнитопаузой находится магнитосферный переходный слой, характеризующийся возрастанием температуры солнечного ветра и изменением напряженности направления магнитного поля, замороженного в плазму солнечного ветра. Солнечный ветер в ударной волне отклоняется таким образом, что начинает обтекать магнитосферу. Его скорость уменьшается с ~ 400 км/с (среднее значение) до ~ 250 км/с, а кинетическая энергия переходит в тепловую, так что температура возрастает до $\sim 10^6$ К, что в несколько раз выше температуры солнечного ветра.

Внутреннюю часть магнитосферы, расположенную в пределах диполеподобного геомагнитного поля (примерно до $3\text{--}4 R_E$) называют также плазмосферой. Концентрация частиц «холодной» плазмы (температура несколько эВ) составляет здесь $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$. Частицы плазмосферы участвуют в

суточном вращении Земли. Внешняя граница плазмосферы называется плазмопаузой.

Во внутренних областях магнитосферы магнитное поле удерживает как в магнитной ловушке потоки быстрых частиц (горячей плазмы) с энергией в сотни и более кэВ. Эти частицы получили название захваченной радиации. Они образуют радиационные пояса Земли. Концентрация частиц во внешней части магнитосферы на 2–3 порядка ниже, чем в плазмосфере; движение частиц плазмы здесь определяется электрическими полями, возбуждаемыми солнечным ветром. Общая картина движения (конвекции) частиц во внешних частях магнитосферы сильно зависит от величины и направления магнитного поля в межпланетной среде.

Все линии геомагнитного поля в магнитосфере можно разделить на два класса: линии, близкие к линиям магнитного диполя, и линии, уходящие в хвост магнитосферы. В пространстве эти два класса линий разделены областями, которые называют полярными овалами (северным и южным).

Проникшие в магнитосферу частицы вызывают полярные сияния. Однако из-за сложности процессов в полярных овалах полярные сияния нельзя рассматривать только как результат прямого прорыва частиц солнечного ветра. Кроме формирующего магнитосферу солнечного ветра временами Солнце выбрасывает энергичные протоны солнечных протонных вспышек. Условия проникновения их в верхнюю атмосферу Земли определяются их взаимодействием с магнитным полем магнитосферы. Достигнув магнитосферы, энергичные протоны, прежде чем войти в атмосферу, должны пройти через внешнее геомагнитное поле. Наиболее доступны для энергичных протонов полярные области, где движение их происходит вдоль магнитных силовых линий. Чтобы достичь экватора, протон на пути к атмосфере должен пересечь магнитные силовые линии. Достаточно энергичные частицы могут это сделать, но в целом экваториальные области для солнечных протонов практически недоступны.

Влетая в атмосферу, энергичный протон теряет энергию в процессе соударений с частицами атмосферы и оставляет за собой ионизированный след. Скорость потери энергии возрастает по мере замедления движения. В диапазоне энергий 10–200 МэВ скорость потерь почти обратно пропорциональна энергии и типичное значение при энергии 100 МэВ составляет 0,8 МэВ на каждый метр траектории при нормальных температуре и давлении воздуха. Можно считать, что вся энергия тратится на образование ионных пар, причем энергия, необходимая для образования одной пары ионов, составляет 35 эВ. Плотность газа вдоль траектории протона, влетающего в атмосферу из космоса, возрастает, так что ионизация происходит в конце его пути. Протон с начальной энергией 50 МэВ, влетающий в атмосферу вертикально, до высоты 56 км теряет только 10% своей энергии. Последние 10% он теряет на отрезке всего в 100 м (между высотами 42,1 и 42 км). На последнем отрезке в 2,5 км теряется половина всей первоначальной энергии. Для протонов с энергией 1–100 МэВ атмосферные эффекты наблюдаются в диапазоне высот 90–35 км. Однако с ростом энергии поток частиц слабеет, да и скорость рекомбинации сильно возрастает с уменьшением высоты, так что протоны высоких энергий оказываются не столь эффективны как можно было предположить. Тем не менее при мощных вспышках заметная ионизация может происходить на высотах менее 50 км, т.е. ниже слоя ионосферы.

Важным следствием вторжения энергичных солнечных частиц является не только ионизация атмосферы, но и, как следствие ее, изменение химического состава малых газовых составляющих, в частности увеличение содержания NO_x и NO_x и уменьшение содержания атмосферного озона. Вторжения энергичных частиц в магнитосферу Земли сопровождаются магнитными бурями. Проявления динамических процессов в магнитосфере наиболее легко наблюдаются в виде полярных сияний. Энергию, необходимую для возбуждения свечения, частицы набирают в магнитосфере во время процесса, получившего название «магнитосферного возмущения».

Конфигурация магнитосферы сильно меняется во время магнитных бурь. Одна из главных особенностей магнитной бури — перенос активных процессов во внутреннюю магнитосферу.

1.2.2 Радиационные пояса Земли

Радиационные пояса Земли относятся к внутренним областям земной магнитосферы, в которых магнитное поле Земли удерживает заряженные частицы (протоны, электроны, альфа-частицы и ядра более тяжелых химических элементов), обладающие кинетической энергией от десятков килоэлектронвольт до сотен мегаэлектронвольт. Выходу заряженных частиц из радиационных поясов мешает особая конфигурация силовых линий геомагнитного поля, создающего для заряженных частиц магнитную ловушку.

Захваченные в магнитной ловушке Земли частицы под действием силы Лоренца совершают сложное движение, которое можно представить как колебательное движение по спиральной траектории вдоль силовой линии магнитного поля из Северного полушария в Южное и обратно с одновременным более медленным перемещением (долготным дрейфом) вокруг Земли (рис. 1.9). Когда частица движется по спирали в сторону увеличения магнитного поля (приближаясь к Земле), радиус спирали и ее шаг уменьшаются, Вектор скорости частицы, оставаясь неизменным по величине, приближается к плоскости, перпендикулярной направлению поля. Наконец, в некоторой точке (называемой зеркальной) происходит «отражение» частицы. Она начинает двигаться в обратном направлении — к сопряженной зеркальной точке в другом полушарии. Одно колебание из полушария в полушарие протон с энергией ~ 100 МэВ совершает за время $\sim 0,3$ с. Время «жизни» такого протона в геомагнитной ловушке может достигать 100 лет, за это время он может совершить до 10^{10} колебаний. Долготный дрейф происходит со значительно меньшей скоростью.

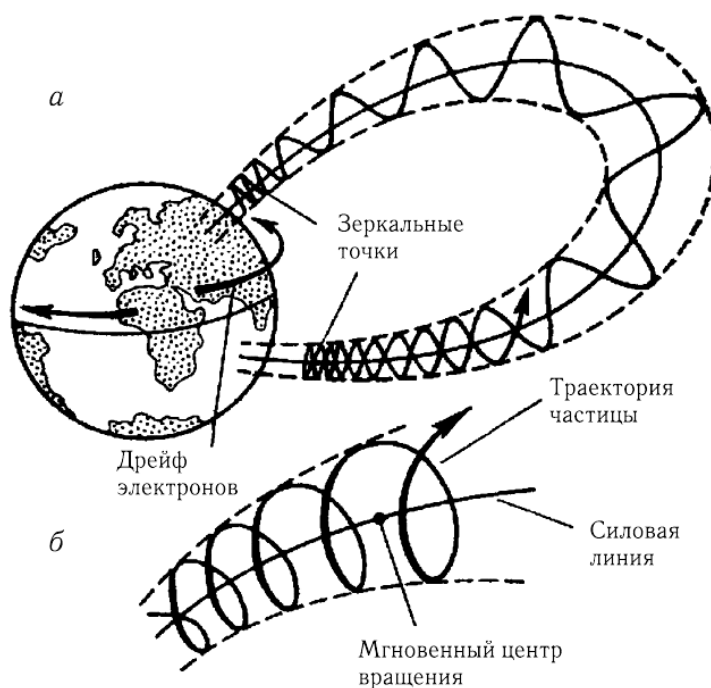


Рис. 1.9. Движение заряженных частиц, захваченных в геомагнитную ловушку (а) и движущихся по спирали вдоль силовой линии магнитного поля с одновременным дрейфом по долготе (б)

В зависимости от энергии частицы совершают полный оборот вокруг Земли за время от нескольких минут до суток. Положительные ионы дрейфуют в западном направлении, электроны — в восточном.

1.2.3 Магнитные бури и ионосферные возмущения

Магнитные бури являются сильными возмущения магнитного поля Земли, которые развиваются в ответ на перестройку магнитных полей в ОКП и резко нарушающие плавный суточный ход параметров земного геомагнитного поля. Магнитные бури обычно наблюдаются одновременно на всей планете. В высоких и средних широтах изменения магнитного поля бури составляют в среднем:

- для индукции $\delta B = (1-3) \times 10^{-7}$ Тл;
- для напряженности $\delta H = (0.08 - 0.18)$ А/м.

Максимальные значения их соответственно равны 5×10^{-7} Тл и 0.6 А/м. При росте геомагнитной широты амплитуды магнитных вариаций растут, достигая наибольших значений в авроральной зоне (62-67° широты). Продолжительность магнитной бури различна и составляет диапазон от нескольких часов до нескольких суток. Количество бурь связано с СА. В течение одного месяца может наблюдаться от 0 до 8 магнитных бурь. По степени интенсивности бури делятся на очень большие, умеренные и малые. С увеличением интенсивности магнитных бурь, уменьшается частота их появления.

Каждая буря - это уникальное явление, как по вариациям индексов напряженности магнитного поля, так и по производимым эффектам, тем не менее, магнитные бури обнаруживают общие характерные черты. Пример «классической» МБ со всеми особенностями и элементами её временной структуры представлен на рис. 1.10:

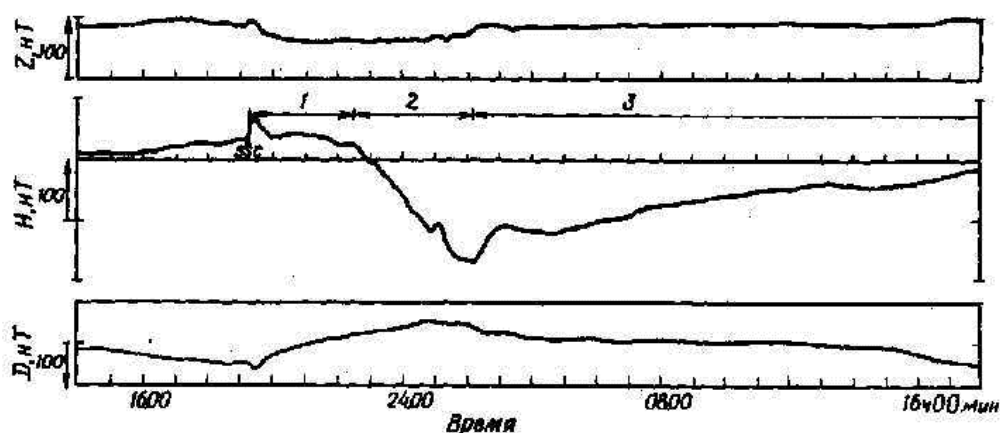


Рис. 1.10. Типичная вариация в геомагнитном поле во время магнитной бури (5-6 июня 1967 г). 1 - начальная фаза, 2 - главная фаза, 3 - фаза восстановления

Такая «классическая» магнитная буря состоит из нескольких обязательных этапов:

1. Внезапное начало магнитной бури (SSC - Sudden Storm Commencement). Такие бури начинаются внезапным возрастанием

горизонтальной компоненты H на 17-22 нТл по всей Земле за время около 1 -2 минут;

2. Начальная фаза. В пределах 1 ч после начала H -компонента растет и остаётся на уровне в 30-50 нТл большем, чем это наблюдалось до бури. Во многих бурях такая начальная фаза отсутствует и в таком случае начинается следующая фаза.

3. Главная фаза. В течение нескольких часов отмечается непрерывное уменьшение H -компоненты, обычно на 100-200 нТл.

4. Фаза восстановления. После достижения значения минимума H -компонента медленно, по экспоненциальной зависимости, возвращается к нормальных величинам.

5. Нерегулярные флуктуации. Наблюдаются по всем трём компонентам магнитной бури и характеризуются широким спектром периодов частот: от долей мин. до нескольких часов (2-4 ч).

Как и магнитосфера, ионосфера тоже находится в состоянии постоянного и сложного движения. В нижней ионосфере заряженные частицы ионов движутся вместе с незаряженными. Это явление получило название ионосферного ветра. На больших высотах ионы движутся независимо от движения нейтральных частиц. Это в значительной мере определяется геомагнитным полем – так называемый ионосферный дрейф. В ионосфере, кроме того, наблюдаются приливные явления. В последнее время было показано, что в этом ионизированном слое отсутствуют резко очерченные слои. Ионизация переходит от одной области ионосферы к другой без резких скачков в концентрации заряженных частиц. Обнаружены лишь локальные максимумы, тогда как в остальной части отмечено общее монотонное возрастание концентрации электронов до главного максимума – слоя F_2 . Отмечается тесная связь состояния ионосферы с солнечной активностью. Это выражается в том, что с увеличением СА наблюдается рост ионизации всей ионосферы. В связи с этим наблюдаются регулярные вариации ионизации с 11-летним циклом СА.

Как известно, ионосфера представляет собой верхний проводящий слой глобального конденсатора – ГЭЦ. Поэтому вариации и токи, которые возникают в ионосфере под влиянием космических возмущений, будут передаваться по всему электрическому контуру, меняя таким образом режим работы.

1.2.4 Глобальная атмосферно-электрическая цепь как связующее звено процессов космической и погоды нижней атмосферы.

Распределение электрической проводимости и комплекс электрических генераторов в атмосфере (прежде всего тропосферных) рождает пространственную аэроэлектрическую стратификацию атмосферных объемов, объединенных непрерывностью плотности вертикального электрического тока. Эти процессы формируют Глобальную Электрическую Цепь. ГЭЦ представляет собой распределенный токовый контур, образованный проводящими слоями ионосферы, верхнего слоя океана и земной коры, с грозовыми генераторами в качестве основных источников электродвижущих сил и невозмущенными областями свободной атмосферы в качестве зон возвратных токов. Таким образом, ГЭЦ является интегральной системой, включающую твердую, жидкую, и газоплазменную геосферные оболочки и занимающую пограничную область между космическим пространством и земными поверхностью (рис. 1.11.) [21]. Основанием существования ГЭЦ служит вертикальный электрический ток проводимости плотностью $\sim 10\text{-}12 \text{ А/м}^2$, текущий к отрицательно заряженной земной поверхности из нижних слоев проводящей ионосферы. Этот ток проводимости определяется разностью потенциалов и сопротивлением столба атмосферы между нижней ионосферой и земной поверхностью. Разность потенциалов между землей и нижней ионосферой ($\sim 10^5 \text{ В}$), согласно гипотезе Вильсона, поддерживается глобальной грозовой активностью. В стационарных

условиях, эквивалент сопротивления атмосферы, возможно – нагрузочный резистор областей хорошей погоды.

