

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А. Д. КУЗНЕЦОВ, В. Ф. ЛОГИНОВ

КОСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АТМОСФЕРУ

*Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности
«Метеорология»*

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА

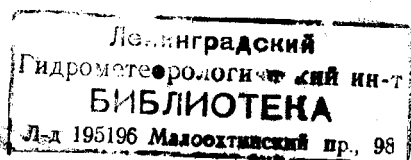
ЛЕНИНГРАД
1984

Кузнецов А. Д., Логинов В. Ф. Космические воздействия на атмосферу. — Л., изд. ЛПИ, 1984. — с. 160. (ЛГМИ).

Рецензенты: кафедра метеорологии Ленинградского военного инженерного морского училища им. адмирала С. О. Макарова; член-кор. АН СССР К. Я. Кондратьев (Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова).

В учебном пособии, написанном в соответствии с программой одноименного курса, впервые достаточно полно изложена проблема космических влияний на погоду и климат, рассмотрены вопросы физики Солнца и околоземного космического пространства, методические вопросы и статистические методы анализа солнечно-атмосферных связей. Особое внимание в работе уделено ключевому вопросу — механизмам воздействия космических факторов на атмосферу.

Пособие рассчитано на студентов и аспирантов гидрометеорологических институтов и географических факультетов университетов. Оно будет также полезно специалистам, связанным с исследованиями солнечно-земных связей, долгосрочным и сверхдолгосрочным прогнозированием погоды, прогнозированием изменений климата.



СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава 1. Солнце	4
1.1. Основные данные о Солнце	4
1.2. Эволюция Солнца	6
1.3. Строение Солнца	9
1.4. Магнитное поле Солнца	22
Глава 2. Солнечная активность	25
2.1. Центры активности Солнца	25
2.2. Солнечные пятна	27
2.3. Факелы	32
2.4. Солнечные вспышки	31
2.5. Протуберанцы	36
2.6. Корональные лучи и дыры	37
2.7. Индексы солнечной активности	38
2.8. Цикличность солнечной активности	39
2.9. Характер солнечной активности со статистической точки зрения	46
2.10. Прогноз солнечной активности	50
2.11. Вариации астрофизической солнечной постоянной	52
2.12. Вариации солнечной постоянной, измеренные на земной поверхности и в нижней атмосфере	55
2.13. Служба Солнца	58
Глава 3. Околосолнечное космическое пространство	61
3.1. Солнечный ветер	61
3.2. Космические магнитные поля	65
3.3. Магнитные бури и полярные сияния	72
3.4. Общая характеристика заряженных частиц, приходящих из космоса	79
3.5. Индексация геомагнитной активности	83
Глава 4. Некоторые методические вопросы и статистические методы исследований солнечно-атмосферных связей	87
4.1. Корреляционные связи в гелиогеофизике	87
4.2. Анализ временных рядов	95
Глава 5. Влияние солнечной активности на атмосферу Земли	102
5.1. Влияние солнечной активности на ионосферу	102
5.2. Влияние короткопериодных возмущений на Солнце и в космосе на нижнюю атмосферу	112

5.3. Проявление 27-дневного цикла на Солнце, в околоземном космосе и в атмосфере Земли	118
5.4. Анализ 27-дневных вариаций гелиогеофизических индексов и параметров атмосферы	119
5.5. Проявление 11-летнего цикла в нижней атмосфере	121
5.6. 22-летний цикл в климате Земли	128
5.7. Проявление вековых и сверхвековых циклов солнечной активности	130
5.8. Изменение орбитальных параметров и климат Земли	133
5.9. Некоторые предпосылки учета солнечной активности в прогнозах погоды и теории климата	136
Глава 6. Возможные физические механизмы воздействия космических факторов на погоду и климат	139
6.1. Механизмы, связанные с изменением солнечной постоянной	139
6.2. Механизм, связанный с воздействием солнечной активности на параметры атмосферного электричества	140
6.3. Озонный механизм воздействия космических факторов на нижнюю атмосферу	147
6.4. Гидродинамические механизмы взаимодействия верхних и нижних слоев атмосферы	156
Литература	158

*АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ КУЗНЕЦОВ,
ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ ЛОГИНОВ*

КОСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АТМОСФЕРУ

Учебное пособие

Редактор *Т. В. Иващенко*

Корректор *Л. В. Ломакина*

Сдано в набор 25.10.83. Подписано в печать 05.07.84. М-33579
 Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Лит. гарн. Печать высокая.
 Печ. л. 10. Уч.-изд. л. 10,2. Тираж 400 экз. Зак. 343.
 Темплан 1984 г., поз. 152. Цена 60 коп.

ЛПИ им. М. И. Калинина. 195251, Ленинград, Политехническая, 29.

Типография ВСОК ВМФ

ВВЕДЕНИЕ

Исследование космических воздействий на погоду и климат имеет более чем двухсотлетнюю историю. Многочисленные статьи и монографии по этой тематике содержат огромное количество результатов, которые однако не всегда поддаются однозначной интерпретации. Ее затрудняло отсутствие ясности в понимании механизмов воздействия космических факторов на нижнюю атмосферу. В последние годы достигнут определенный прогресс в исследовании солнечно-атмосферных связей. Были получены новые результаты, подтверждающие реальность солнечно-атмосферных связей, предложены механизмы, получившие теоретическое и экспериментальное обоснование. Все это позволяет рассматривать солнечно-атмосферную физику как перспективную область геофизики, имеющую не только теоретический интерес, но и важное практическое приложение при разработке методов долгосрочных и сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов и прогнозов изменения климата.

В условиях, когда имеется большое число факторов, воздействие которых на нижнюю атмосферу осложняется существованием в системе атмосфера — гидросфера — криосфера — биосфера недостаточно исследованных прямых и обратных связей, возникают существенные трудности при оценке роли именно космических факторов в формировании изменчивости метеорологических характеристик.

Один из путей решения этой проблемы — физико-математическое моделирование процессов в оболочках Земли. Однако простые физические закономерности в реальных условиях проявляются в сложных взаимосвязях, зачастую далеко выходящих за рамки известных теоретических схем. Укажем на некоторые существующие в настоящее время трудности, которые не позволяют рассмотреть задачу на уровне решений уравнений гидродинамики.

Выполненные теоретические работы по вопросу взаимодействия верхних и нижних слоев атмосферы содержат ряд существенных упрощений как физического, так и математического характера. Это связано прежде всего с общим состоянием гидродинамических теорий климата и недостаточной информацией о физических процессах в атмосфере. В частности, не ясен механизм преобразований различных видов энергии в атмосфере и не оценены необходимые минимальные запасы энергии для перестройки общей циркуляции атмосферы; не выявлены процессы и агенты, стимулирующие гене-

рацию кинетической энергии в атмосфере. Серьезная проблема в метеорологии возникла в связи с недостаточным знанием вариаций в спектре солнечного излучения и его интегрального потока — солнечной постоянной. Дискуссионным является вопрос модулирующего воздействия вариаций электромагнитного излучения и заряженных частиц на газовый состав, на содержание аэрозолей и электрические параметры нижней атмосферы.

Чтобы понять причины связи внешних и, в первую очередь, гелиогеофизических параметров с характеристиками погоды и климата, необходимо всесторонне рассмотреть физические процессы на Солнце и в космосе, учесть начальные условия (сезон, район, высоту над уровнем моря, фазу других климатообразующих факторов). Результаты такого комплексного анализа солнечно-атмосферных связей выполнены в последнее время для установления их характера и для оценки возможностей использования гелиогеофизической информации при разработке методов долгосрочных метеорологических прогнозов и прогнозов изменения климата. Они убедительно свидетельствуют о том, что информационная база долгосрочных прогнозов должна включать не только данные о процессах, происходящих в оболочках Земли, но и данные о процессах на Солнце и в околоземном космосе.