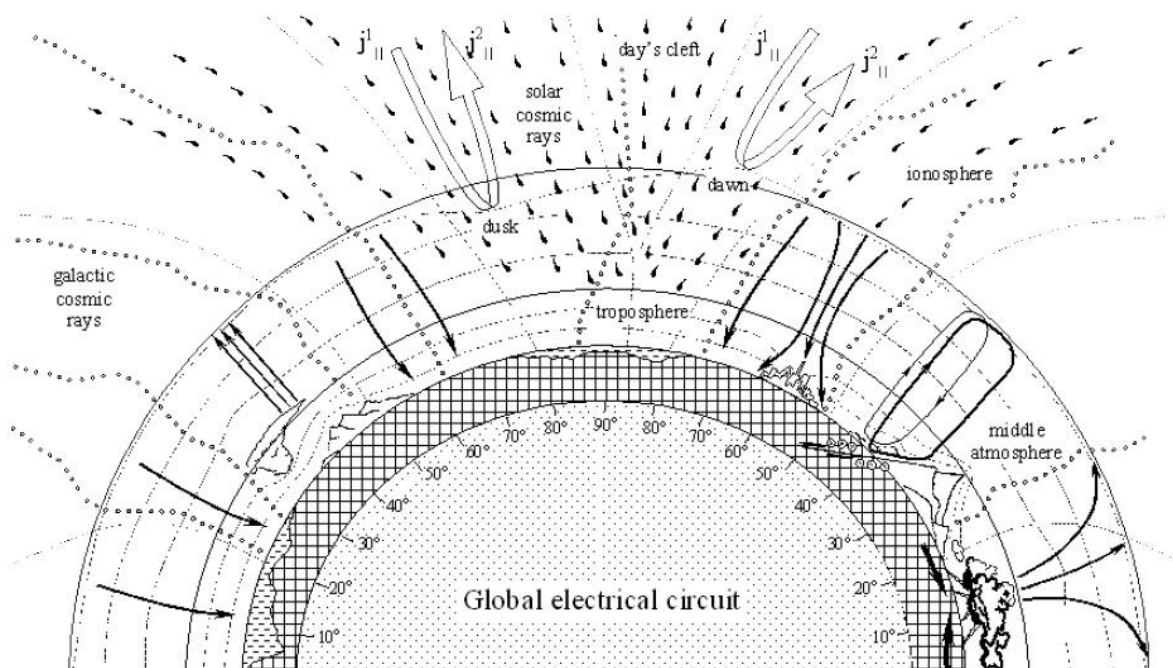


Рис. 1.11. Глобальная электрическая цепь

Проводимость атмосферы растет с высотой согласно экспоненциальному закону. А напряженность электрического поля уменьшается – примерно на порядок – на высоте 10-15 км над уровнем моря. На высотах более 50 км атмосфера является хорошим проводником, проводимость которой, можно сравнить, со средним значением проводящей земли [22].

Унитарная вариация атмосферного электрического поля и тока считается важнейшим признаком ГЭЦ и служит непосредственным прямым доказательством существования единого генератора атмосферного электрического поля.

Согласно классическим представлениям стационарное состояние ГЭЦ формируется одновременным действием 1500-1800 грозовых генераторов с общим током $I = 800-1800$ А. Эта величина согласуется с плотностью тока нагрузочных областей хорошей погоды. Потенциал ионосферы составляет $V_i = 180-400$ кВ и подвержен вариации как вследствие солнечной и геомагнитной

активности, так и в результате природных и антропогенных атмосферных явлений.

Последние экспериментальные результаты показывают, что в поддержании токового баланса и формирование ГЭЦ существенный вклад могут вносить ММКС. Они занимают обширные (>150 км) электрически активные районы. Обширные области стратифицированных зон ММКС внося значительный вклад в формирование ГЭЦ. ММКС могут рассматриваться как эффективные генераторы [23].

Помимо тропосферных, существенный вклад вносят магнитосферно-ионосферные источники. Теория грозных генераторов предполагает ионосферу эквипотенциальной. Разности потенциалов значительной величины, однако, существуют в нижней ионосфере высоких, низких и средних широт. Эксперименты и спутниковые наблюдения показывают, что электрические поля магнитосферной конвекции, направленные от утреннего сектора к вечернему, во многом определяют аэроэлектрическое поле высоких широт. В полярной шапке разность потенциалом «утро-вечер» величиной 20-100 кВ генерируется магнитосферным динамо, представляющим собой гигантский магнитогидродинамический генератор, трансформирующий кинетическую энергию солнечного ветра в электрическую. Электрические поля магнитосферной конвекции – один из активных источников квазистационарных аэроэлектрических полей высоких широт. Для дней, когда вариации геомагнитного поля спокойны, а горизонтальные масштабы источника примерно равны 500 км вклад такого поля магнитосферной конвекции может составлять до 20 % вариации электрического поля у земли на высоких широтах. Та величина, которую поле магнитосферной конвекции вносит в приземное аэроэлектрическое поле и широтные масштабы влияния генератора значительно возрастают при магнитной бури, развивающейся в авроральных широтах. Также стоит обратить внимание на вклад полей, генерируемых действием движения приливных волн в E-области ионосферы. Изменчивость аэроэлектрического поля, которая обусловлена действием данного источника,

составляем около 5% от среднего значения E поля в средних широтах. Влияния источников вне атмосферы на формирование глобальной электрической цепи экспериментально подтверждается обнаружением вариаций плотности тока, под действием такого агента космической погоды, как солнечный ветер, который обуславливает внешнюю модуляцию параметров ГЭЦ [24].

Глава 2. Характер циркуляции атмосферы

2.1. Главные закономерности атмосферной циркуляции

Атмосферная циркуляция является одним из факторов изменения климата. Изменчивость атмосферной циркуляции является причиной изменения атмосферного давления, ветра, температуры воздуха и влажности в различных регионах Земли. В широком смысле атмосферной циркуляцией можно назвать совокупность всех воздушных течений, возникающих в ней. По масштабу такие течения делятся на 3 группы:

1. Макромасштабные, которые обладают наибольшей устойчивостью течений в тропосфере и стратосфере, и обусловлены не только факторами планетарного и космического масштаба;
2. Синоптические, определяемые движением воздушных масс циклонического и антициклонического характера барического поля;
3. Локальные, возникающие в ограниченном районе главным образом за счет неоднородностей подстилающей поверхности. Проявляется, обычно, такая циркуляция в виде разномасштабных турбулентных движений [25].

Вся лучистая энергия, приходящая к Земле от Солнца, превращается в атмосфере и на поверхности в энергию движения и прочие виды энергии. Неравномерный нагрев атмосферы, происходящий вследствие влияния геометрии планеты, её положения относительно оси вращения, а также учитывая разные физические свойства подстилающей поверхности (в первую

очередь разделение на сушу и океан) приводит к развитию системы крупномасштабных воздушных течений — общей циркуляции атмосферы [26,27]. Такая неравномерность влияет на силу барического градиента. Она направлена от областей с более высоким давлением (например, антициклонов) к областям с низким давлением (циклонам). Поскольку сила барического градиента практически уравнивается силой Кориолиса, то крупномасштабная циркуляция атмосферы нашей планеты имеет квазигеострофический характер. Именно поэтому, общая циркуляция атмосферы имеет преимущественно зональную направленность. С высотой зональность циркуляции возрастает, в верхней тропосфере и стратосфере преобладают волновые возмущения зонального переноса. Зональный перенос в тропосфере особенно хорошо выражен в тропиках. Однако фактическая картина значительно отличается от такой схемы. Одни отклонения связаны с рельефом суши и разным альбедо суши, моря и их отдельных участков, другие — с погодой, третьи с вариациями СА и геомагнитного поля; например у земли ветер находится под влиянием сил трения и существенно отличается от геострофического по скорости и направлению. Кроме того есть указания [28], что СА, посредством изменения интенсивности ГКЛ, может способствовать ослаблению циклонической и усилению антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария. Например, в Северной Атлантике проявляется барический отклик на короткопериодные вариации ГКЛ, в отличие от тихоокеанского региона, где эффекты такого отклика не наблюдаются. Это, в том числе, может быть связано с более низкими значениями порогов жесткости геомагнитного обрезания в североатлантическом регионе. В свою очередь это указывает на то, что в областях формирования атмосферных фронтов влияние менее энергичной компоненты галактических космических лучей более выражено. А такая компонента сильнее модулируется солнечной активностью. В североатлантическом регионе складываются более благоприятные условия для влияния ГКЛ на развитие внетропических барических систем. Поэтому в реальности циркуляция атмосферы находится в непрерывном изменении:

учитывая сезонные вариации в распределении источников и стоков тепла на земной поверхности и в атмосфере, солнечную активность, вихревые процессы и циклоническую деятельность. Циклоническая деятельность вносит макротурбулентный характер в такую общую циркуляцию.

Учитывая все вышесказанное, строгая, в теории, зональность крупномасштабных атмосферных движений и глобального распределения давления нарушается – в разных районах планеты возникают квазистационарные крупномасштабные барические образования, которые обеспечивают в течение более или менее длительного времени преобладание высокого или низкого давления [26,29]. Такие климатические центры действия атмосферы выявляются на картах среднего многолетнего атмосферного давления в виде участков с повышенным или пониженным давлением воздуха.

Различают как сезонные центры действия атмосферы, так и постоянные. Например, к постоянно действующим центрам относятся Северо-Атлантический антициклон (или Азорский максимум) и Северо-Тихоокеанский антициклон (Гонолульский или Гавайский максимум). К сезонным зимним центрам относятся Исландский минимум в северной части Атлантического океана и континентальный Сибирский (Азиатский) максимум с центром над Монгольским плато. Летом они выражены слабее, а ярче влияние Азиатского минимума (Южно-Азиатская депрессия) с центром над Афганистаном. Над Арктикой на климатических картах отмечается область высокого давления (Арктический антициклон). Из-за нечеткой и слабой выраженности этой области на картах погоды ведутся споры – относить её к центрам действия или нет. Эта дискуссия до сих пор актуальна. В настоящее время в российском научном сообществе есть несколько подходов к типизации форм циркуляции атмосферы и методах долгосрочных прогнозов на них основанных. Коротко остановимся на основных из них.

2.1.1. Классификация форм атмосферной циркуляции по В.Я.

Вангенгейму

Классификация Г.Я. Вангенгейма основана на понятии элементарного синоптического процесса (ЭСП), которое было им введено в 1933 г. На протяжении одного ЭСП на территории атлантико-европейского сектора сохраняется географическая локализация основных барических образований, что соответствует основным тропосферным выносам тепла и холода как у земли, так и на высотах. Средняя продолжительность ЭСП составляет 2–4 дня. Всего было выделено 26 типов ЭСП. Для каждого из типов были построены сборно-кинематические карты и графики хода метеорологических элементов. По характеру преобладающих переносов в тропосфере были выделены 3 формы атмосферной циркуляции:

западная — W;

восточная — E;

меридиональная — С. [30].

В 1948 г. А.А. Гирс изучил вертикальную структуру форм макропроцессов W, E, C. Он выявил, что для каждой формы атмосферной циркуляции (АЦ) соответствуют свои, определённые, макродеформационные поля. Для процессов форм W свойственно зональное состояние атмосферы, при котором в тропосфере наблюдаются волны малой амплитуды. Эти волны быстро смещаются с запада на восток. Процессы E и C форм характеризуют меридиональное состояние атмосферы. В этом случае наблюдаются стационарные волны большей амплитуды. Географическое положение высотных гребней и ложбин при E и C формах является противоположным. Формы циркуляции были установлены Вангенгеймом лишь для приземных карт атлантико-евразийского сектора. При этом процессы, наблюдавшиеся в противоположном секторе - тихоокеано-американском — не учитывались. Поэтому А.А. Гирс, используя классификационные принципы и критерии Г.Я. Вангенгейма, произвел классификацию процессов, наблюдавшихся во втором секторе полушария [31]. В результате этой работы формы циркуляции второго

сектора были сведены в три типа (зональный — З и два меридиональных — М1 и М2), что позволило установить девять разновидностей основных форм АЦ: W3, WM1, WM2, E3, EM1, EM2, C3, CM1, CM2. Эти разновидности, отображают специфику и характер развития длинных волн в Северном полушарии. Они характеризуют крупномасштабные стадии развития полушарной циркуляции. Для использования в целях прогноза характеристик длинных волн, свойственных каждой из вышеперечисленных форм АЦ, были найдены связанные с ними характерные состояния полей метеорологических элементов у земли, их аномалий и различные характеристики состояния гидросферы.

Типам циркуляции атмосферы W, C, E, З, М1, М2 в тропосфере соответствуют определенные и отличные друг от друга высотные макродеформационные поля. При этом процессы W и З характеризуют зональное состояние атмосферы, при котором в тропосфере наблюдаются волны малой амплитуды, быстро смещающиеся с запада на восток. Процессы E, C, М1, М2 характеризуют зональное состояние атмосферы, которому в тропосфере свойственны стационарные волны большой амплитуды. При этом географическое положение высотных гребней и ложбин при E и C, а также М1 и М2 противоположны (т. е. там, где при E располагается ложбина, при C отмечается гребень и т.д.). Расчленение меридионального состояния атмосферы на две противоположные формы очень важно в прогностическом отношении, так как с этими формами связано противоположное распределение аномалий ряда гидрометеорологических элементов и явлений.

Анализ показал, что при одном и том же типе процессов W, C или E, наблюдавшемся в атлантико-европейском секторе полушария (первый сектор), почти с одинаковой вероятностью могут наблюдаться различные типы процессов (З, М1 или М2) в тихоокеано-американском (втором) секторе. Поэтому, чтобы охарактеризовать макропроцесс сразу на всем полушарии, необходимо учесть одновременно процессы первого и второго секторов.

В результате было получено 9 типов макропроцессов (W_3 , W_{m1} , W_{m2} , E_3 , E_{m1} , E_{m2} , C_3 , C_{m1} , C_{m2}), которые могут рассматриваться как основные формы атмосферной циркуляции северного полушария или как разновидности форм W , C , E , наблюдающихся в первом его секторе [30].

На рис. 2.1 представлено географическое положение основных гребней и ложбин при каждой из указанных форм циркуляции на полушарии. Анализ этих карт показывает, что формы атмосферной циркуляции фиксируют определенный характер длинных термобарических волн, наблюдаемых в тропосфере и нижней стратосфере. Отличие этих форм проявляется, прежде всего, в характере волн (стационарные или смещающиеся волны), их амплитуде и географической локализации основных гребней и ложбин [30].

Усилиями ученых различных стран установлено, что в тропосфере и нижней стратосфере существуют длинные термобарические волны, природа и свойства которых во многом отличны от коротких фронтальных волн. Обстоятельное изучение длинных волн было выполнено в 1946-1947 гг группой ученых Чикагского университета. Ими показано, что длина волн во многом зависит от скорости зонального потока. Длинные волны в тропосфере являются одной из важнейших комплексных характеристик общей циркуляции атмосферы [32].