Авторы выражают глубокую благодарность члену-корреспонденту АН СССР К. Я. Кондратьеву, доктору географических наук В. Н. Адаменко и кандидату физико-математических наук А. И. Олю, взявшим на себя труд по рецензированию данного пособия и сделавшим ряд ценных замечаний.

Глава 1. СОЛНЦЕ

1.1. Основные данные о Солнце

Солнце — типичная звезда спектрального класса G (желтый карлик), находится примерно на середине своей эволюции. Оно расположено вблизи плоскости Галактики на расстоянии около 33 000 световых лет от ее центра (ядра) на внутреннем краю одного из ее спиральных рукавов — рукава Ориона. Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики $\sim 250 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. По отношению к ближайшим звездам Солнце движется со скоростью $\sim 20 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.

Солнце является центральным телом солнечной системы и, следовательно, ближайшей к нам звездой. Среднее расстояние от Земли до Солнца, которое называется астрономической единицей, равно $1,496 \cdot 10^{11}$ м. Вследствие близости к Земле Солнце является

единственной звездой, которую мы можем наблюдать не как точку, а как диск.

Солнце имеет форму шара с весьма незначительной сплюснутостью к полюсам, равной 35 км. Линейный радиус Солнца составляет $6,96 \cdot 10^8$ м, т. е. примерно в 109 раз больше радиуса Земли. Средний угловой диаметр солнечного диска, видимый на расстоянии Земли, равен $31'59''$. Масса Солнца составляет $1,99 \cdot 10^{33}$ г, т. е. в 332 448 раз превосходит массу Земли. Зная, что объем Солнца равен $1,41 \cdot 10^{27}$ м³, находим, что средняя плотность составляет $1,41 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Следует, однако, иметь в виду, что поскольку от центра до 0,8 радиуса Солнце содержит 0,99 своей массы, вблизи поверхности ($r = 0,995 R_{\odot}$) его плотность равна всего $2 \cdot 10^{-5} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

Температура в центре Солнца превышает 10^7 К , в то время для поверхности непосредственные наблюдения дают значения около 6000 К .

Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца составляет $2,74 \cdot 10^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (т. е. в 28 раз больше, чем на Земле), а скорость ускользания — вторая космическая скорость (скорость отрыва, или критическая скорость) $\sim 619 \text{ км} \cdot \text{см}^{-1}$ (на Земле $\sim 11 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$).

Солнце является медленно вращающейся звездой и имеет то же направление вращения, что и Земля. Скорость его вращения на экваторе примерно равна $2 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.

Вращение поверхностных слоев Солнца дифференциально: на низких широтах угловая скорость вращения больше, чем на высоких*. При этом сидерический период вращения Солнца (т. е. отнесенный к «неподвижным» звездам) меняется от ~ 25 суток вблизи экватора до 30 суток у полюсов.

Заметим, что синодический период вращения (т. е. период, отнесенный к Земле) 27,0 суток, часто используемый в статистических геофизических исследованиях, соответствует гелиографической широте $\pm 8^\circ$.

Первые измерения дифференциального (по широте) вращения видимой поверхности Солнца (фотосферы) были осуществлены путем прослеживания за движением долгоживущих солнечных пятен. Они позволили в 1951 г. Ньютону и Нанну предложить эмпирическую формулу

$$\omega = \omega_0 - v \sin^2 \varphi. \quad (1.1)$$

где φ — гелиографическая широта; ω_0 — угловая скорость вращения Солнца на экваторе; v — коэффициент ($\omega_0 = 14,38 \text{ град} \cdot \text{сутки}^{-1}$; $v = 2,77 \text{ град} \cdot \text{сутки}^{-1}$).

Впоследствии Уорд обнаружил заметные отклонения движений пятен от равномерного дифференциального вращения.

* — Дифференциальное вращение имеется также на Юпитере и Сатурне; аналогичные явления (так называемые струйные течения) имеются в земной атмосфере и океане (экваториальные противотечения).

Сводка данных угловой скорости вращения различных образований изображена на рис. 1.1. Из его анализа видно, что скорости вращения фотосферных магнитных полей, солнечных пятен, волокон и корональных лучей приблизительно совпадают, по крайней мере в экваториальной зоне Солнца.

Дифференциальное вращение сопровождается затратами энергии на преодоление сил вязкости (прежде всего, турбулентной

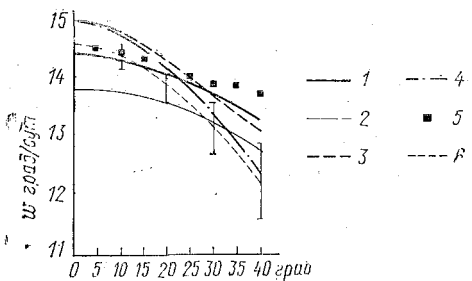


Рис. 1.1. Скорости дифференциального вращения солнечных пятен (кривая 1), фотосферной, хромосферной и корональной плазмы (соответственно кривые 2, 3 и 4), фотосферного магнитного поля (квадраты), «узелков» (кривая 6)

вязкости, создаваемой мелкомасштабными конвективными движениями в гранулах и супергранулах); без какого-либо поддерживающего механизма угловые скорости вращения на разных гелиографических широтах выравнялись бы, по имеющимся оценкам, за несколько оборотов Солнца.

По современным представлениям таким поддерживающим механизмом является меридиональный и радиальный перенос момента импульса в конвективной зоне

Солнца гигантскими конвективными ячейками, образующими спиральную макротурбулентность (в которой вихрь скорости не ортогонален к скорости) *.

1.2. Эволюция Солнца

Теория, согласно которой Вселенная возникла в результате «большого взрыва», подтверждается почти всеми современными наблюдениями. Она предполагает, что все вещество состояло некогда из водорода и было сжато в исключительно плотном и горячем первичном сгустке. В самые первые моменты существования Вселенной в результате реакций ядерного синтеза образовались гелий и (в значительно меньшем количестве) элементы с более высокими атомными номерами. Относительное содержание синтезированного гелия было таким же, как его современное содержание в Солнце, но доля более тяжелых элементов была на много порядков меньше, чем наблюдаемое сейчас в Солнце.

После того как первичный горячий сгусток, образовавшийся в процессе «большого взрыва», расширился и остыл, в веществе

* — Отметим, что родство проблем общей циркуляции атмосфер планет и Солнца было показано Г. С. Голицыным. Причем разработанная им теория позволила, в частности, оценить глубину конвективной зоны Солнца в $0,2 R_{\odot} \dots 0,3 R_{\odot}$, что согласуется с рядом других данных.

образовались локальные гравитационные сгущения и из них сформировались звезды. В звездах происходили дальнейшие реакции ядерного синтеза, в результате которых немного увеличивалось содержание гелия и очень значительно — содержание более тяжелых элементов. Разного рода выбросы — катастрофические и некатастрофические — возвратили часть звездного вещества в межзвездную среду, после чего в ней возникли сгущения и образовались звезды второго поколения. Из наблюдаемого химического состава Солнца можно вывести заключение, что Солнце образовалось из вещества, которое уже подвергалось однажды или многократно воздействию ядерных реакций синтеза в недрах звезд.

Считается, что Солнце образовалось в результате уплотнения межзвездной материи в рукаве Ориона около $4,5 \div 5,0 \cdot 10^9$ лет назад. В нашей Галактике есть звезды как старше Солнца, так и моложе его. Общей характерной особенностью эволюции Солнца является постепенное сжатие под действием собственного тяготения, периодически прерываемое ядерным горением.

Первое превращение некоторого количества гравитационной потенциальной энергии межзвездного газового облака в тепловую энергию происходит тогда, когда скорости частиц газа, попавших в область центра масс, осредняются вследствие столкновений. Когда плотность и температура становятся достаточно высокими, начинаются ядерные реакции синтеза и сжатие временно прекращается. После того, как исчерпывается ядерное горючее, цикл сжатие — ядерное горение повторяется, но уже при более высокой температуре и с участием более тяжелых ядер.

Схематически основные стадии жизни Солнца — от сжатия газового облака до состояния белого карлика — показаны на рис. 1.2.

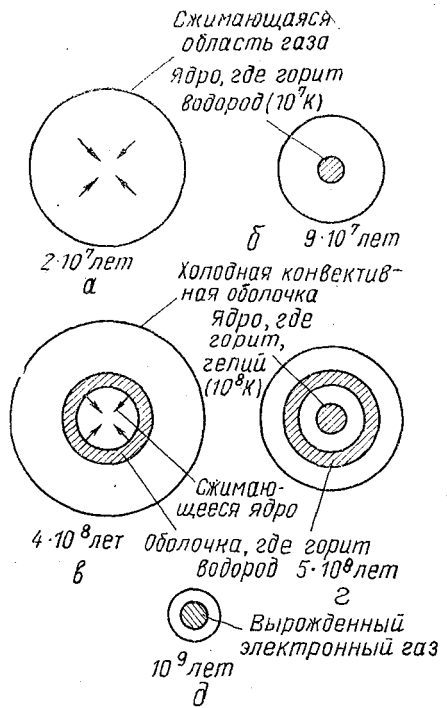


Рис. 1.2. Стадии эволюции Солнца: а — сжатие до «стадии главной последовательности» ($2 \cdot 10^7$ лет); б — стадия главной последовательности — в центре «горит» водород ($9 \cdot 10^7$ лет); в — стадия красного гиганта — водород горит в сферическом слое ($4 \cdot 10^8$ лет); г — стадия, когда в центре горит гелий ($5 \cdot 10^8$ лет); д — стадия белого карлика (10^9 лет)

В процессе эволюции изменяются значения как эффективной температуры Солнца, так и его светимость. Путь, проходимый Солнцем, на диаграмме Герцшпрунга—Рессела представлен на рис. 1.3. Из его анализа видно, что в начале своего существования Солнце быстро перемещается по направлению к главной последовательности, долго остается в ее окрестностях, а затем быстро уходит приблизительно туда, откуда оно пришло.

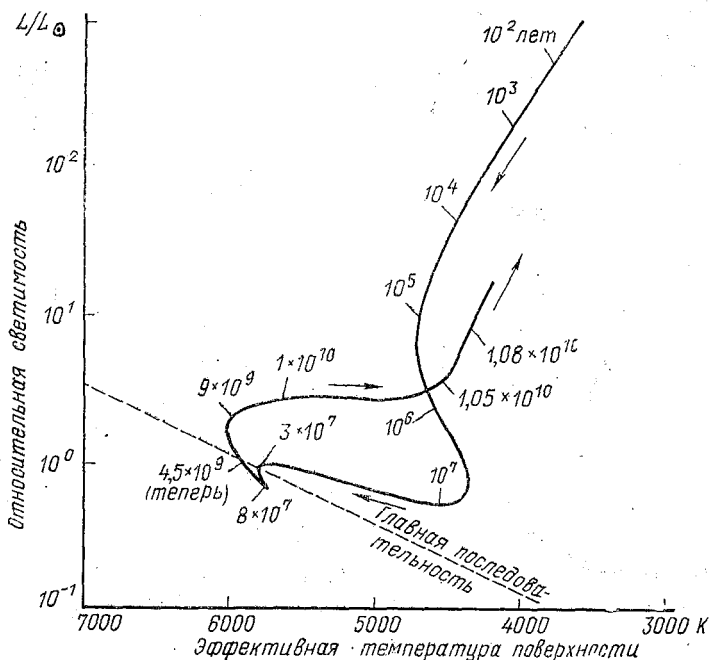


Рис. 1.3. Эволюционный путь Солнца на диаграмме Герцшпрунга—Рессела (L_{\odot} — светимость Солнца в настоящее время)

Если же структура Солнца на стадии перехода от группы красных гигантов к группе белых карликов станет неустойчивой, то Солнце может взорваться как сверхновая звезда, а выброшенное вещество послужит материалом для формирования нового поколения звезд.

В процессе эволюции происходит изменение как наблюдаемых характеристик звезды, так и свойств, и химического состава ее вещества. При описании химического состава звезды принято указывать, каковы доли X , Y его массы, состоящие соответственно из водорода и гелия; остальная часть массы Z приходится на более тяжелые элементы. Для Солнца согласно Э. Гибсону

$$X = 0,784; \quad Y = 0,198; \quad Z = 0,018.$$

Более подробно химический состав Солнца приведен в табл. 1.1. Рассматривая Солнце как звезду, мы убеждаемся, что оно ни в каком смысле не является «экзотической» звездой: Солнце — обычный член главной последовательности, расположенной на диаграмме Герцшпрунга—Рессела: светимость — спектральный класс, находящийся в настоящее время в области относительной устойчивости. Это та область, где звезды проводят большую часть своей жизни.

Методы и теории, основанные на атомной и ядерной физике и используемые при изучении эволюции звезд, применимы и к Солнцу.

Таблица 1.1

Химический состав Солнца ($X = 0,784$; $Y = 0,198$; $Z = 0,018$)

Элемент	Атомный номер	Логарифм (10) относительного содержания	$N_{\text{элемент}}/N_{\text{водород}}$	Доля массы
H	1	12,0	1,0 (—0) *	7,84 (—1)
He	2	10,8	6,3 (—2)	1,98 (—1)
C	6	8,5	3 (—4)	3 (—3)
N	7	8,3	2 (—4)	2 (—3)
O	8	8,8	6 (—4)	8 (—3)
Ne	10	8,1	1,3 (—4)	2 (—3)
Na	11	6,2	1,6 (—6)	3 (—5)
Mg	12	7,9	8 (—5)	1,5 (—4)
Al	13	6,4	3 (—6)	6 (—5)
Si	14	7,4	3 (—5)	6 (—4)
S	16	7,2	1,6 (—5)	4 (—4)
Ar	18	6,3	2 (—6)	6 (—5)
Ca	20	6,4	3 (—6)	9 (—5)
Fe	26	6,9	8 (—6)	4 (—4)
Ni	28	5,6	4 (—5)	2 (—3)

* $1,0 (—0) = 1,0 \cdot 10^{-0}$

1.3. Строение Солнца

При описании физической природы солнечных явлений и изучения их причин удобно разделить эти явления на два класса:

- 1) спокойные;
- 2) активные.

Модель спокойного Солнца — статический сферически симметричный шар из горячего газа, в котором свойства вещества зависят только от радиуса, т. е. одинаковы в пределах любого шарового слоя. Такая модель удобна прежде всего для изучения ядра Солнца, однако с ее помощью можно рассмотреть и строение, и свойства нескольких отчетливо различающихся слоев: ядро, конвективную зону, фотосферу, хромосферу и корону. Свообразие физических характеристик каждого из этих слоев зависит от того, как проявляет себя в данном слое поток энергии, возникающий глубоко в недрах Солнца и движущийся из его недр наружу. Эта энергия, освобожденная в ядре Солнца, переносится к поверхности в виде излучения. По направлению от ядра наружу температура, давление и плотность быстро уменьшаются, равно как и средняя энергия фотонов. Диффундируя к поверхности, фотоны поглощаются и переизлучаются много раз. Таким путем энергия, исходящая от солнечного ядра в виде высокоэнергичных гамма-лучей, превращается последовательно в рентгеновское излучение, затем в далекое ультрафиолетовое излучение, в ультрафиолетовое и, наконец, в видимый свет — наиболее характерную часть солнечной энергии.