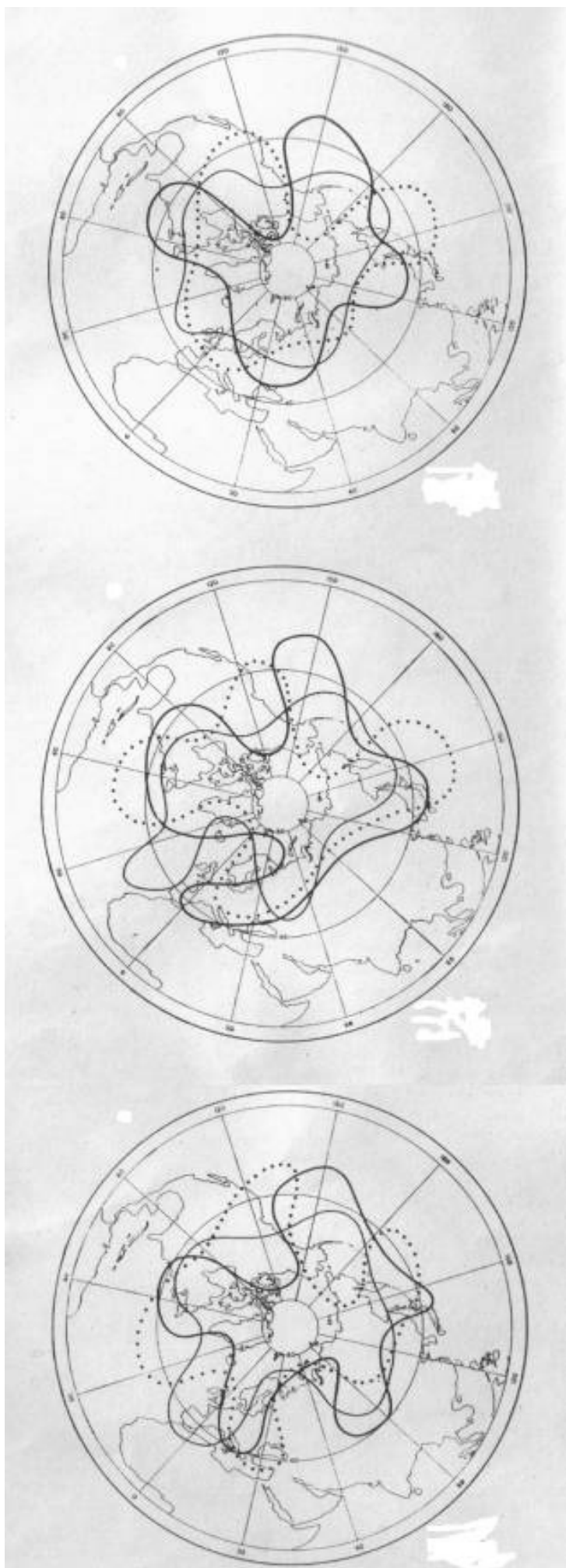


Рис. 2.1. Схема положения высотных (АТ500) гребней и ложбин при разновидностях форм W , С , Е в северном полушарии [30]

2.1.2 Классификация форм атмосферной циркуляции по Б.Л. Дзердзеевскому

Основным признаком, по которому была проведена типизация, явилось наличие или отсутствие блокирующих процессов на полушарии, их направление и количество. Отдельную группу представляют процессы с циклонической циркуляцией на полюсе. Всего выделено 4 группы циркуляции, 13 типов, 41 подтип, элементарный циркуляционный механизм, сокращенно ЭЦМ, который и является основной единицей типизации [33].

Группа циркуляции	Типы ЭЦМ, входящие в группу	Атмосферное давление в Арктике	Количество блокирующих процессов	Количество выходов южных циклонов
Зональная	1 и 2	Высокое	0	2-3
Нарушения зональности	3 -7	Высокое	1	2-3
Меридиональная северная	8-12	Высокое	2-4	2-4
Меридиональная южная	13	Низкое	0	3-4

Таблица 2.1 Характеристика групп циркуляции атмосферы Северного полушария в типизации Б.Л. Дзердзеевского

С целью обеспечения однородности исследования изменений циркуляции атмосферы (ЦА) над регионами Б.Л. Дзердзеевским были выделены океанические и континентальные сектора: атлантический (60° з.д. – 0°), европейский (0° – 60° в.д.), сибирский (60° – 120° в.д.), дальневосточный (120° – 170° в.д.), тихоокеанский (170° – 120° з.д.) и американский (120° – 60° з.д.). Россия расположена в 4 секторах: европейский, сибирский, дальневосточный и тихоокеанский. Для нашего исследования интерес представляет, прежде всего,

атлантико-европейский сектор и изменения циркуляции атмосферы в этом секторе в начале XXI века.

2.2 Особенности циркуляции в начале XXI века

Анализ суммарной годовой продолжительности групп циркуляции позволил выявить длительные (в несколько десятилетий) периоды положительных аномалий продолжительности какой-либо группы циркуляции. Эти периоды получили название циркуляционных эпох [34]. С 1899 г. на пространстве Северного полушария наблюдались следующие эпохи циркуляции:

1. Меридиональная – с 1899 по 1915 гг;
2. Зональная - с 1916 по 1956 гг;
3. Меридиональная – с 1957 г. по настоящее время.

Во вторую эпоху отмечалось преобладание ЭЦМ без арктических вторжений, либо с одним арктическим вторжением. Атлантические циклоны проходили вдоль всего побережья Евразии. В этот период наблюдалось потепление Арктики. На материке в это время господствовали антициклоны, так что отмечались и сильные морозы, и сильные засухи. Наибольшая суммарная продолжительность за год отличалась в эту эпоху для почти всех зональных ЭЦМ и ЭЦМ с нарушением зональности. Из анализа схем этих ЭЦМ становится видно, что зимой вся Россия, исключая крайний север, находилась под воздействием сибирского максимума, а летом под влиянием азорского антициклона. В зоне ответственности блокирующего процесса, который сформировался в сухом арктическом воздухе находилось большинство районов ЦЧО и черноземья Украины.

Меридиональные эпохи отличаются преобладанием различных групп циркуляции. Отмечалась меридиональная северная эпоха, наблюдавшаяся в начале XX века, которая отличалась тем, что продолжительнее средней за 1899-2012 гг. были блокирующие процессы. В средние широты перемещались

антициклоны Арктики и их гребни. Преобладала зимой морозная, а летом жаркая погода без осадков. В целом на Северном полушарии и в России отмечалось похолодание [35, 36]. При северной циркуляции в тылу циклонов формируется один из двух блокирующих процессов на полушарии, направленный на территории, прилегающие к Уралу. В сухом, быстро нагреваемом, воздухе из Арктики оказывались (в общей сложности больше месяца) зернопроизводящие районы Западной Сибири, ЕТР и Восточной Украины.

С 1957 г. началась меридиональная юная эпоха, которая продолжается по настоящее время. В этой эпохе, почти в 3 раза продолжительнее нормы оказались выходы южных циклонов. Они выносили из низких широт в высокие тёплый и влажный воздух. Следует заметить, что в первой трети XX века меридиональная южная циркуляция почти отсутствовала. Однако, с 1963 г. ее продолжительность, впервые, превысила среднюю норму за 1899-2012 гг. Это определило однородность первых двух эпох: одна из двух групп циркуляции оказывалась преобладающей в течение всей эпохи. Третья эпоха делится на периоды с преобладанием какой-либо группы циркуляции (табл. 2.2.).

Таблица 2.2. Циркуляционные периоды в меридиональной южной эпохе циркуляции

Период	Годы
Повышенная продолжительность меридиональной северной циркуляции	1957-1969
Рост продолжительности зональной циркуляции	1970-1980
Быстрый рост меридиональной южной циркуляции	1981-1997
Уменьшение продолжительности меридиональной южной циркуляции и рост меридиональной северной	1998-2018

Таким образом, главная черта современного периода (1998-2018 гг.) на Северном полушарии заключается в новом всплеске продолжительности блокирующих процессов. Количество одновременных блокирующих процессов на полушарии в современный период больше, чем в предыдущие. Если в

начале 21 века формировалось одновременно два блокирующих процесса, в 60-е годы 2-3, то сейчас эта цифра выросла до 3-4 одновременных блокирующих процесса на полушарие. На территорию России приходится два одновременных блокирующих процесса [33,36].

Рост суммарной за год продолжительности блоков привел к стабилизации среднегодовой температуры воздуха Северного полушария. Наибольшая аномалия с 1998 г. не превысила $0,626^{\circ}\text{C}$. Тренд глобальной температуры понижается. Происходящие колебания температуры воздуха в разных регионах завязаны с колебаниями общей ЦА и изменением продолжительности процессов, вызывающих повышение или понижение температуры воздуха в конкретном районе в определённом сезоне. С 1998 г. часто самым холодным месяцем оказывается февраль. Это может быть связано со временем интенсивного развития сибирского антициклона и его гребней.

Блокирующие процессы, развивающиеся преимущественно над континентами зимой и летом и современное увеличение их суммарной годовой продолжительности ведет к повышению летних и понижению зимних температур, т. е. растет годовая амплитуда температуры как в целом на полушарии, так и особенно в России, что в свою очередь ведет к росту ОЯП. Так, например, характерная черта современного периода стационарное антициклона, что ведет к одновременному формированию засух на юге Европейской России и выпадения обильных осадков, на Черноморском побережье и на Северном Кавказе. Наблюдаемый рост интенсивности циклонической циркуляции в переходные сезоны ведет к росту вероятности возникновения КМЯ — ливней сопровождаемых в летний период грозами и сильным ветром, и соответственно к паводкам и наводнениям, а в предзимье и предвесенье к изморозево-гололёдным явлениям, с сильным ветром. Такая картина отмечается в последние годы, в связи с ростом количества наблюдаемых ОЯ и КМЯ.

Учитывая длительность предыдущих периодов увеличения суммарной годовой продолжительности блокирующих процессов на Северном полушарии, стоит ожидать того, что такая форма циркуляции продлится еще как минимум до 2030 г. Адаптация к происходящим изменениям предполагает их тщательное изучение в конкретном регионе.

Несколько иные результаты были получены при анализе ЦА в начале XXI в. с использованием макроциркуляционного метода и на основе идей, предложенных Вангенгеймом–Гирсом. Было установлено, что число дней *W* формы циркуляции достигает максимума с сентября по январь, при минимуме в мае. Процессы формы *C* максимум с мая по июль, а минимум значения принимают в осенне-зимний период. Число дней с процессами *E* формы мало меняется от месяца к месяцу. Минимум дней с *E* формой — в июне и сентябре–октябре. Период с 1966 по 1989 г. отмечен серьезным преобладанием *E* формы циркуляции (эпохи). В период с 1990 по 2015 гг. систематически превышали норму процессы *W* формы циркуляции. Однако, процессы формы *C*, были в основном в пределах нормы или немного меньше. А процессы формы *E* были ослаблены в преобладающем числе лет. В работах [30] было показано, что аномальное развитие той или иной формы циркуляции в какой-либо эпохе особенно четко проявляется в одном или двух сезонах. Следовательно, тип циркуляции эпохи возможно предсказывает периоды, в которых особенности циркуляции будут выражены достаточно сильно. Последнее обстоятельство имеет существенное практическое значение для составления месячных и сезонных прогнозов погоды. В текущей циркуляционной эпохе *W* (1990–2018 гг.) [37], в зимние месяцы года аномальное развитие получили процессы *W* и *C* форм. С июля по сентябрь повторяемость процессов *E* формы превышала норму. Из этого можно сделать вывод, что эпоха *W* в эти месяцы сохраняла черты предшествующей. В апреле–июне и октябре–ноябре повышенная повторяемость наблюдалась для процессов формы *W*. Формы *C* и *E* были близки к норме, либо чуть ниже её. В девяти месяцах текущей циркуляционной эпохи были аномально развиты процессы формы *W*. В зимние и весенние

месяцы они комбинировались с процессами формы *С*. Но, несмотря на вышесказанное, даже в те месяцы, когда процессы *W* и *С* форм преобладали, в некоторые годы отмечалась аномальная повторяемость процессов формы *Е*. В летние месяцы (июль–август) основные черты эпохи циркуляции *Е* сохраняются и в настоящее время. Важно обратить внимание — в зимние месяцы последнего десятилетия (2005-2018 гг.) довольно часто наблюдались вспышки повторяемости процессов *Е*.

Основная особенность АЦ, имеющая важное прогностическое значение для полей приземных метеорологических величин – это то, что характеристики аномалий полей давления у земли и температуры двух последних эпох (для каждого календарного месяца) хорошо согласуются с соответствующими аномалиями распределения форм циркуляции *W*, *С* и *Е*. Такое соответствие имеет важное прогностическое значение. Оно позволяет совместно с прогнозом повторяемости форм атмосферной циркуляции определять основные фоновые характеристики полей аномалий метеорологических параметров в каждом календарном месяце грядущей эпохи. Такое согласие выражено как для всей России так и для отдельных регионов. Климатические изменения в России в целом согласуются с данными по Северному полушарию. Однако, здесь есть своя специфика, которая выражается в более значительных межгодовых амплитудах температуры, что определяется физико-географическим положением страны и масштабами Евразийского континента.

2.3. Климатические характеристики и специфика погоды в Омской области

Омская область, как и г.Омск находится в умеренной климатической зоне, для которого характерен континентальный климат лесостепи Западно-Сибирского пояса. В этом регионе ослабевает роль западных воздушных течений в образовании климата, а основное значение несут воздушные массы арктического происхождения. Омская область находится в центре Азиатского

материка на обширной низменной равнине, вдали от морей. Такое расположение способствует тому, что в климатообразовании главную роль играют физические свойства суши. Летом здесь суша быстро и интенсивно прогревается, и зимой также быстро охлаждается. Помимо этого, на эту область свободно вторгаются не только арктические холодные воздушные массы, но и теплые сухие из Казахстана. Свободный обмен арктических и тропических воздушных масс приводит к формированию контрастных высотных фронтальных зон и способствует интенсивному развитию циклонической деятельности в течение всего года, что не характерно для других внутриконтинентальных районов [38].

Погода в Омской области характеризуется свойствами той воздушной массы, которая располагается над данной территорией. Основными воздушными массами, определяющими погоду в Омске и его окрестностях, являются: арктический воздух, воздух умеренных широт, тропический воздух.

Арктический воздух формируется над Арктикой и в район Омска поступает с северными (меридиональными) потоками. Для этой воздушной массы характерны низкие температуры, малое влагосодержание и большая прозрачность атмосферы. Как зимой, так и летом вторжение арктического воздуха сопровождается резким похолоданием.

Воздух умеренных широт (континентальный и морской полярный) формируется в средних широтах (от 40 до 65° с. ш.): континентальный — над сушей Евразии, морской — над Атлантикой (в отличие от континентального он более влажный, зимой более теплый, летом более прохладный). На юг Западной Сибири воздух умеренных широт поступает с западными (зональными) потоками.

Тропический воздух приходит в район Омска из Средней Азии и со Средиземноморья через Прикаспийскую низменность и Казахстан, т. е. с юго-запада. Летом тропический воздух характеризуется высокими температурами и

низкой относительной влажностью, зимой его вторжение вызывает сильные оттепели, а иногда дождь.