Однако не на всем пути к поверхности солнечная энергия переносится в виде излучения. На расстоянии примерно $0,86 R_{\odot}$ от центра Солнца свойства газа меняются до такой степени, что выше этого уровня он становится конвективно неустойчивым и возникает турбулентная конвекция. Дальнейшие изменения физических свойств газа при увеличении расстояния от центра Солнца приводят к появлению фотосферы и т. д.

Общая структура Солнца, его физические свойства и типы переноса энергии приведены на рис. 1.4.

Ядро Солнца. Относительно небольшое ядро Солнца с радиусом $1/4 R_{\odot}$ содержит большую часть его массы и почти полностью определяет его светимость. В ядре Солнца, составляющем лишь $1/64$ его объема, заключена половина солнечной массы и генерируется 99% солнечной энергии. Большая масса Солнца приводит к тому, что под действием собственной гравитации вещество Солнца сжато в ядре до столь большой плотности и соответственно имеет настолько большую температуру, что там происходят ядерные реакции. Эти ядерные реакции и являются тем источником энергии, которая непрерывно излучается Солнцем в пространство и порождает солнечную активность. С точки зрения физика Солнце представляет собой огромный самоуправляемый термоядерный реактор. Постоянство излучаемой им энергии обеспечивается колоссальным запасом гравитационной энергии, каждую секунду готовой скомпенсировать случайную убыль или принять на себя случайное увеличение выхода термоядерной энергии.

В самом центре ядра температура солнечного вещества достигает $15 \cdot 10^6$ К, давление равняется приблизительно $250 \cdot 10^9$ атм.,

а удельный вес несколько меньше 160 г/см^3 . Хотя ядра упакованы там приблизительно в 1000 раз плотнее, чем в металле, высокая температура поддерживает вещество в газообразном состоянии. Таким образом, кристаллической структуры, свойственной твердому телу, там нет, электроны и «голые» ядра движутся, как свободные частицы. При высоких температурах, имеющих место на

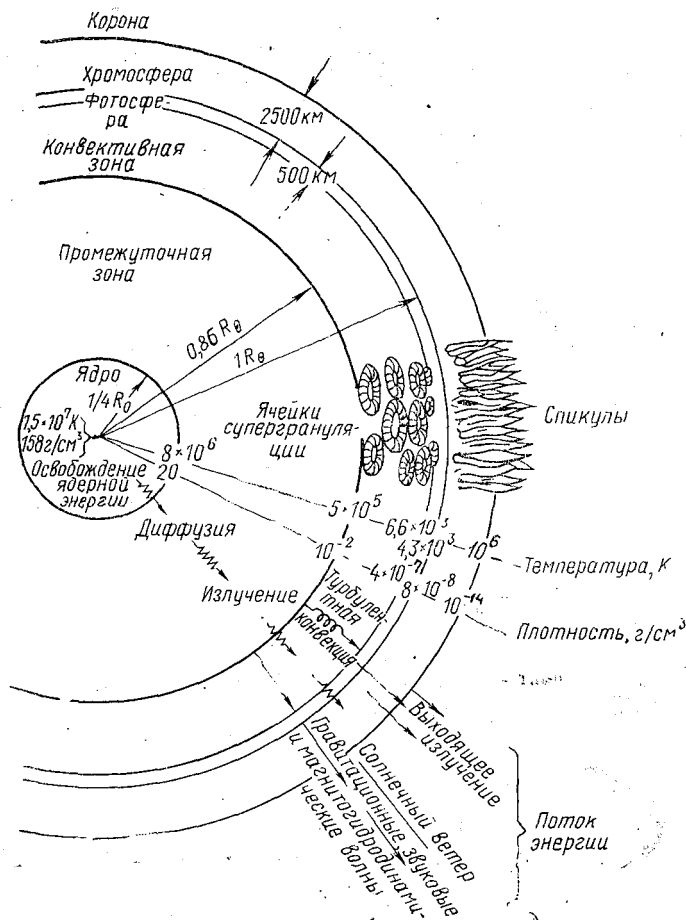


Рис. 1.4. Схематическое представление строения Солнца, основных физических свойств его вещества и способов переноса энергии наружу (масштаб не соблюден, R_{\odot} — радиус Солнца)

Солнце, происходит ионизация и солнечное вещество становится плазмой. Напомним, что термином «плазма» обозначается электрически нейтральный газ, состоящий из положительных, отрицательных и нейтральных частиц. Существование плазмы возможно

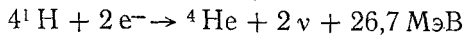
при балансе процессов ионизации и рекомбинации, причем если газовая плазма охлаждается, то заряженные частицы рекомбинируют и плазма перестает существовать.

Энергия, генерируемая в центральной области Солнца, образуется в результате следующих термоядерных реакций:

— превращения протонов в ядра гелия (протон-протонная реакция);

— реакций углеродного цикла.

Окончательный результат протон-протонного цикла можно записать в виде



Поскольку ускользящие нейтрино ν уносят по 0,26 МэВ (в среднем), то на каждое образовавшееся ядро ^4He приходится 26,2 МэВ освобожденной энергии. Это соответствует энергии $6,3 \cdot 10^{18}$ эрг

на 1 г водорода. Схематически последовательность реакций этого цикла представлена на рис. 1.5.

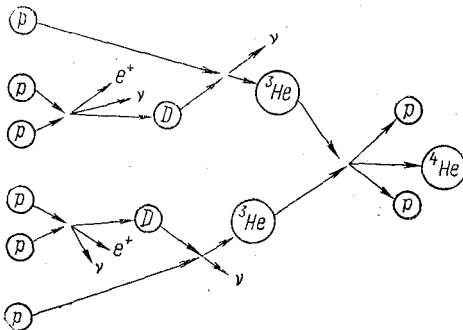
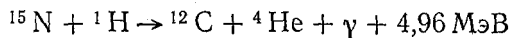
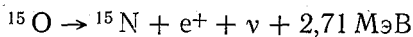
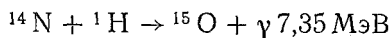
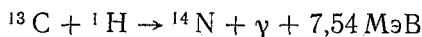
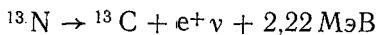
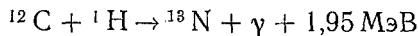


Рис. 1.5. Схематическое представление реакций протон-протонного цикла (p — протон (^1H), D — дейтерий (^2H), e^+ — позитрон, ν — нейтрино, γ — гамма — излучение, He — гелий)

В реакции протон-протонного цикла на каждый грамм водорода в энергию превращается 0,007 г. Следовательно, для непрерывного поддержания наблюдаемой светимости Солнца, составляющей $4 \cdot 10^{26}$ Вт, ядерная печь должна поглощать массу со скоростью $5 \cdot 10^9$ кг \cdot с $^{-1}$.

В центральной области Солнца температура может быть достаточно высокой

для течения реакций и углеродного цикла, поставляющих ядра гелия. Механизм такого превращения водорода в гелий складывается из ряда реакций, где углерод действует как катализатор:



В этом случае нейтрино уносят в среднем по 1,7 МэВ, и на каждое образовавшееся ядро ${}^4\text{He}$ приходится 24 МэВ освобожденной энергии.

Ядерная энергия, генерируемая в солнечном ядре, быстро преобразуется в локальную тепловую энергию и поток этой энергии устремляется наружу.

Информация о процессах, протекающих в ядре Солнца, может быть получена на основе регистрации нейтрино, образующихся в ходе ядерных реакций. Однако измерения потока нейтрино, испускаемого Солнцем, — исключительно трудная задача, так как средняя длина свободного пробега нейтрино в обычном веществе равняется нескольким световым годам.

В настоящее время ведется титаническая работа по «улавливанию» образующихся в результате термоядерных реакций солнечных нейтрино. Упомянем в этой связи результаты нейтринных экспериментов американского ученого Р. Дэвиса, предпринятых им в 1967—1968 гг. и с 1972 г. по настоящее время. Согласно Э. Гибсону результаты нейтринных экспериментов Р. Дэвиса можно интерпретировать как факт, что в углеродном цикле генерируется менее 9% солнечной энергии.

Центральная область Солнца содержит почти все конечные продукты реакций — «золу» ядерного горения. И соответственно там меньше водорода (центральное истощение). Однако при перемещении от центра Солнца к его поверхности доля водорода по массе возрастает очень быстро: на 96% на протяжении первой четверти R_{\odot} . Остальная часть Солнца состоит по существу из однородной смеси водорода и гелия и примерно 1% смеси более тяжелых элементов. Атомов этих тяжелых элементов содержится, грубо говоря, в тех же относительных количествах, что и в земной коре. Основной вклад в плотность газа вносят С, N, O, Ne, Mg, S, Si, Ar, Ca, Fe и Ni. Эти тяжелые элементы являются продуктами ядерных реакций и, вероятно, образовались вскоре после «большого взрыва» (на ранних стадиях существования Вселенной) или в недрах звезд, существовавших до возникновения Солнца.

Конвективная зона. Возникновение турбулентного слоя под поверхностью Солнца в первую очередь связано с температурой. В конвективной зоне температура уже невелика по сравнению с температурой ядра. Отсюда вытекают два важных следствия. Во-первых, в газе становится много свободных электронов, движущихся достаточно медленно для того, чтобы ядра водорода или других элементов могли захватить их в связанные состояния, образовав атомы. Во-вторых, возрастание числа атомов увеличивает поглощательную способность газа (он становится менее прозрачным для излучения), и в результате возрастает градиент температуры: фотоны чаще поглощаются атомами, создается большее сопротивление диффузии излучения, и градиент температуры становится круче.

При такой ситуации, если какой-то элемент объема газа медленно движется снизу вверх и при этом остывает вследствие расширения, он должен одновременно нагреваться за счет энергии, освобождающейся при рекомбинациях электронов с ядрами, и потому его температура будет падать не так быстро, как в отсутствие рекомбинации. Из-за этого нагревания и большого градиента температуры в окружающей среде поднимающийся элемент газа оказывается более горячим и, что еще важнее, менее плотным, чем окружающая среда. В результате его движение ускоряется и возникает турбулентная конвекция. Такого рода неустойчивость называется также и на элементе объема газа, который начинает двигаться сверху вниз. Образующиеся таким образом конвективные ячейки аналогичны вихрям в свободной атмосфере Земли. Интенсивное кипение и бурление в верхней части турбулентного слоя можно наблюдать на поверхности Солнца.

В конвективной зоне энергия переносится в основном движущимся веществом, а не излучением. Каждый поднимающийся элемент объема газа выносит свой запас энергии прямо на поверхность.

С конвекцией связан еще один механизм переноса: мощная турбулентность создает шум, или механическую энергию, которая в виде низкочастотных звуковых волн распространяется через фотосферу и достигает внешних слоев Солнца. Хотя количество энергии, переносимой таким путем, относительно невелико, оно, согласно Э. Гибсону, является основным фактором, определяющим состояние внешних слоев Солнца.

Гравитационные волны, которые генерируются в нижних слоях фотосферы проникающими туда конвективными ячейками, также могут переносить в значительном количестве нелучистую энергию (один из видов гравитационных волн — это хорошо всем знакомые волны на поверхности воды).

Мы не можем видеть недра Солнца (ядро, промежуточную область и конвективную зону). По этой причине их описание основывается только на теории: характеристики этих областей Солнца приходится определять из расчетов, которые должны быть построены так, чтобы из них получались правильные значения наблюдаемых величин. Однако, начиная с фотосферы, основным источником наших знаний становятся уже наблюдения, а не теория.

Фотосфера. По мере перемещения через конвективную зону наружу плотность газа, температура и давление продолжают уменьшаться, причем особенно важным параметром становится плотность. И, наконец, достигается слой, где вероятность поглощения фотона, испущенного по направлению наружу, становится малой. Такой фотон беспрепятственно пройдет вышележащие прозрачные слои атмосферы и уйдет в межпланетное пространство. Именно этот слой называется фотосферой (сфера света). Его мы видим, глядя на Солнце: он создает резко очерченный край солнечного диска. По уровню фотосферы определяют радиус Солнца и уско-

рение силы тяжести у поверхности Солнца. Температура здесь относительно невысока (и, поскольку Солнце находится в состоянии гидростатического равновесия, шкала высот также невелика — плотность очень быстро уменьшается наружу).

Фотосфера излучает всю энергию, испускаемую Солнцем в пространство, причем большая часть излучаемой энергии исходит из очень тонкого слоя — всего около 100 км толщиной, составляющего лишь 0,014% от R_{\odot} . Максимум энергии излучения фотосферы приходится на видимую область спектра. Рис. 1.6 иллюстрирует распределение солнечной энергии по длинам волн (не показаны фраунгоферовы линии поглощения). На нем отмечены также некоторые области спектра, в которых электромагнитное излучение сильно поглощается атмосферой Земли*.

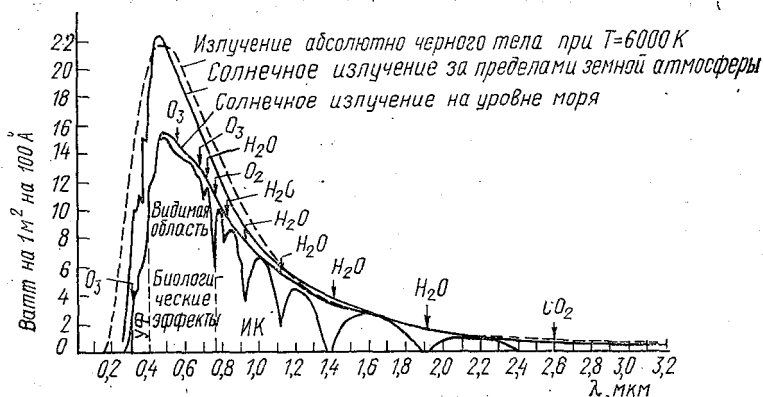


Рис. 1.6. Спектр солнечного электромагнитного излучения у орбиты Земли и после прохождения через земную атмосферу

Явным указанием на существование нижележащей водородной конвективной зоны служит самая заметная особенность фотосферы — грануляция. Фотосферная грануляция представляет собой ячеистую структуру, состоящую из ярких гранул на фоне темного межгранульного пространства. Большинство гранул имеет неправильную форму, часто в виде многоугольника (угловой размер $\sim 1-2''$). Гранулы разделены узкими темными межгрануляционными полосами шириной $0,4''$, однако местами можно наблюдать сравнительно большие темные участки, что, по-видимому, свидетельствует о временном отсутствии одной или нескольких гранул. Грануляция хорошо видна на снимках Солнца в белом свете, полученных с достаточным разрешением, и напоминает пшеничные зерна.

* Подсчитано, что примерно половина солнечной энергии, достигающая поверхности Земли, приходится на видимый участок спектра. Поэтому не удивительно, что наши глаза развили чувствительность именно к этой области спектра.

Фотосфера — это верхний слой бурлящей конвективной зоны. Крупные ячейки (элементы) конвекции поднимаются к поверхности и излучают там избыточное тепло; потом остывший газ стекает обратно вдоль их внешних краев и ячейки распадаются. Средний размер таких конвективных ячеек несколько превосходит 1800 км ($\sim 2''$ — угловой размер), характерная продолжительность существования составляет 8—10 мин, а разность температуры между центром и краем — по меньшей мере 100 К (сходные картины конвекции наблюдаются на снимках из космоса и в земной атмосфере — образование системы кучевых облаков, обусловленных ячейками в неустойчивой земной атмосфере). Вертикальные восходящие потоки в центре каждой гранулы имеют скорость порядка $0,4 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, а горизонтальные потоки истечения вещества — около $0,25 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.