Кроме основных воздушных масс, определяющих погоду в Омске [38], следует выделить еще две:

— атлантико-арктический воздух, сочетающий влияние Арктики (формируется в высоких широтах — севернее 65° с. ш.) и Атлантики (влияние теплого течения Гольфстрим); поступает из Скандинавии и с юга Баренцева моря с северо-западными воздушными потоками через районы ЕТС и Средний Урал,

— стационарный воздух, который формируется в малоподвижных областях пониженного или повышенного давления со слабоградиентным полем, обуславливая малооблачную морозную погоду, нередко с туманами, зимой и малооблачную жаркую летом.

Чаще всего погода в Омске обуславливается континентальным воздухом умеренных широт, и реже всего поступает морской арктический. Обычно воздушные массы, которые имеют различные свойства разделяются атмосферными фронтами. Фронт — это контрастная зона между двумя различными воздушными массами. Существует теплый, холодный фронт и фронт окклюзии.

Холодные и теплые фронты в течение года наблюдаются почти одинаково часто, лишь летом повторяемость теплых уступает холодным из-за размывания их в дневные часы при значительном прогреве подстилающей поверхности.

Учитывая частоту повторяемости воздушных масс над рассматриваемой территорией, можно для двух периодов выделить несколько типов погоды.

Как уже отмечалось, в Омске во все сезоны наблюдается явное преобладание циклонической циркуляции (рис. 2.2.). Наибольшей величины

это превышение достигает летом. Повышенная интенсивность циклонической циркуляции вызывает неустойчивый характер погоды в течение года.

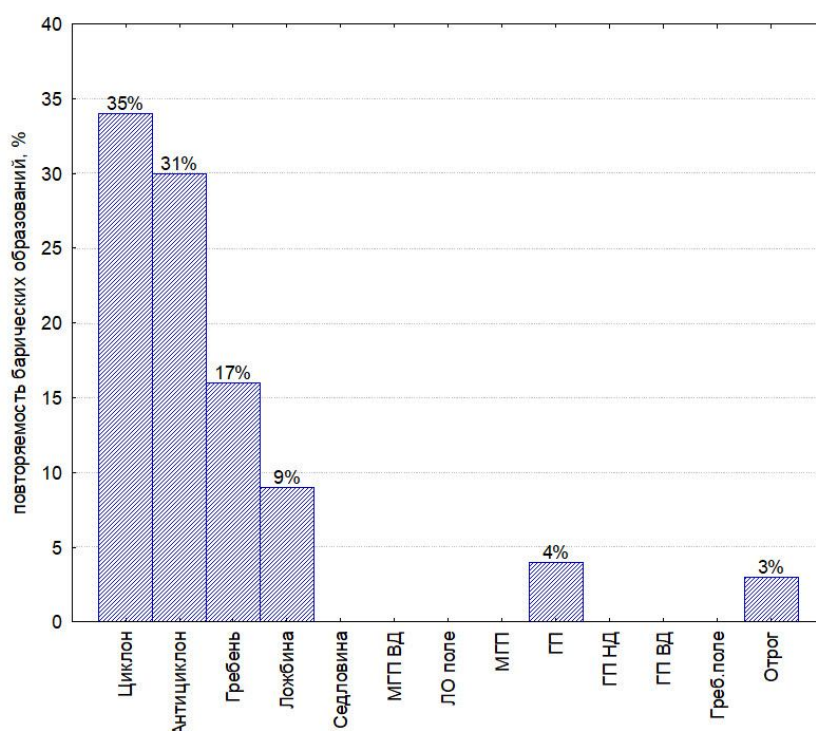


Рис. 2.2 Повторяемость барических образований в атмосфере в окрестностях г.Омска за период 2006-07 гг, 2017-18 гг.

Наибольшую повторяемость в районе Омска в течение года имеют западные и северо-западные циклоны. С западными потоками с Атлантики часто смещаются глубокие и активные циклоны, обуславливающие летом дожди и грозы, а зимой снегопады и метели. Наиболее редки ныряющие и регенерирующие циклоны. Из антициклонов, определяющих погоду в Омске, наиболее часто повторяются, особенно зимой, сибирские. В холодное полугодие возрастает роль приземного антициклогенеза и влияние Сибирского антициклона. Зимой антициклон обуславливает малооблачную морозную погоду, часто с туманами, изморозью, а летом — сухую и жаркую погоду. Не редко погоду в Омске определяет слабоградиентное барическое поле, при котором устанавливается малооблачная погода, зимой морозная, часто с туманами, летом жаркая. Летом иногда наступают длительные периоды

ливневых дождей, которые обусловлены обширной малоподвижной депрессией, формирующейся над Западной Сибирью.

Глава 3. Результаты исследования одновременной изменчивости характеристик космической погоды и циркуляции атмосферы в районе г. Омска

3.1 Методика исследования

Формируем базу данных характеристик солнечной активности, околоземного космического пространства и характеристик геомагнитного поля, характеристик состояние атмосферы (результаты 8-ми срочных метеорологических измерений). В базу данных включаем не только абсолютное значение всех, выбранных нами для исследования величин, но и их суточные статистические характеристики.

- Для параметров СА, ОКП и ГМП, характеристик состояние атмосферы имеющих мелкий шаг дискретизации (меньше суток), определяем суточные статистические характеристики (медиану, максимум, минимум, амплитуду, стандартное отклонение, коэффициент вариации, коэффициент осцилляции). Каждую суточную статистическую характеристику считаем независимым параметров СА, ОКП, ГМП и характеристик состояние атмосферы (заранее мы не знаем, вариации которой из них чаще совпадают и совпадают ли вообще с изменчивостью циркуляции атмосферы)
- Определяем сезонные статистические характеристики каждого из параметров СА, ОКП, ГМП и характеристик состояния атмосферы – сезонную медиану и сезонное стандартное отклонение;
- Проводим стандартизацию каждого параметра СА, ОКП, ГМП характеристик состояние атмосферы относительно значения его сезонной медианы по формуле:

$$x_{st} = \frac{x - x_{0.5season}}{\sigma_{xseason}}$$

где x – значение природного параметра, $x_{0.5season}$ – сезонная медиана природного параметра, $\sigma_{xseason}$ – сезонное СКО.

Величина сезонной медианы вычисляется по проведению статистического анализа значений конкретной природной характеристики в выборке этих значений в конкретный календарный сезон конкретного года. Равенство природного параметра его сезонной медиане считаем сезонной нормой значения этого параметра.

В результате мы получаем набор параметров природной среды, которые представлены в условных единицах, характеризующих отклонение каждого параметра от значения его сезонной медианы в единицах сезонного стандартного отклонения: отклонение = 0, – величина параметра точно равна величине его сезонной медианы; отклонение = 1 – значение параметра больше его величины сезонной медианы на 1 сезонное стандартное отклонение; отклонение = -1 – значение параметра меньше его сезонной медианы на 1 сезонное стандартное отклонение.

Формируем базу данных циркуляции атмосферы над территорией г. Омска по основным барическим образованиям (циклон, антициклон, ложбина, гребень, седловина, ГП ВД и НД, ЛО поле, МГП, ГП, отрог).

- Определяем для каждого дня преобладающее барическое образование, направление его смещения (откуда смещается), часть барического образования, под влиянием которого находилась атмосфера г.Омска, наличие или отсутствие фронтов. Всего – 4 параметра.
- При исследовании взаимосвязи параметров природной среды при различной циркуляции атмосферы находим периоды устойчивости и неустойчивости барических образований продолжительностью:

а) 5-7 суток;

б) 7-10 суток;

в) >10 суток;

Собираем базу данных таких периодов и определяем моменты начала и конца для всех этих периодов (далее будем говорить – “события”).

- Для природной среды определены 2 состояния аномалии:

1) больше сезонной нормы

2) меньше сезонной нормы

- На основании указанного деления формируются наборы характеристик внешней среды, соответствующие однородным группам исследуемого явления. Однородность определяется одним и тем же сезоном одного и того же года.

- Далее, для каждой однородной группы исследования (определенный период устойчивости или неустойчивости барического образования) обрабатываются данные природной среды и определяются:

1) состояния полных комплексов природной среды в дни различных событий (дни начала и конца данного типа циркуляции атмосферы);

2) состояния каждой отдельной характеристики природной среды в дни начала и конца различных событий;

- Если состояния исследуемой характеристики одинаково в дни различных событий (например, значение этой характеристики равно своей сезонной норме при соответствии разным моментам (например, начало и конец периода атмосферной неустойчивости), то такая характеристика объявляется «не работающей», так как она не может

отвечать за создание условий для реализации различных между собой типов циркуляции атмосферы. Такие природные характеристики на данном этапе извлекаются из общего списка и в дальнейшем исследовании не участвуют.

- Если состояние исследуемой характеристики природной среды различно в дни различных событий, то такая характеристика объявляется «работающей». «Работающие» характеристики продолжают исследоваться дальше:
- 1) Производится поиск разных сочетаний однородных групп с наибольшей повторяемостью одинаково различающихся природных характеристик в случае их одинакового соответствия различным видам событий в атмосфере (например, значения определенной характеристики равны своей сезонной норме при соответствии «нормальному» состоянию исследуемого события – стандартной продолжительности определенного барического образования (5-7 дней)). При формировании событий другой продолжительностью, эти же характеристики природной среды отличаются от нормы. Такие сочетания считаются наиболее перспективными для поиска закономерностей, поэтому их исследование происходит в первую очередь.

Выделенные таким образом параметры считаем наиболее перспективными для создания прогностической базы (именно их изменение есть смысл прогнозировать).

- 2) Рассматривается временной ход выделенных параметров на промежутке интервала метода наложения эпох.
- Выбирается интервал для всех видов событий ± 10 дней относительно дня события («реперный» или «ключевой» день).

Результатами сравнения являются:

- 1) Распределение комплексов параметров космической погоды относительно своей нормы (в силу проведенной стандартизации характеристик внешней среды, «нормой» является равенство большинства из них 0). Различие статистических характеристик выборки, образованной таким комплексом параметров, описывает и различие самих природных комплексов.
- 2) Список характеристик внешней среды, исключенных из исследования по причине их неизменности при соответствии разным категориям изучаемого события.
- 3) Список характеристик внешней среды, наиболее часто изменяющихся определенным образом при соответствии разным категориям изучаемого события.
- 4) Указания сочетаний однородных групп, для которых отмечено такое поведение указанных природных характеристик.
- 5) Показ временного хода изменения выделенных параметров от края окна метода наложения эпох до реперного дня.

3.2. Используемые в работе данные

В работе используется весь доступный комплекс параметров космической и земной погоды и, рассчитанные нами, их статистические характеристики (134 параметра и индекса):

- интегральный радиопоток от диска Солнца на волне 10,7 см [10^{-22} Вт(Гц*м²)]
- число пятен на Солнце (число Вольфа=число пятен+10*число групп пятен)
- общая площадь пятен на Солнце [миллионные доли полусферы=м.д.п.]
- количество новых пятен на Солнце
- количество рентгеновских вспышек балла С [$(1-9)*10^{-3}$ эрг/(см²*с)]
- количество рентгеновских вспышек балла М [$(1-9)*10^{-2}$ эрг/(см²*с)]
- количество рентгеновских вспышек балла Х [$\geq 10^{-1}$ эрг/(см²*с)]

- количество оптических вспышек балла s [площадь вспышки < 100 м.д.п..]
- количество оптических вспышек балла 1 [площадь вспышки (100 - 250 м.д.п..)]
- количество оптических вспышек балла 2 [площадь вспышки (250 - 600 м.д.п..)]
- количество оптических вспышек балла 3 [площадь вспышки (600-1200 м.д.п..)]
- поток электронов [$E > 0,8$ МэВ- электронов/см²*стр] за день
- поток электронов [$E > 2$ МэВ - электронов/см²*стр] за день
- поток рентгеновского излучения [(0,4 -5) Å] - максимальный за сутки
- поток рентгеновского излучения [(1-8) Å] - максимальный за сутки
- поток рентгеновского излучения [(0,4 -5) Å] - средний за сутки
- поток рентгеновского излучения [(1-8) Å] - среднее за сутки
- поток рентгеновского излучения [(1-8) Å] - суточная медиана
- поток рентгеновского излучения [(1-8) Å] - суточная медиана
- поток рентгеновского излучения [(0,4 -5) Å] - минимальный за сутки
- поток рентгеновского излучения [(1-8) Å] - минимальный за сутки
- счет нейтронного монитора [отклонение от фонового уровня]
- поток рентгеновского излучения - суточный коэффициент осцилляции
- поток рентгеновского излучения - суточный коэффициент осцилляции
- поток протонов [$E > 1$ МэВ -- протонов/см²*стр] за день
- поток протонов [$E > 10$ МэВ - протонов/cm²-day-sr]
- поток протонов [$E > 100$ МэВ - протонов/cm²-day-sr]
- поток рентгеновского излучения [(0,4 -5) Å] - суточный размах
- поток рентгеновского излучения [(1-8) Å] - суточный размах
- поток рентгеновского излучения [(0,4 -5) Å] - суточное стандартное отклонение
- поток рентгеновского излучения [(1-8) Å] - суточное стандартное отклонение
- поток рентгеновского излучения [(0,4 -5) Å] - суточная дисперсия
- поток рентгеновского излучения [(1-8) Å] - суточная дисперсия
- поток рентгеновского излучения - суточный коэффициент вариации
- поток рентгеновского излучения - суточный коэффициент вариации
- напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл] - максимальная за сутки
- напряженность геомагнитного поля на средних широтах [нТл] - максимальная за сутки
- напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл] - максимальная за сутки
- напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл] - средняя за сутки
- напряженность геомагнитного поля на средних широтах [нТл]- средняя за сутки
- напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл]- средняя

за сутки

- напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл] - средняя за сутки
- напряженность геомагнитного поля на средних широтах [нТл] - средняя за сутки
- напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл]- средняя за сутки
- напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл] - минимальная за сутки
- напряженность геомагнитного поля на средних широтах [нТл] - минимальная за сутки
- напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл] - минимальная за сутки
- напряженность геомагнитного поля на высоких широтах - суточный коэффициент осцилляции
- напряженность геомагнитного поля на средних широтах - суточный коэффициент осцилляции
- напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) - суточный коэффициент осцилляции
- напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл] - суточный размах
- напряженность геомагнитного поля на средних широтах [нТл] - суточный размах
- напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл] - суточный размах
- напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл]- суточное стандартное отклонение
- напряженность геомагнитного поля на средних широтах [нТл] - суточное стандартное отклонение
- напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) - суточное стандартное отклонение
- напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл²]- суточная дисперсия
- напряженность геомагнитного поля на средних широтах [нТл²] - суточная дисперсия
- напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл²] - суточная дисперсия
- напряженность геомагнитного поля на высоких широтах - суточный коэффициент вариации
- напряженность геомагнитного поля на средних широтах - суточный коэффициент вариации
- напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) - суточный коэффициент вариации
- нижняя облачность [баллы] - максимальная за сутки