На поверхности наблюдаются довольно часто и вращающиеся гранулы, отличающиеся повышенной яркостью и расширяющиеся со скоростью $1,5 \div 2,0 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. Образующееся в этом случае кольцо в конечном счете разрывается на части.

Несколько труднее наблюдать более крупномасштабную картину фотосферных движений — супергрануляцию. Предполагается, что она также порождается конвекцией (используя эффект Доплера, можно обнаружить в ячейках супергрануляции движения, преимущественно горизонтальные, направленные от центра к краю). Ячейки супергрануляции примерно в 18 раз больше ячеек грануляции (2,5 диаметра Земли) и существуют примерно в 120 раз дольше. Масштаб супергрануляционных движений указывает на то, что они связаны со значительно более глубокими слоями, чем грануляция. Характерная скорость горизонтальных движений составляет $0,3 \div 0,4 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. Вертикальные движения вниз со скоростью $0,1 \div 0,2 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ наблюдаются, главным образом, по границам супергрануляционных ячеек. Направленные вверх движения в центре ячеек, по-видимому, еще слабее. Грануляция и супергрануляция аналогичны в том смысле, что обе порождаются конвективной неустойчивостью в зоне конвекции, проникающей в вышележащие устойчивые области атмосферы. При этом достойно внимания то обстоятельство, что конвективным процессам свойственны лишь два отчетливо различающихся характерных размера, а не непрерывный ряд размеров, заполняющих некоторый интервал.

Схематически формирование ячеек супергрануляции изображено на рис. 1.7.

На рис. 1.8. показано, как поток ионизированного газа от центра к краям в ячейках супергрануляции переносит магнитные поля к границам ячеек, и в результате образуется сетка усиленных полей. На этой сетке возникают спиккулы.

Спиккулами называются быстро изменяющиеся, преимущественно вертикальные выступообразные структуры в солнечной хромосфере. Диаметр спиккул составляет $\sim 1000 \text{ км}$, длина $(6 \div 10) \cdot 10^3 \text{ км}$, температура $\sim (1 \div 2) \cdot 10^4 \text{ К}$. Одновременно на

Солнце можно видеть около 10^6 спикул. Похоже, что они «выбрасываются» из нижней хромосферы со скоростью до $\sim 20\text{--}30 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ и поднимаются на высоту $\sim 9 \cdot 10^3 \text{ км}$, а затем падают обратно и затухают на протяжении всей их длины. Обычно полное время жизни спикул составляет 5—10 мин.

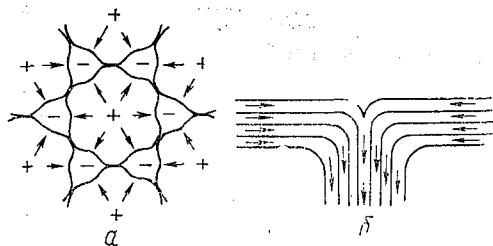


Рис. 1.7. Схематическое представление течений в ячейках супергрануляции: *a* — вид сверху; направление вверх (+), вниз (—), горизонтально (стрелки); *b* — вертикальный разрез места, где сходятся вершины соседних многоугольных ячеек (длина стрелок пропорциональна скорости течения)

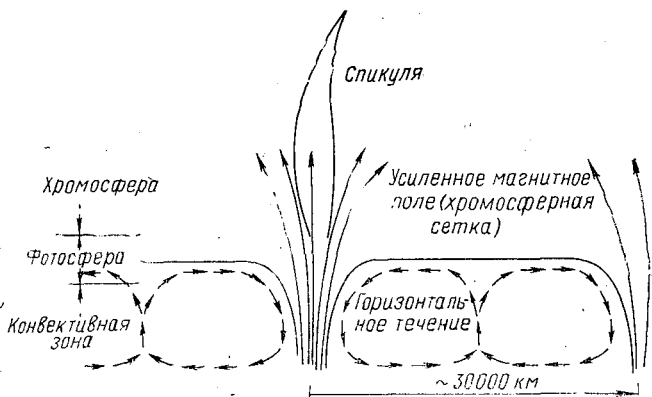


Рис. 1.8. Схема образования спикул на границе ячеек супергрануляции

Общее схематическое изображение структуры солнечной атмосферы можно видеть на рис. 1.9.

Возмущения, создаваемые конвективной зоной, ответственны также за ритмичные подъемы и опускания всей солнечной атмосферы, имеющие период около 5 мин. Как показывают наблюдения, эти гармонические колебания распространяются также и вдоль солнечной поверхности в виде стоячих волн, захваченных в фото-

сфере и хромосфере областью минимума температуры, с длиной волны около 5000 км. Основной причиной их возникновения можно считать как распространяющиеся вверх низкочастотные звуковые волны, возникающие в конвективной зоне, так и гравитационные волны, возбуждаемые турбулентностью в фотосфере.

Для описания солнечной атмосферы удобно выбрать отчетный уровень на сферической поверхности $r = R_{\odot}$, соответствующей резкому видимому краю солнечного диска. Этот уровень приписывается оптической глубине $\tau = \tau_{500 \text{ нм}} = 0,003$ (согласно определению $\tau_{500 \text{ нм}}$, интенсивность уходящего по радиусу с этого уровня излучения с длиной волны $\lambda = 500 \text{ нм}$ уменьшается из-за поглощения в вышележащей атмосфере в $e^{0,003} \approx 1,003$ раза). Лежащий ниже этого уровня слой ярко светящегося газа, излучение из которого еще может «пробиваться» наружу, не слишком сильно поглощаясь в вышележащей атмосфере, и есть фотосфера. Над фотосферой находится хромосфера, толщина которой примерно 15 000 км.

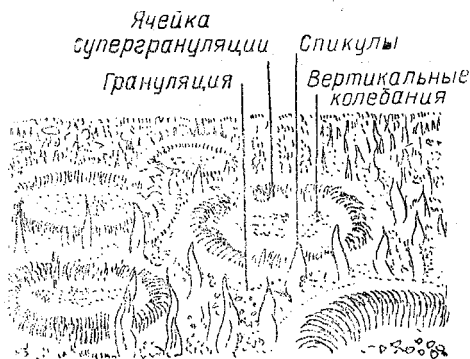


Рис. 1.9. Структура солнечной атмосферы

ней границе) за несколько секунд до полной фазы и через несколько секунд после нее (цвет хромосферы определяется тем, что в спектре ее излучения преобладает красная линия H_{α} — первая линия бальмеровской серии водорода). Хромосфера — область наиболее сильного проявления солнечной активности.

В верхних слоях фотосферы температура медленно уменьшается. Хромосфера находится непосредственно над областью минимума температуры. По этой причине плотность в ее нижних слоях продолжает очень быстро уменьшаться с высотой, что, как и для фотосферы, объясняет многие ее свойства. Хромосферу можно считать пеной на поверхности турбулентной и относительно плотной фотосферы, пеной, которая тесно привязана магнитными полями к движущемуся под ней веществу.

Согласно Г. Зирину, температура между фотосферой и короной возрастает от $4 \cdot 10^3 \text{ К}$ до 10^6 К на протяжении менее 5000 км. При-

Хромосфера (сфера цвета) — прозрачный слой (он прозрачен для большей части видимой области спектра, за исключением нескольких узких участков спектра, соответствующих линиям излучения атомов из этого слоя Солнца), расположенный над фотосферой. Он наблюдается во время солнечного затмения в виде яркой алой вспышки на краю солнечного диска (похожая на горящую степь полоска темно-красного цвета с зубцами (спикулами) на верх-

веденные им данные измерений показывают, что над поверхностью Солнца на протяжении 100 км температура возрастает по меньшей мере на 20 000 К, т. е. на 1 К через каждые 5 м.

В хромосфере кинетическая энергия направленного волнового движения превращается вследствие столкновений в кинетическую энергию хаотического движения частиц (т. е. в тепло), что и приводит к резкому возрастанию ее температуры.

В хромосферу распространяется сетка усиленных магнитных полей, возникших в фотосфере на краях ячеек супергрануляции. Установлено, что такая хромосферная сетка совпадает с сеткой более горячего вещества. Высокая температура в хромосферной сетке является следствием присутствия усиленных магнитных полей, которые облегчают перенос механической энергии вверх и способствуют диссипации магнитогидродинамических (МГД) волн.

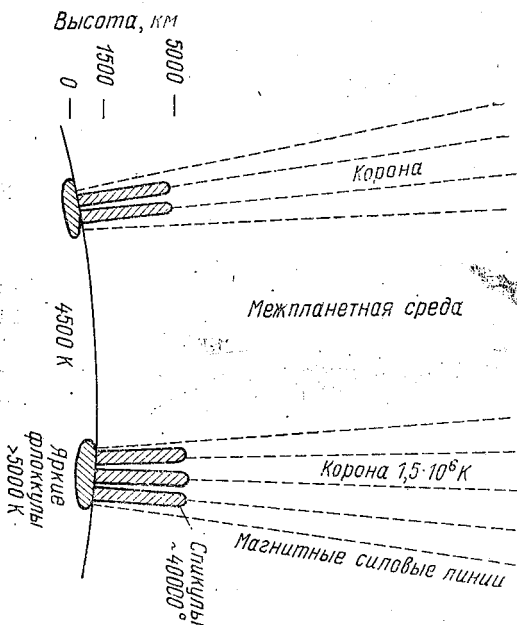


Рис. 1.10. Модельное представление структуры хромосферы

В хромосферной сетке берут свое начало яркие струи светящегося газа, поднимающиеся почти до 10^4 км и «живущие» 5—10 мин, — спикулы. Возможно, что спикулы являются основным поставщиком в корону вещества и потоков энергии.

Схематически модель хромосферы представлена на рис. 1.10. Поверхность хромосферы соответствует уровню 0 км и температуре около 4500° . Температура медленно растет с высотой. Плотность падает с высотой очень быстро (шкала высот около 100 км). На

высоте 2000 км плотность равняется корональной, а еще выше — быстро достигает межпланетных значений. В ярких флоккулах магнитные поля сильны, а температура превосходит 5000° . Из флоккул выбрасываются спикюлы. Температура их лежит в пределах от 30 000 до 100 000 $^\circ$, концентрация около 10^{11} см $^{-3}$. Над яркими флоккулами простирается наружу корона. Значения температур даны приблизительно. Пунктиром показаны силовые линии магнитного поля.

Корона. Над хромосферой расположена область с крайне низкой плотностью — корона. Интенсивность ее излучения в белом свете («белая корона») в 10^6 меньше излучения диска, что делает ее крайне трудной для исследования (наблюдается с помощью коронографа и при полном солнечном затмении).

Излучение короны возникает тремя различными путями.

Первая составляющая излучения короны — корона K (K от «континуум» — непрерывный) — ответственна за большую часть света, которая наблюдается на расстояниях до $1,3 R_\odot$ от поверхности Солнца ($2,3 R_\odot$ от центра). Это излучение имеет непрерывный спектр и представляет собой излучение фотосферы, рассеянное по

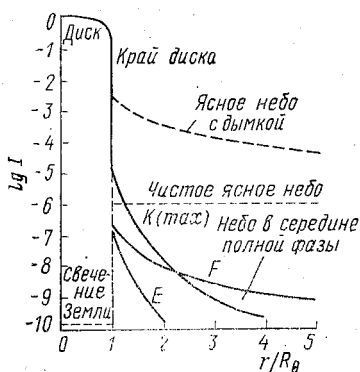


Рис. 1.11. Интенсивность трех составляющих электромагнитного излучения короны

направлению к наблюдателю свободными электронами короны. Вторая составляющая короны — корона F — возникает от рассеяния на относительно тяжелых твердых частицах, медленно движущихся между Землей и Солнцем в плоскости эклиптики. В противоположность короне K имеет спектр с фраунгоферовыми линиями. Корона F возникает так же, как и зодикальный свет, поэтому ее иногда называют «внутренним зодикальным светом».

Третья составляющая короны — E — представляет собой излучение в спектральных линиях, испускаемое ионами коронального газа. А поскольку тепловые скорости ионов

малы (по сравнению со скоростями электронов), то излучаемые линии не размываются доплеровским расширением (нет континуума) в отличие от фраунгоферовых линий короны K .

Распределение логарифма интенсивности трех составляющих короны в зависимости от расстояния r представлено на рис. 1.11.

Поскольку корональный газ прозрачен почти для всего собственного излучения, он не находится в состоянии термодинамического равновесия. Поэтому использование понятия температуры для оценки энергетического состояния коронального газа имеет свои особенности.

Температура короны имеет порядок 10^6 К (для внутренней короны принято $1,5 \cdot 10^6$ К). Однако несмотря на столь высокую температуру, общее количество энергии, заключенное в короне, невелико. Причиной этого является исключительно низкая концентрация частиц: на расстоянии $4 R_{\odot}$ в 1 см^3 коронального газа содержится 10^5 частиц (в земной атмосфере на уровне моря — 10^{19} см^{-3}). Из-за низкой плотности корона излучает в 10^3 раз меньше энергии, чем хромосфера. Большая часть излучения короны приходится на высокоэнергетические области спектра — рентгеновскую и далекую ультрафиолетовую (вследствие высокой температуры короны).

Корона не статична. Она расширяется в вакуум межпланетного пространства под действием собственного градиента давления в направлении, противоположном действию солнечной гравитации так, что поток солнечных частиц, называемый «солнечным ветром», достигает Земли со сверхзвуковой скоростью ($\sim 400 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$), проходя расстояние от Солнца до Земли приблизительно за 5 суток. «Температура» этого потока $\approx 10^5$ К, концентрация — несколько частиц на 1 см^3 .

Вещество короны имеет высокую электропроводность, поэтому его распределение контролируется в значительной степени солнечным магнитным плем. Значит, изучение ее структуры может дать представление о конфигурации магнитных полей Солнца.

Корона сильно меняется от затмения к затмению (рис. 1.12). Это обусловлено не только ее вращением вместе с Солнцем, но и физическим изменением структурных образований. Большие лучи короны — «опахала» — существует один-три месяца, полярные — до нескольких дней. В течение одиннадцатилетнего цикла солнечной активности происходит не только смена одних корональных структур другими, вновь возникшими. Меняется общий вид короны, который зависит от направления лучей и расположения их на Солнце. В минимуме активности большие лучи вытягиваются вдоль солнечного экватора, а полярные занимают обширные области. В максимуме полярные лучи практически исчезают, а большие «опахала» — направлены радиально и присутствуют на всех гелиографических широтах. Все эти перемены формы короны отражают изменения структуры суммарного магнитного поля Солнца в зависимости от фазы активности.

Корональные образования тесно связаны с активными образованиями в нижних слоях солнечной атмосферы: с темными пятнами, яркими участками — факелами в фотосфере и с протуберанцами — облаками относительно холодного (6000 К) газа.

Вблизи Солнца, в пределах $\sim 3 R_{\odot}$, геометрия потока (солнечного ветра) определяется структурой магнитного поля Солнца. Однако на больших расстояниях от Солнца магнитное давление становится меньше газового, солнечный ветер искажает там магнитные поля, «вытягивая» их из окрестности Солнца далеко в меж-

планетное пространство. Следовательно, Земля погружена, по сути дела, во внешние слои солнечной атмосферы, только плотность этих слоев исключительно мала.