- давление [гПа] - максимальное за сутки
- давление на уровне моря [гПа] - максимальное за сутки
- скорость ветра [м\с] - максимальное за сутки
- нижняя облачность [баллы] - средняя за сутки
- давление [гПа] - среднее за сутки
- давление на уровне моря [гПа] - среднее за сутки
- скорость ветра [м\с] - среднее за сутки
- нижняя облачность [баллы] - суточная медиана
- давление [гПа] - суточная медиана
- давление на уровне моря [гПа] - суточная медиана
- скорость ветра [м\с] - суточная медиана
- нижняя облачность [баллы] - суточная медиана
- давление [гПа] - суточная медиана
- давление на уровне моря [гПа] - суточная медиана
- скорость ветра [м\с] - суточная медиана
- нижняя облачность - суточный коэффициент осцилляции
- давление - суточный коэффициент осцилляции
- давление на уровне моря - суточный коэффициент осцилляции
- скорость ветра - суточный коэффициент осцилляции
- нижняя облачность [баллы] - суточный размах
- давление [гПа] - суточный размах
- давление на уровне моря [гПа] - суточный размах
- скорость ветра [м\с] - суточный размах
- нижняя облачность [баллы] - суточное стандартное отклонение
- давление [гПа] - суточное стандартное отклонение
- давление на уровне моря [гПа] - суточное стандартное отклонение
- скорость ветра [м\с] - суточное стандартное отклонение
- нижняя облачность [баллы^2] - суточная дисперсия
- давление [гПа^2] - суточная дисперсия
- давление на уровне моря [гПа^2] - суточная дисперсия
- скорость ветра [(м\с)^2] - суточная дисперсия
- нижняя облачность - суточный коэффициент вариации
- давление - суточный коэффициент вариации
- давление на уровне моря - суточный коэффициент вариации
- скорость ветра - суточный коэффициент вариации
- дефицит температуры точки росы [градусы] - максимальный за сутки
- относительная влажность [%] - максимальная за сутки
- температура точки росы [градусы] - максимальная за сутки
- дефицит температуры точки росы [градусы] - средний за сутки
- относительная влажность [%] - средняя за сутки
- температура точки росы [градусы] - средняя за сутки
- дефицит температуры точки росы [градусы] - суточная медиана
- относительная влажность [%] - суточная медиана
- температура точки росы [градусы] - суточная медиана

- дефицит температуры точки росы [градусы] - минимальный за сутки
- относительная влажность [%] - минимальная за сутки
- температура точки росы [градусы] минимальная за сутки
- дефицит температуры точки росы - суточный коэффициент осцилляции
- относительная влажность - суточный коэффициент осцилляции
- температура точки росы - суточный коэффициент осцилляции
- дефицит температуры точки росы [градусы] - суточный размах
- относительная влажность [%] - суточный размах
- температура точки росы [градусы] - суточный размах
- дефицит температуры точки росы [градусы]- суточное стандартное отклонение
- относительная влажность [%] - суточное стандартное отклонение
- температура точки росы [градусы] - суточное стандартное отклонение
- дефицит температуры точки росы [градусы²] - суточная дисперсия
- относительная влажность [%²] - суточная дисперсия
- температура точки росы [градусы²] - суточная дисперсия
- дефицит температуры точки росы - суточный коэффициент вариации
- относительная влажность - суточный коэффициент вариации
- температура точки росы - суточный коэффициент вариации
- температура воздуха [градусы] - максимальная за сутки
- температура воздуха [градусы] - средняя за сутки
- температура воздуха [градусы] - суточная медиана
- температура воздуха [градусы] - минимальная за сутки
- температура воздуха - суточный коэффициент осцилляции
- температура воздуха [градусы] - суточный размах
- температура воздуха [градусы] - суточное стандартное отклонение
- температура воздуха [градусы²] - суточная дисперсия
- температура воздуха - суточный коэффициент вариации

Источники данных:

1. Данные по приземной барике получены из архива “Обь-Иртышского” управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

3. Данные по солнечной активности и вариациям ГМП были предоставлены всемирным центром NOAA в Боулдере (шт. Колорадо, США) (www.swpc.noaa.gov/today.html).

3.3. Результаты исследования одновременной изменчивости атмосферной циркуляции и космической погоды в районе г. Омска

Предприняты попытки поиска возможной связи между вариациями характеристик космической погоды (КП) и синоптической ситуацией в г. Омске.

В работе использованы данные за 2006-2007 гг. (минимум Солнечной активности (СА) между 23 и 24 циклами СА) и 2017-2018 г.г. (минимум СА между 24 и 25 циклами) (рис. 3.1).

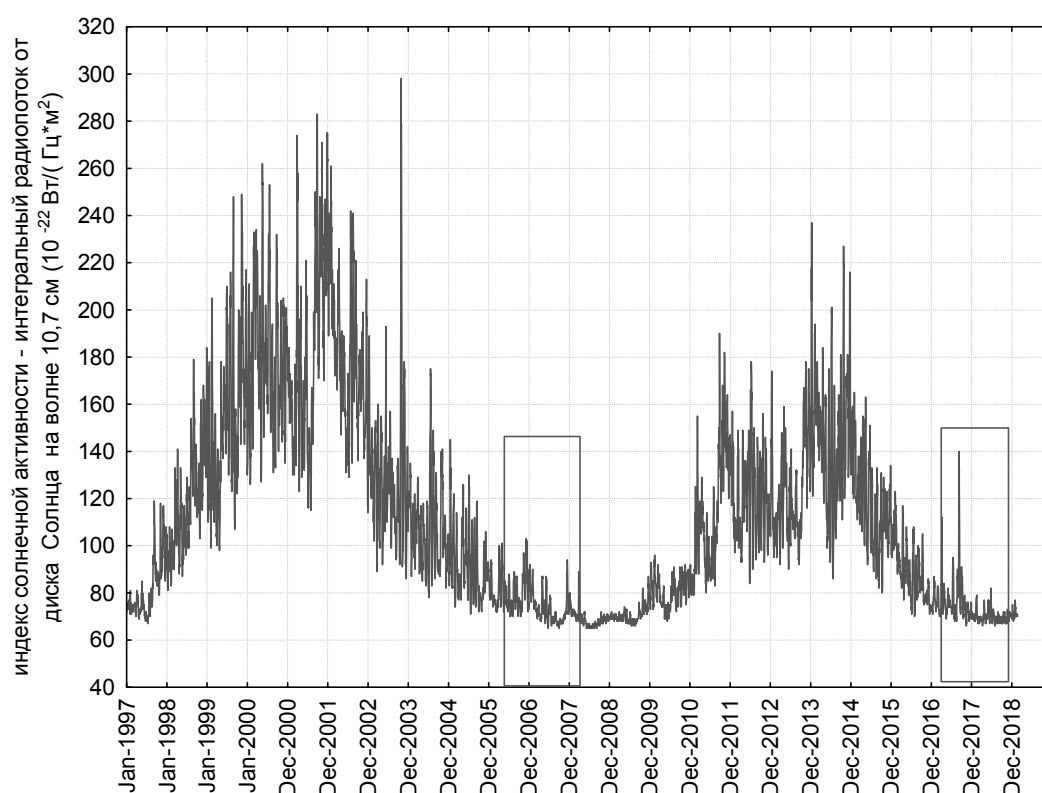


Рис. 3.1. Изменение индекса солнечной активности – величины интегрального радиопотока от диска солнца на длине волны 10,7 см (10^{-22} Вт/(Гц $\times$ м 2)).

Красным цветом выделены рассматриваемые нами периоды

Результаты анализа синоптической информации позволили увидеть повторяемость различных видов барических образований (рис. 3.2.).

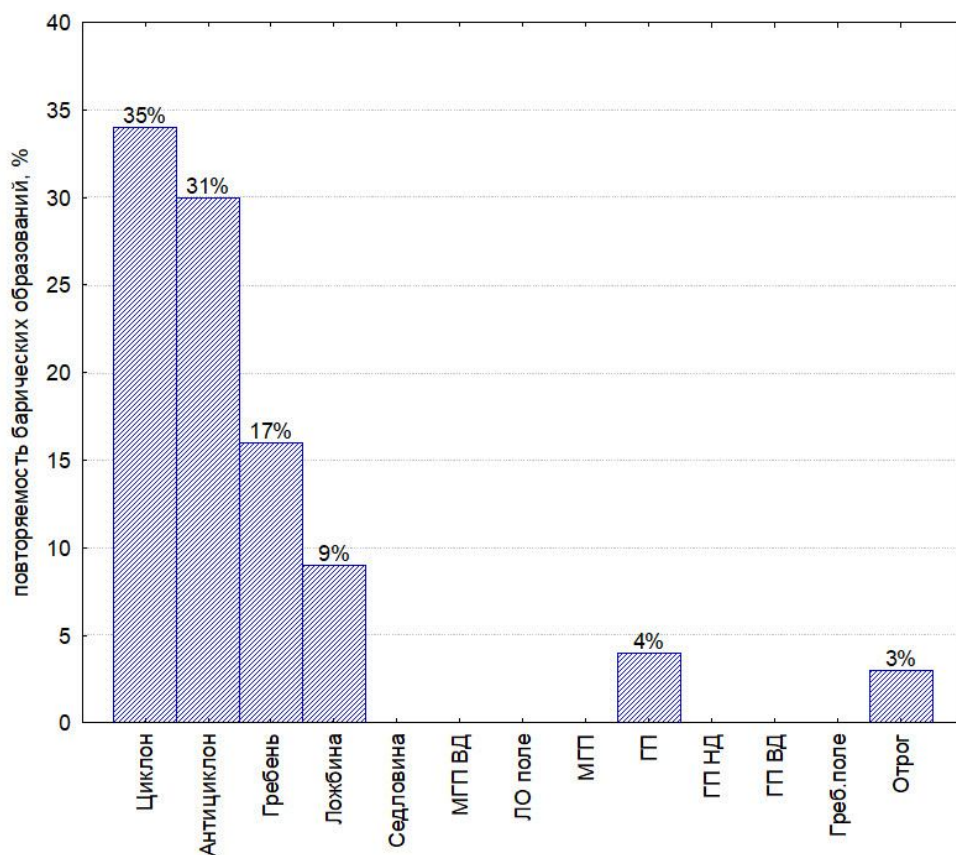


Рис. 3.2. Распределение количества конкретных барических образований в атмосфере г. Омска в исследованные временные интервалы

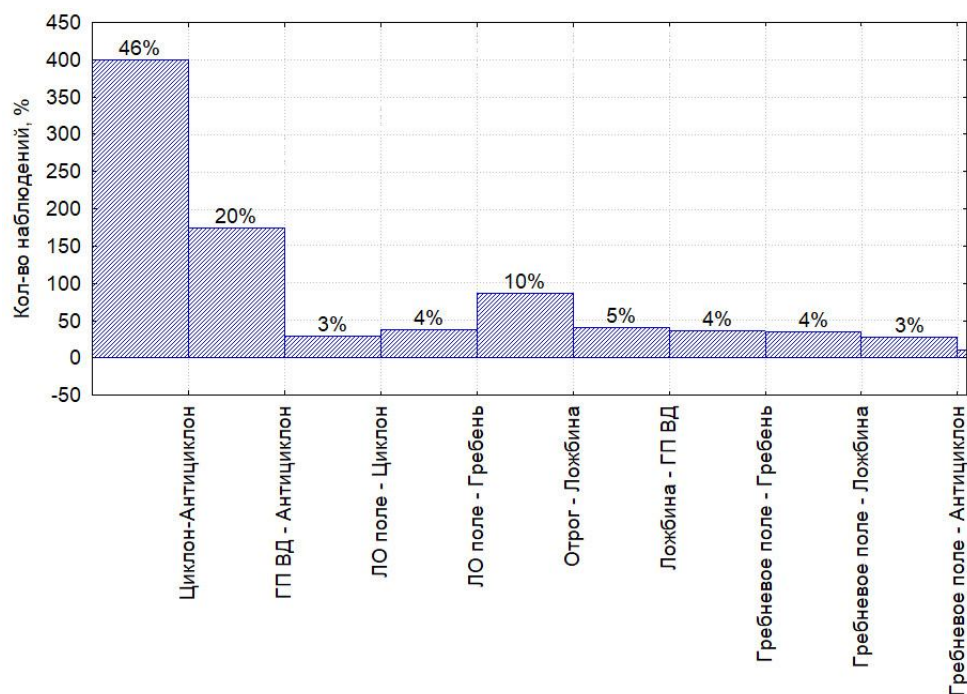


Рис. 3.3. Смена барических образований за 2006-2007 гг. и 2017-18 гг

Интересно было отметить что при максимальной повторяемости циклонов, в рассматриваемые периоды времени, вслед за циклонической циркуляцией атмосферы приходит антициклон.

Для дальнейшего исследования выбраны периоды сохранения различных барических образований в атмосфере г. Омска (рис. 3.4.):

- а. Длительное сохранение (от 7 до 10 дней);
- б. Длительная неустойчивость (ежедневная смена образований в течение периода от 7 дней (более или равно 7 дням));
- с. Естественный синоптический период (от 5 до 7 дней) (ЕСП).

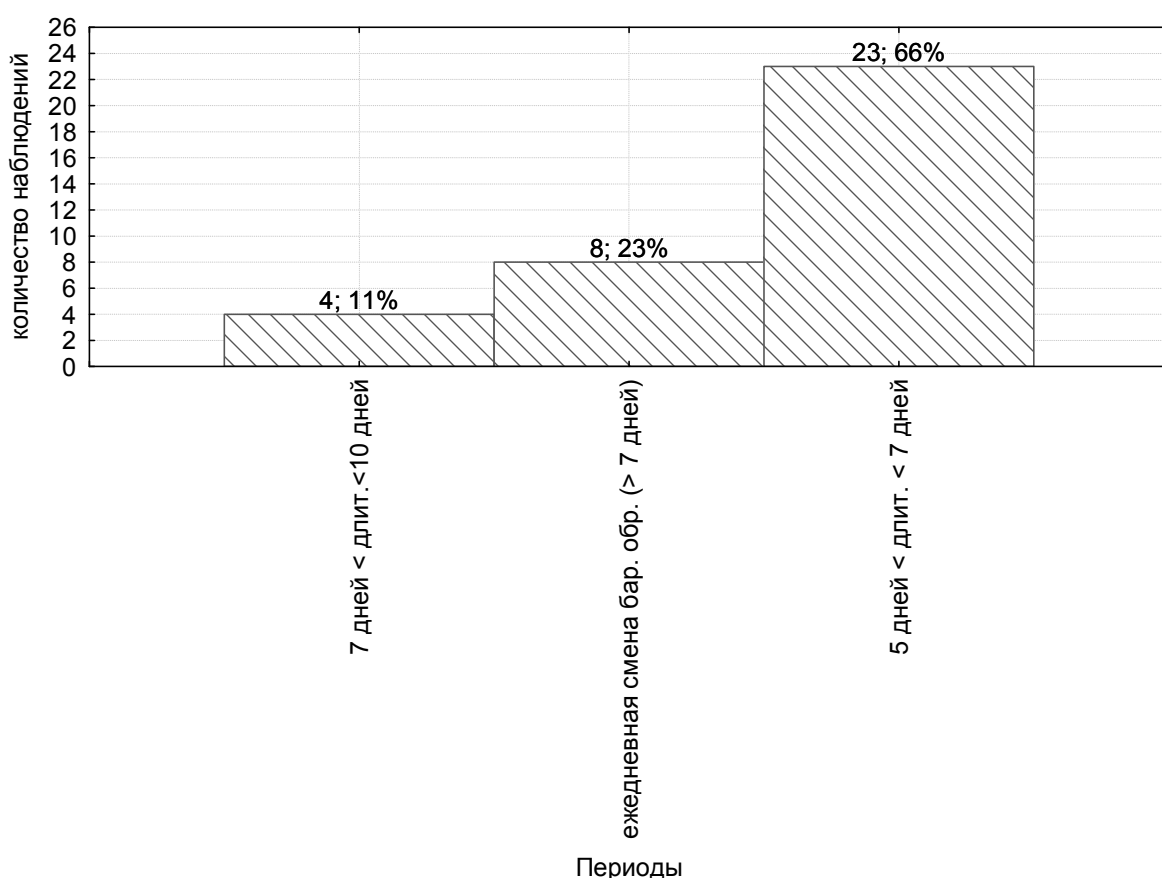


Рис. 3.4. Распределение временных периодов сохранения различных барических образований в атмосфере г. Омска в исследованные временные интервалы

Анализ данных показал, что в рассматриваемые периоды времени не наблюдались случаи устойчивости барических образований. Для дальнейших исследований рассмотрены случаи длительной неустойчивости (ДН) барических образований. Далее работа проводилась в следующей последовательности:

- Рассматриваются моменты начала и конца явлений.
- Проведено сравнение поведения и состояния характеристик КП в день начала и день конца и в период перед этими днями.
- Проведено сравнение метеопараметров в день начала и день конца и в период перед этими днями.

Отбирались явления ДН, наблюдавшиеся в один и тот же календарный сезон, что обеспечивало выполнять анализ результатов при

- одинаковой фазе цикла СА,
- одинаковом сезоне года.

В результате рассмотрены следующие случаи длительной неустойчивости:

Таблица. 3.1. Начало и конец периодов длительной неустойчивости (7 пар моментов времени):

	Начало неустойчивости	Конец неустойчивости
весна 2006	26/03/06	03/04/06
весна 2018	30/04/18	06/05/18
зима 2006-2007	24/01/07	01/02/07
зима 2017-2018	31/12/17	07/01/18
	10/01/18	16/01/18
лето 2006	08/06/06	17/06/06
лето 2017	22/06/17	07/07/17

Не все рассматриваемые явления ДН были проанализированы в данной работе и приведены в таблице, т.к. один период ДН переходил из одного сезона в другой. Исследование проводилось в соответствии с описанной выше методикой.

В результате получено следующее:

1. Определено распределение барических образований, с которых начинались периоды длительной неустойчивости (рис. 3.5.).

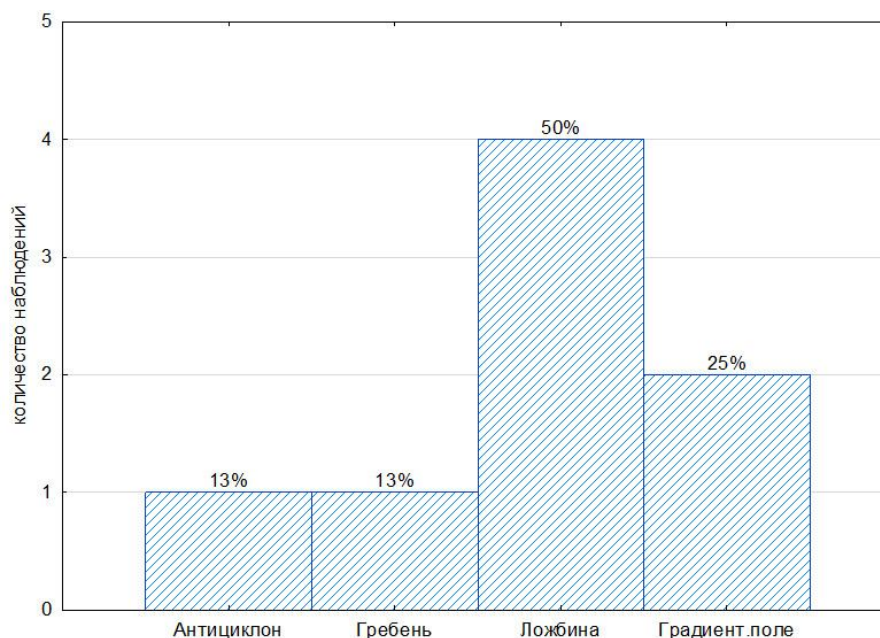


Рис. 3.5. Повторяемость барических образований перед началом длительной неустойчивости

В большинстве (50%) случаев перед образованием длительной неустойчивости наблюдалась ложбина.

Сравнение барических образований до начала и перед концом длительной неустойчивости показало, что в большинстве случаев перед концом длительной неустойчивости в большинстве случаев погоду определял гребень, в меньшей степени циклон.

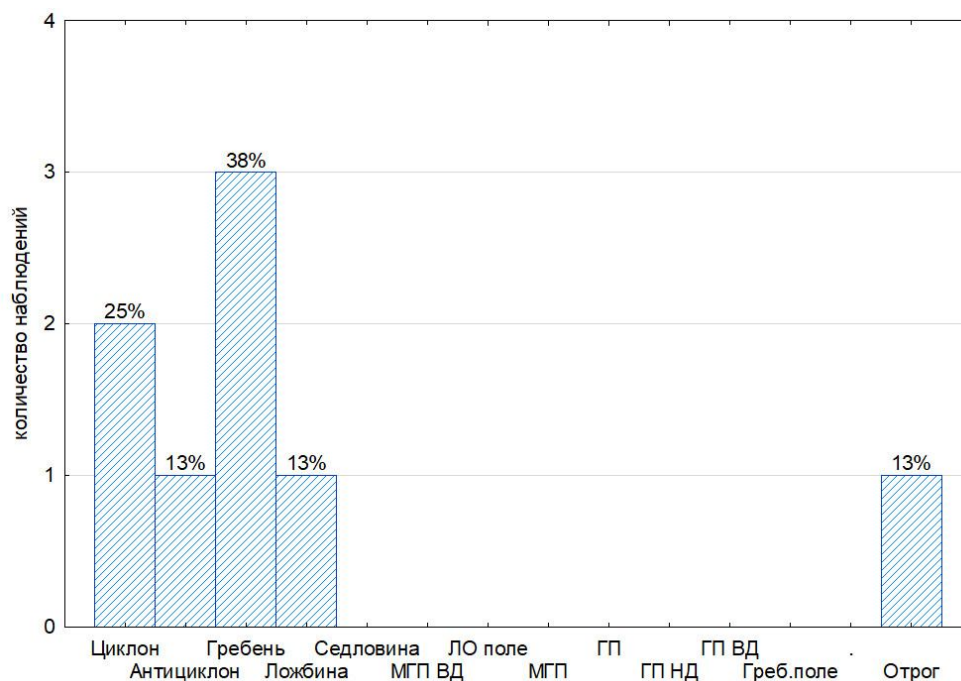


Рис. 3.6. Распределение барических образований, которыми кончались периоды длительной неустойчивости

Следующим шагом исследования мы рассмотрели все характеристики КП независимо от сезона в дни начала и конца образования длительной неустойчивости. В этом случае наблюдалась некоторое различие всех комплексов характеристик, но это различие не очень достоверно (вероятность различия 65%). Тенденция различия в комплексе КП просматривается при конце периода длительной неустойчивости. Отмечалось больше параметров, превышающих свою сезонную медиану.

Чтобы узнать достоверность различия выборок (начала неустойчивости и конца неуст.) применён метод проверки гипотез Kruskal-Wallis (рис. 3.7.).

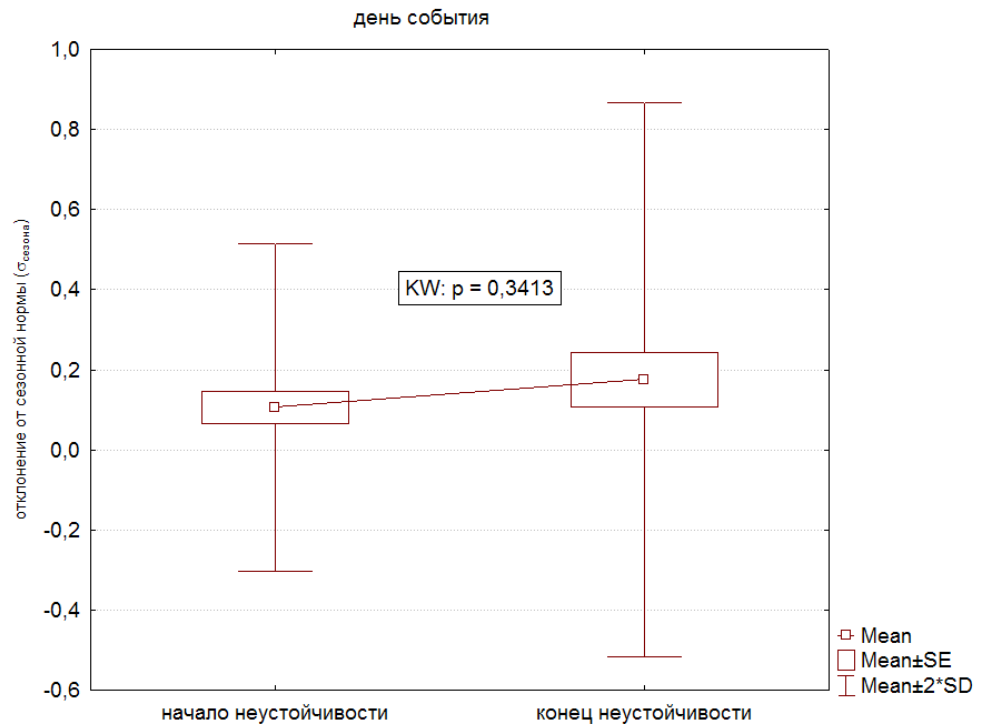


Рис. 3.7. Распределение параметров космической погоды до начала и перед концом длительной неустойчивости барических образований

Нет ни одного параметра КП, который находился бы в одном и том же состоянии относительно своей сезонной медианы при соответствии разным моментам времени (началам и концам длительной неустойчивости) во все календарные сезоны одинаково (т.е. если при рассмотрении не учитывалось разделение на сезоны).

Некоторые метеопараметры, характерные для начала или для конца длительной неустойчивости, оказывались в одном состоянии перед началами и в другом состоянии перед концами исследуемых периодов во всех исследованных календарных сезонах одинаково. Метеопараметры, их состояние и день перед началом или концом исследуемого периода длительной неустойчивости указаны в рис. 3.8.

Начало:											
	-10 день	-9 день	-8 день	-7 день	-6 день	-5 день	-4 день	-3 день	-2 день	-1 день	0 день
нижняя облачность [баллы] - максимальная за сутки				=нор ме							=нор ме
общая облачность [баллы] - средняя за сутки		<нор мы									
общая облачность [баллы] - суточная медиана		<нор мы							<нор мы		
скорость ветра [м/с] - суточная медиана							=нор ме				
температура точки росы [градусы] максимальная за сутки							>нор мы				

Конец:											
	-10 день	-9 ден ь	-8 ден ь	-7 день	-6 ден ь	-5 ден ь	-4 ден ь	-3 ден ь	-2 день	-1 день	0 ден ь
общая облачность [баллы] - максимальная за сутки					=нор ме	=нор ме	=нор ме			=нор ме	=нор ме
общая облачность [баллы] - суточная медиана				<нор мы							
скорость ветра [м/с] - суточное стандартное отклонение										>нор мы	
температура точки росы - суточный коэффициент осцилляции									>нор мы		
температура точки росы [градусы] - суточный размах									>нор мы		
температура точки росы [градусы] - суточное стандартное отклонение									>нор мы		
температура точки росы - суточный коэффициент вариации									>нор мы		

Рис. 3.8. Сравнение метеорологических параметров в дни перед началом и концом ДН

Интересно рассмотреть поведения параметров природной среды по методу наложения эпох.

До начала неустойчивости балл облачности был изменчив и в основном не достигал своей нормы. В день начала неустойчивости максимальный за сутки балл облачности был в норме. К концу периода неустойчивости общая облачность стремится к своей сезонной норме, независимо от сезона. Таким образом, балл облачности перед днями начала и конца неустойчивости значительно различались (рис. 3.9.).

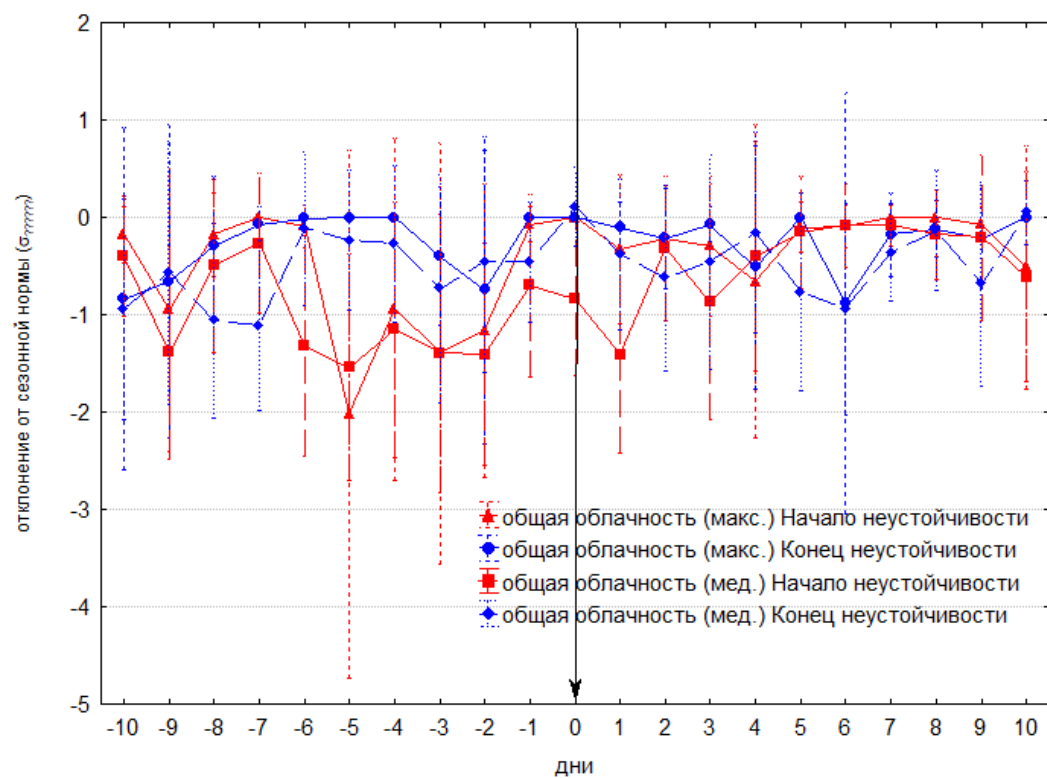


Рис. 3.9. Изменчивость балла общей облачности за +/- 10 дней
от начала и конца ДН

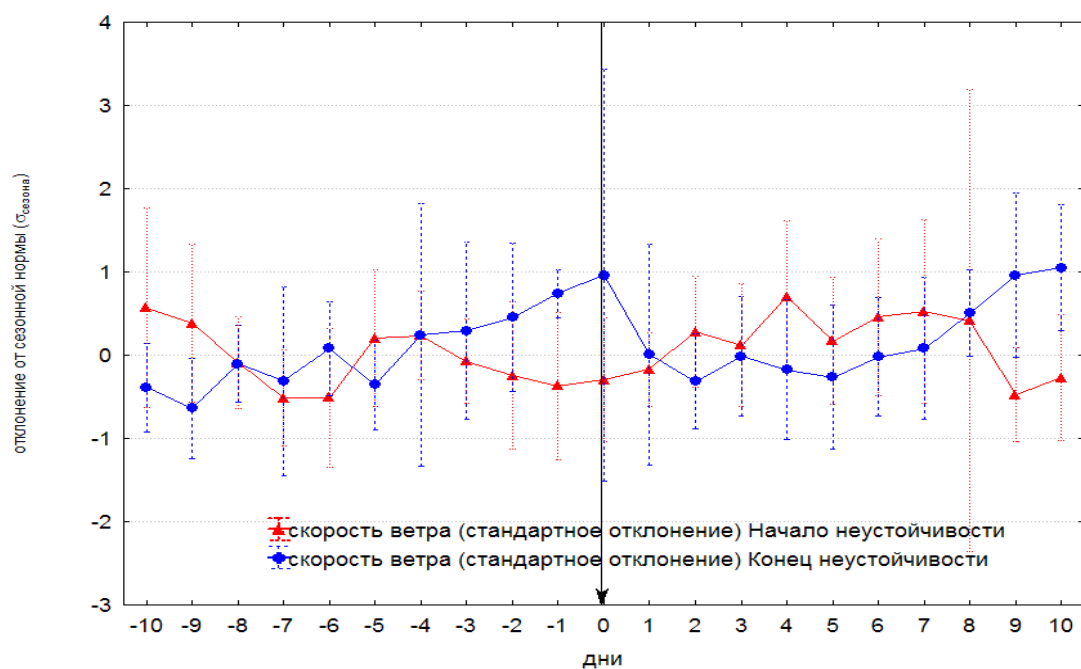


Рис. 3.10. Изменчивость скорости ветра за +/- 10 дней
от начала и конца ДН

Изменчивость скорости ветра до начала (за 4 дня) периода неустойчивости была меньше каждой сезонной нормы, независимо от сезона. Перед концом периода неустойчивости изменчивость ветра росла, достигая максимальное значение в одно сезонное СКО в день конца периода. Таким образом, характеристики ветра перед днями начала и конца неустойчивости значительно различались (рис. 3.10.).

В дальнейшем изменчивость всех параметров рассматривалась с учётом сезона года. При разделении исследуемого материала на календарные сезоны удастся выделить характерные дни, в которые состояние конкретных параметров КП повторяется при повторении сезонов.

Как оказалось, различие полных комплексов КП не очень достоверно весной 2006, 2018 гг. (вероятность различия 65% - она и дала общую недостоверность различия при рассмотрении всех сезонов вместе), но тенденция различия просматривается: при конце периода длительной неустойчивости в комплексе КП больше параметров, превышающих свою сезонную медиану (рис. 3.11.).

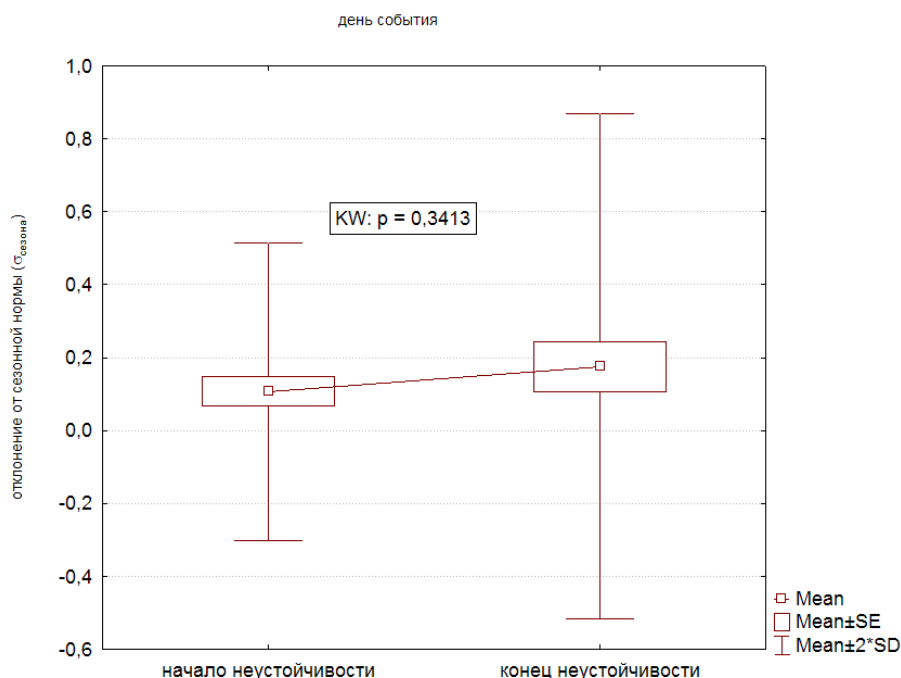


Рис. 3.11. Распределение параметров космической погоды до начала и перед концом длительной неустойчивости барических образований
каждую весну

При рассмотрении характерных дней одинакового (для указанных весенних периодов) состояния выделяются параметры КП в сравнении с нормой (рис. 3.12., рис. 3.13.).

	-10 ден ь	-9 ден ь	-8 ден ь	-7 ден ь	-6 ден ь	-5 ден ь	-4 ден ь	-3 ден ь	-2 ден ь	-1 ден ь	0 ден ь
поток электронов [E>0,8 МэВ- электронов/см ² *стр] за день					>но рмы						
поток электронов [E>2 МэВ - электронов/см ² *стр] за день	=нор ме										
поток рентгеновского излучения [(0,4 -5) А] - средний за сутки					>но рмы						
поток рентгеновского излучения - суточный коэффициент осцилляции					=но рме						
напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл] - максимальная за сутки				>но рмы							
напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл] - максимальная за сутки				>но рмы						=но рме	
напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл] - средняя за сутки	>нор мы										
напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл]- средняя за сутки	>нор мы										
напряженность геомагнитного поля на средних широтах - суточный коэффициент осцилляции	<нор мы										
напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл] - суточный размах										=но рме	
напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл ²]- суточная дисперсия	>нор мы										

Рис. 3.12. Сравнение параметров КП в дни перед началом ДН для каждой весны

	-10 ден ь	-9 ден ь	-8 ден ь	-7 ден ь	-6 ден ь	-5 ден ь	-4 ден ь	-3 ден ь	-2 ден ь	-1 ден ь	0 ден ь
поток электронов [E>2 МэВ - электронов/см ² *стр] за день	>нор мы										
поток рентгеновского излучения [(0,4 -5) А] - средний за сутки					<но рмы						
поток рентгеновского излучения - суточный коэффициент осцилляции					<но рмы						
поток протонов [E>100 МэВ - протонов/cm2-day-sr]									>но рмы		
напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл] - максимальная за сутки				=но рме							
напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл] - максимальная за сутки				=но рме							
напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл] - средняя за сутки	<нор мы										
напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл]- средняя за сутки	<нор мы										
напряженность геомагнитного поля на средних широтах - суточный коэффициент осцилляции	>нор мы										
напряженность геомагнитного поля планетарная (расчетная) [нТл] - суточный размах	=нор ме										
напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл ²]- суточная дисперсия	<нор мы										

Рис. 3.13. Сравнение параметров КП в дни перед концом ДН для каждой весны

В летний период различие полных комплексов КП более достоверно (вероятность различия 85%), чем веснами, тенденция различия также просматривается. При конце периода длительной неустойчивости в комплексе КП больше параметров, близких к своей сезонной медиане (рис.3.14).

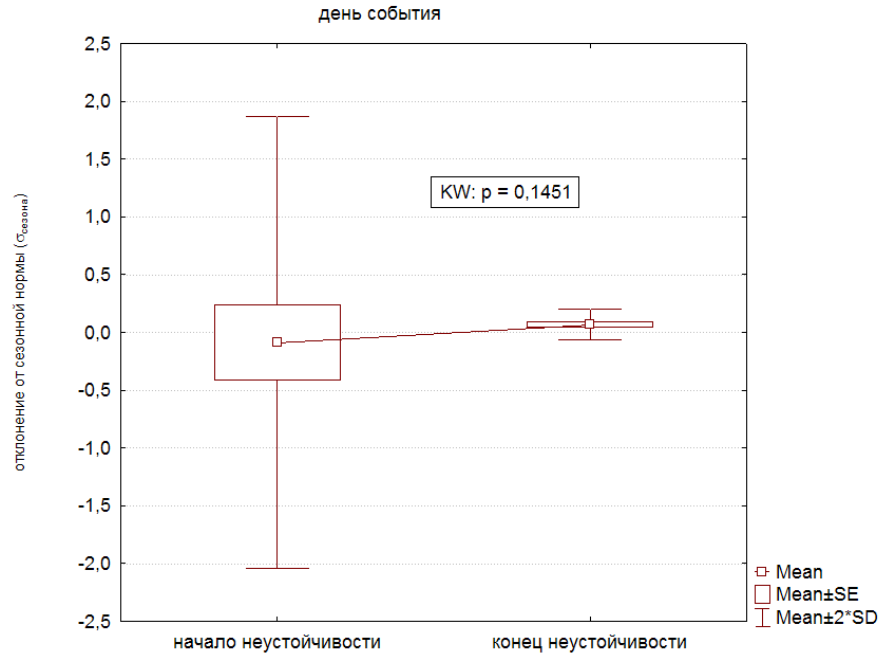


Рис. 3.14. Распределение параметров космической погоды до начала и перед концом длительной неустойчивости барических образований каждое лето

При рассмотрении характерных дней одинакового (для указанных летних периодов) состояния выделяются параметры КП (рис. 3.15.).

Начало:

	-10 день	-9 день	-8 день	-7 день	-6 день	-5 день	-4 день	-3 день	-2 день	-1 день	0 день
поток электронов [E>0,8 МэВ-электронов/см^2*стр] за день	<нормы										

Конец:

	-10 день	-9 день	-8 день	-7 день	-6 день	-5 день	-4 день	-3 день	-2 день	-1 день	0 день
поток протонов [E>100 МэВ - протонов/cm2-day-sr]		<нормы									
напряженность геомагнитного поля на средних широтах - суточный коэффициент осцилляции	<нормы										

Рис. 3.15. Сравнение параметров КП в дни перед началом и концом ДН в оба лета

В зимний период различие полных комплексов КП достоверно (вероятность различия 95%), тенденция различия по-прежнему просматривается: при конце периода длительной неустойчивости в комплексе КП больше параметров, превышающих свою сезонную медиану (рис. 3.16.).

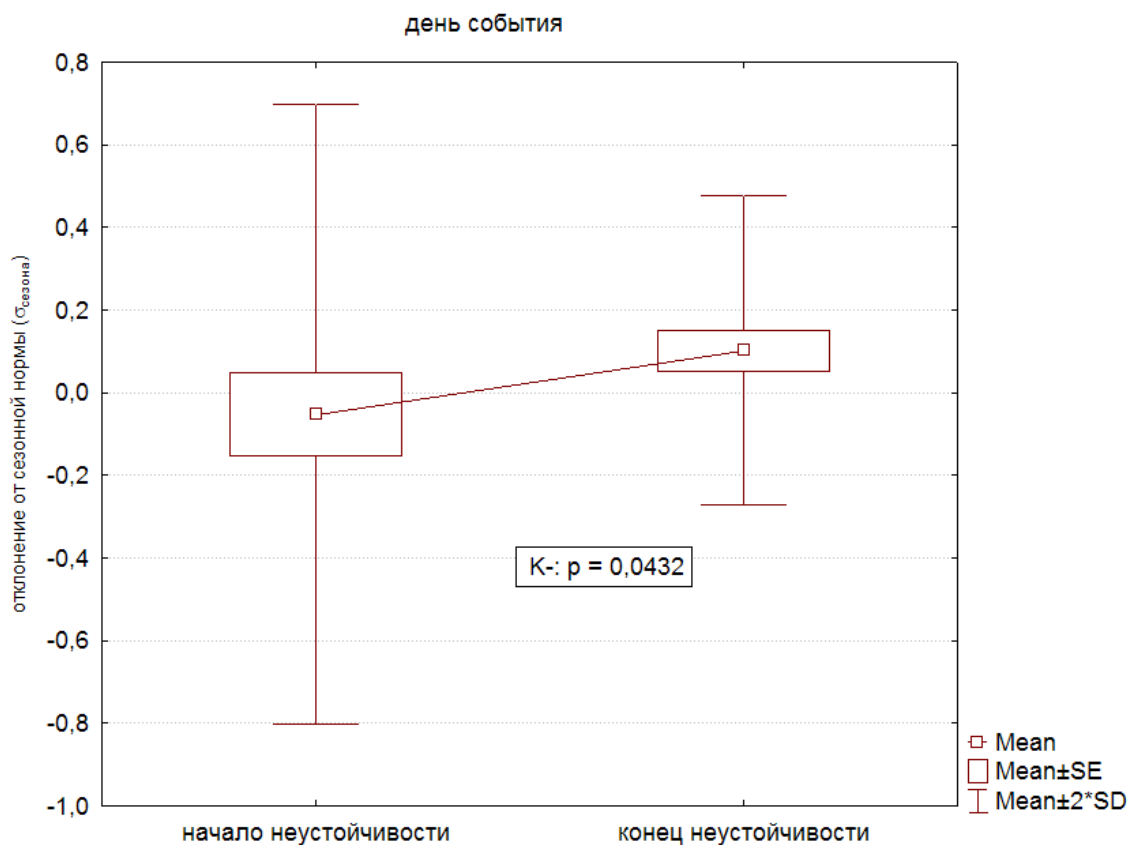


Рис. 3.16. Распределение параметров космической погоды до начала и перед концом длительной неустойчивости барических образований
каждую зиму

При рассмотрении характерных дней одинакового (для указанных зимних периодов) состояния выделяются параметры КП (рис. 3.17.).

Начало:

	-10 ден ь	-9 ден ь	-8 ден ь	-7 ден ь	-6 ден ь	-5 ден ь	-4 ден ь	-3 ден ь	-2 ден ь	-1 ден ь	0 ден ь
напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл ²]- суточная дисперсия											<но рмы
напряженность геомагнитного поля на средних широтах - суточный коэффициент вариации				<но рмы							

Конец:

	-10 ден ь	-9 ден ь	-8 ден ь	-7 ден ь	-6 ден ь	-5 ден ь	-4 ден ь	-3 ден ь	-2 ден ь	-1 ден ь	0 ден ь
напряженность геомагнитного поля на высоких широтах [нТл ²]- суточная дисперсия											>но рмы
напряженность геомагнитного поля на средних широтах - суточный коэффициент вариации				>но рмы							

Рис. 3.17. Сравнение параметров КП в дни перед началом и концом ДН
во все зимы

При рассмотрении характерных дней одинакового (для периодов указанных отдельных календарных сезонов) состояния выделяются КП параметры:

- 1) во все 3 сезона – напряженность геомагнитного поля на средних широтах - суточный коэффициент вариации,
- 2) в 2 сезона (весны и лета) – потоки электронов слабых энергий:
 - поток электронов [$E > 0,8$ МэВ- электронов/см²×стр] за день
 - поток электронов [$E > 2$ МэВ - электронов/см²×стр] за день

Следовательно, интересно посмотреть изменчивость этих параметров на всем промежутке метода наложенных эпох (рис. 3.18.).

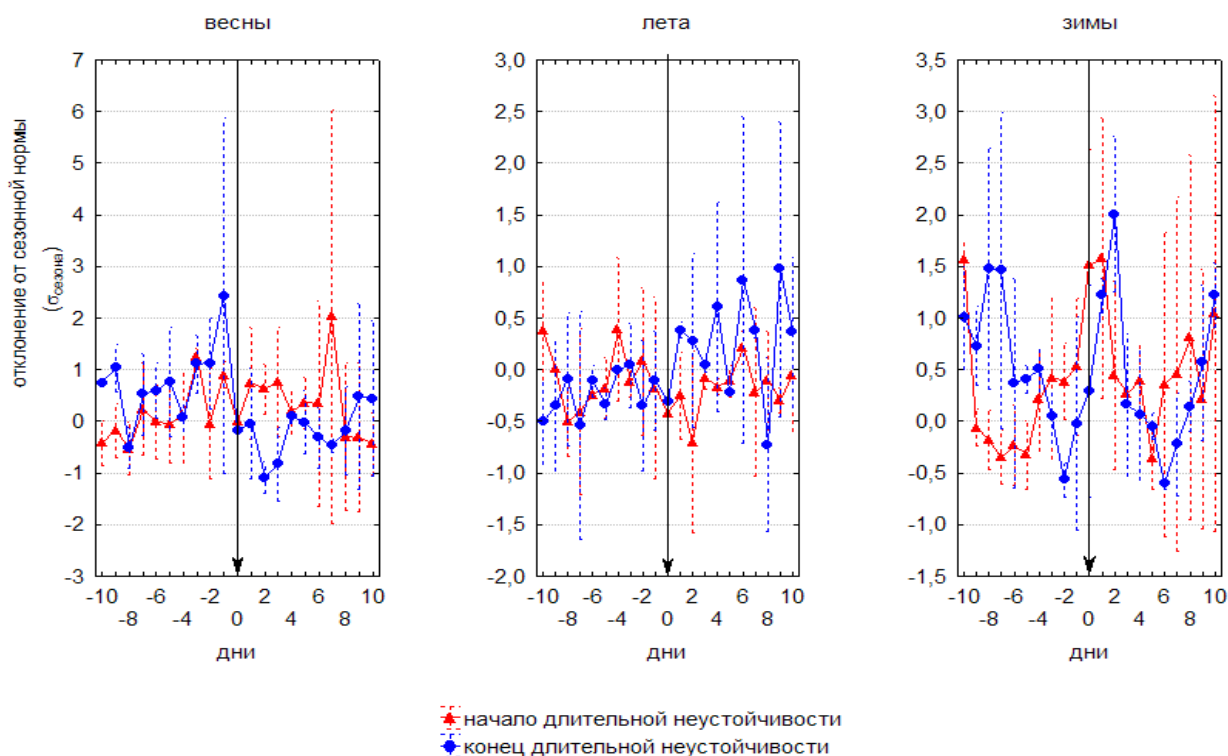


Рис. 3.18. Изменение суточного коэффициента осцилляции напряженности геомагнитного поля на средних широтах, относительно дня начала и конца ДН в разные сезоны

Как видно из рисунка, моменты начала и конца периодов длительной неустойчивости совпадают с изменением такой характеристики разброса геомагнитного поля на средних широтах, как коэффициент осцилляции, т.е. изменчивости:

- Весной 2006 и весной 2018 г.г
 - при начале периода неустойчивости разброс этого параметра делает скачок, образуя локальный минимум (до сезонной медианы) на фоне повышенного значения этой величины,
 - тогда как за 2 дня до конца этого периода разброс начинает уменьшаться.

- Летом 2006 и летом 2017 г.г.
 - в момент начала периода неустойчивости тоже отмечается скачок (локальный минимум) разброса напряженности геомагнитного поля на средних широтах, хотя, в отличие от весен, этот скачок происходит на фоне тенденции уменьшения указанной величины.
 - перед концом периода так же, как и веснами, уменьшается указанная величина, а затем, сразу после окончания периода неустойчивости начинается ее рост.
- Зимой 2006-2007 и зимой 2017-2018 такой же локальный минимум отмечается за 2 дня до начала периода неустойчивости, а характерное противонаправленное изменение начинается за 4 дня до исследуемых моментов

Вышеотмеченные особенности позволяют сделать вывод о возможности предсказания начала и конца периода длительной атмосферной неустойчивости при наблюдении за вариабельностью напряженности геомагнитного поля на средних широтах.

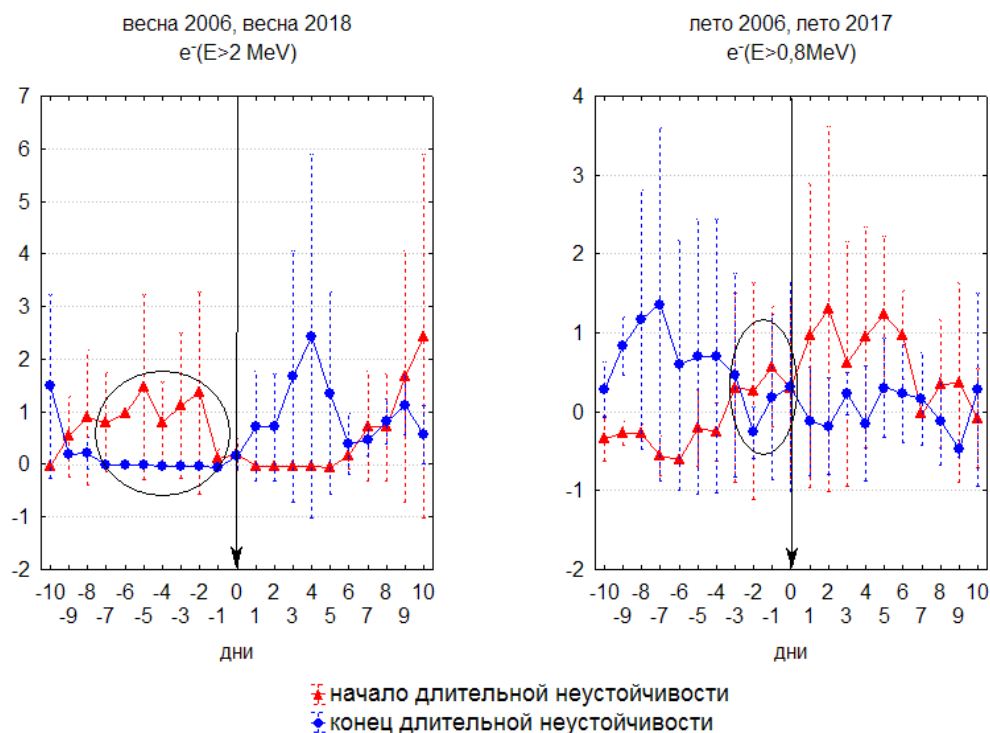


Рис. 3.19. Изменение потоков электронов относительно дня начала и конца ДН весной и летом

Как видно из рис. 3.19., перед началом периода длительной атмосферной неустойчивости (за 8-5 дней) отмечается стабильный рост суммарной суточной величины потоков электронов с энергией больше 0,8 МэВ и больше 2 МэВ, тогда как перед концом указанного периода величины потоков не превышают своей сезонной медианы (начиная, с (-7)-дня для потоков электронов с энергией больше 2 МэВ; начиная с (-2)-дня потоков электронов с энергией больше 0,8 МэВ).

Возможно, следует рассмотреть связь между изменениями потоков электронов околоземном пространстве и возмущениями (в смысле суточного разброса) геомагнитного поля на средних широтах. Этот вопрос в данной работе не рассматривается.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрена повторяемость барических образований при минимуме двух циклов солнечной активности (23-й и 24-й циклы). Исследование одновременной изменчивости параметров космической и земной погоды в периоды образования длительной неустойчивости, в разные сезоны года позволили определить возможность связи характеристик космической погоды с вариациями циркуляции атмосферы.

Схожесть тенденции превышения уровня сезонной медианы полным комплексом космической погоды в разные сезоны (но с разной достоверностью) указывает на возможность общей закономерности такого различия.

Однако, для каждого из изученных сезонов отмечались характерные только для этого сезона параметры космической погоды, превышавшие сезонный уровень.

Сходство поведения отмечено только для потока слабознергичных электронов в окрестностях Земли и коэффициента осцилляции напряженности геомагнитного поля.

Продолжение исследований одновременной изменчивости параметров космической и земной погоды при различных событиях в атмосфере позволит выбрать предикторы из параметров внешней среды для уточнения синоптического прогноза погоды.

Список литературы

1. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 414 с.
2. Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли. Л.: Гидрометеониздат, 1976. 352 с.
3. Харгривс Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 352 с.
4. Кипенхойер К.О. Солнечная активность: Глава 6: Солнце. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. С. 282–377.
5. Wolf R. // Astron. Mitt. Zurich. 1856. № 1. 8 p.
6. Додсон-Принс Х.В., Бруцен А. Вспышки и связанные с ними явления // Солнечная и солнечно-земная физика: Ил. слов. терминов / Ред. А.Бруцек, Ш.Дюран. М.: Мир, 1980. С. 85–99.
7. Hale G.E. Preliminary results of an attempt to detect the general magnetic field of the sun // Astrophys. J. 1913. V. 38. P. 27–98.
8. Свалгард Л. Солнечный ветер и межпланетная среда // Солнечная и солнечно-земная физика: Ил. слов. терминов / Ред. А.Бруцек, Ш.Дюран. М.: Мир, 1980. С. 148–158.
9. Penn M.J., Livingston W. Long-term evolution of sunspot magnetic field. //Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium. - 2011. - Vol.273. - P.126-133.
10. Choudhuri A.R. Prospects for predicting cycle 24. //Journal of Astrophysics and Astronomy. - 2008. - Vol.29, no.1-2. - P.41-47.
11. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Некоторые аномалии эволюции глобальных и крупномасштабных магнитных полей на Солнце как предвестники нескольких предстоящих невысоких циклов // Письма в АЖ. 2009. Т. 35, № 4. С. 279–285.
12. Ишков В.Н. Текущий момент развития 24 цикла солнечной активности // Астрономический циркуляр. 2013. № 1595. С.1 – 8.

13. Ишков В.Н. Начальный период наступившей эпохи «пониженной» солнечной активности: текущий 24-й цикл в развитии // 12 ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 06-10 февраля 2017 г. ИКИ РАН. Сборник тезисов. Москва. 2017. С. 15.
14. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 313–314.
15. Кузнецов В. Д. Солнечные источники космической погоды «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле: Труды Международной конф.», 4 - 8 июня 2013 Т. 1 (Под ред. А И Григорьева, Л М Зеленого) (М.: ИКИ РАН, 2013) с. 11-28.
16. Обридко В.Н., Мирошниченко Л.И., Рагульская М.В., Хабарова О.В., Храмова Е.Г., Кацова М.М., Лившиц М.А. Космические факторы эволюции биосферы: новые направления исследований // Проблемы эволюции биосферы. Серия «Гео-биологические системы в прошлом». - М.: ПИН РАН, 2013. - С. 66–94.
17. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 313–314.
18. Десслер А.Дж., Брайан Б.Дж. Проникающее корпускулярное излучение // Околоземное космическое пространство: Справ. данные / Ред. Ф.С. Джонсон. М.: Мир, 1966. С. 58–104.
19. Физический словарь. В 5 т. / Гл. ред. П.Н. Беликов. М.: ОНТИ НКТП СССР, гл. редакция энцикл. и словарей, 1937. Т. 3. С. 142–146
20. Патель В.Л. Солнечно-земная физика: Слов. терминов / Ред. А.Бруцек, Ш.Дюран // Солнечная и солнечно-земная физика. М.: Мир, 1980. С. 159–205.
21. С.В. Анисимов, Е.А. Мареев. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика земли, 2008, № 10, с. 8-18.
22. Е.А. Мареев, В.Н. Стасенко, А.А. Булатов. Российские исследования атмосферного электричества в 2011-2014 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2016, том 52, №2, с. 175-186.

23. Davydenko S.S., Mareev E.A., Marshall T.C., Stolzenburg M. On the calculation of electric fields and currents of mesoscale convective systems and their influence on the global electric circuit. Proc. of 12-th International Conference on Atmospheric Electricity. 2003. P. 697–700.
24. Roble R.G., Tzur I. The Global Atmospheric-Electrical Circuit, in: The Earth's Electrical Environment / Krider E.P. and Roble R.G. Washington: Natl. Acad. Press, 1986. P. 206–231.
25. В.П. Закусилов, П.В. Закусилов. Использование компонентного анализа для характеристики атмосферной циркуляции над заданным географическим районом. Вестник ВГУ, серия: география. Геоэкология, 2009, №2. С. 67-71.
26. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1973. 616 с.
27. Лоренц Э.Н. (1970) Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1970. 260 с.
28. С. В. Веретененко, И. В. Артамонова. Влияние форбуш-понижений галактических космических лучей на развитие антициклонической активности в умеренных широта // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 5. С. 747–749.
29. Чемберлен Дж. (1981) Теория планетных атмосфер. М.: Мир, 1981. 352 с.
30. Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. — Л.: Гидрометеониздат, 1974. — 485 с.
31. А.И. Савичев, Н.П. Мироничева, В.Ю. Цепелев. Особенности колебаний атмосферной циркуляции в атлантико-евразийском секторе полушария за последние десятилетия // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2015 №39. С. 120-131.
32. Модели общей циркуляции атмосферы /Под ред. Ю. Чанга. перевод под ред. С.А. Маликовича. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 350с.

33. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / отв. ред. А.Б. Шмакин; Российская акад. наук, Ин-т географии. – М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
34. Дзердзеевский Б.Л. 1968. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии. В кн.: Материалы метеорологических исследований. М., 240.
35. Кононова Н.К. Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария в конце XX — начале XXI века и их отражение в климате // Сложные системы, 2014 г., №2. С. 11-35.
36. Кононова Н.К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария вXX — XX столетия и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология, 2015 г., №1. С. 1331-162.
37. А.И. Савичев, В.Ю. Цепелев. Прогнозы погоды на месяц по методу типовых макропроцессов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, серия метеорология, 2008, №8. С. 62-81.
38. Швер Ц.А. Климат Омска // Л.: Гидрометеониздат, 1980. — 246 с.