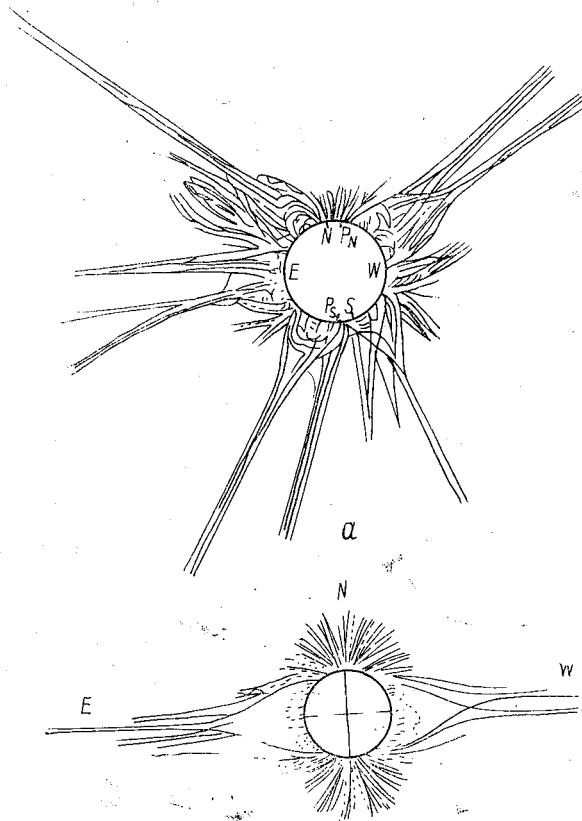


Рис. 1.12. Пример структуры солнечной короны во время максимума (а) и минимума (б) солнечных пятен

1.4. Магнитное поле Солнца

Источник солнечной энергии — термоядерный синтез в центральной области Солнца. Поскольку энергия освобождается с постоянной скоростью, можно было бы ожидать, что солнечное электромагнитное излучение всегда и повсюду одинаково на всех длинах волн. Однако, как следует из данных наблюдений, временами на некоторых участках солнечной поверхности наблюдаются быстрые колебания интенсивности уходящего электромагнитного излучения, причем особенно сильные всплески происходят в коротковолновой области спектра. Следовательно, существуют какие-то факторы,

нарушающие рассмотренную ранее сферически симметричную равновесную модель и приводящие к локализации выхода энергии в пространстве, времени и длинах волн.

Основным возмущающим фактором, нарушающим сферически симметричную равновесную модель Солнца, являются (наряду с дифференциальным вращением Солнца) крупномасштабные магнитные поля. Если бы Солнце совсем не имело магнитных полей, то оно было бы совершенно спокойной звездой (если такие звезды вообще существуют), без пятен, без каких-либо проявлений активности. Эти явления всецело определяются взаимодействием ионизированного солнечного вещества (плазмы) с магнитным полем, причем это поле создается плазмой.

Представление о том, что у Солнца должно быть постоянное дипольное магнитное поле, подобное крупномасштабному дипольному полю Земли, возникло в прошлом столетии. Оно было основано на «видимой» конфигурации магнитного поля Солнца, которая следовала из структуры солнечной короны. Однако новейшие наблюдения вызывают сомнения в существовании такого поля. Действительно, поскольку общее магнитное поле Солнца не имеет определенной оси и не симметрично, то, следовательно, нельзя считать, что его создает какой-то диполь, находящийся в Солнце.

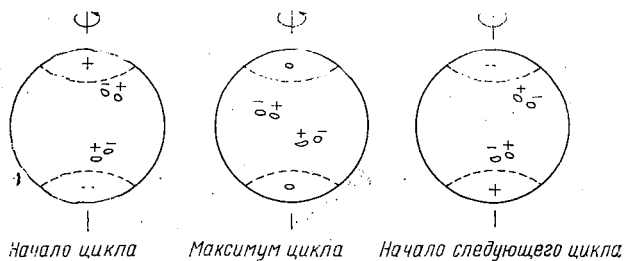


Рис. 1.13. Схема обращения знака полярных магнитных полей и полей пятен в ходе цикла солнечной активности

Кроме того, как было установлено Дж. Хейлом и С. Николсоном, полярность северной и южной областей Солнца меняется в ходе цикла солнечной активности каждые 11 лет*. Схема обращения знака полярных магнитных полей и полей пятен в ходе цикла солнечной активности представлена на рис. 1.13. За столь короткий срок как 11 лет изменения в магнитных полях не могут проникнуть далеко под поверхность Солнца. И, наконец, локальные магнитные поля на поверхности Солнца также не согласуются с классической картиной невозмущенного дипольного поля (за исключением сильных полей в отдельных солнечных пятнах). Все это является вескими аргументами для отказа от классического представления об

* Более подробно о законах Хейла—Николсона говорится в 2.2.

общем магнитном поле Солнца как поле стержнеобразного диполя, находящегося в центре Солнца.

Правильнее считать, что общее магнитное поле Солнца существует только в его внешних оболочках и представляет собой сложную суперпозицию систем мелкомасштабных и крупномасштабных магнитных полей. Большие области то одной, то другой полярности, имеющие далеко не однородную дипольную структуру, чередуются на диске Солнца. Однако и они состоят из множества более мелких областей поля различной полярности. Поля замыкающих областей больших групп пятен имеют тенденцию расширяться, превращаясь в протяженные униполярные области, дрейфующие к полюсу и вытягиваемые дифференциальным вращением.

Крупномасштабные магнитные поля могут быть представлены как комбинации:

— слабых протяженных униполярных магнитных областей (УМО), представляющих собой участки магнитных полей северной или южной полярности;

— биполярных магнитных областей (БМО) — компактных интенсивных полей противоположной полярности;

— мультиполярных областей, состоящих из двух и более смежных биполярных магнитных областей.

В малом масштабе магнитные поля имеют тонкую структуру с характерными размерами, определяемыми грануляцией.

С учетом общей структуры магнитных полей вместо термина «общее магнитное поле» используется термин «полярное магнитное поле». Оно выявляется при наблюдении солнечных полярных областей (выше широты 60°). Общие характеристики этого поля (его не надо путать с гипотетическим общим магнитным полем) медленно меняются во времени с характерным периодом в несколько лет. Смена знака полярных магнитных полей наблюдается во время максимума солнечной активности или непосредственно после него. Согласно современным представлениям, полярное поле в основном состоит из остатков дрейфующих частей активных областей, первоначально возникших в низких широтах. Обычно в двух полушариях наблюдается полярность противоположных знаков, хотя нередко случаются, когда в течение недель или месяцев в обоих полушариях полярность, усредненная в области полярной шапки, отчетливо не выражена или в обоих полушариях оказывается одного и того же знака.

Представление о магнитном поле Солнца в целом излагается в работах Г. В. Бэбкока, В. Бумбы и Р. Ховарда. Пример глобальной съемки магнитного поля Солнца (за август 1959 г., вскоре после максимума солнечной активности) приведен на рис. 1.14. Он демонстрирует наличие многочисленных БМО и УМО с типичными значениями напряженности магнитного поля (вне пятен) $1-20$ Гс*. В широтной зоне $|\varphi| < 40^\circ$ господствуют БМО; на каждой фикси-

* Напряженность земного магнитного поля $\sim 0,6$ Гс.

рованной широте чередуются области положительной и отрицательной полярности; оси областей наклонены к кругам широты так, что их западные концы ближе к экватору, чем восточные. Движение этих областей происходит приблизительно вдоль магнитных силовых линий. В каждой из полярных областей $|\varphi| > 40^\circ$ господствуют УМО соответствующей полярности, что можно считать указанием на существование полоидальной составляющей магнитного поля Солнца.



Рис. 1.14. Пространственное распределение магнитного поля Солнца за один период вращения (август 1959 г.):
1 и 2 — области с компонентой магнитного поля вдоль луча зрения более 2 Гс соответственно положительной и отрицательной полярности

Глава 2. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

2.1. Центры активности Солнца

Кроме гранул, супергранул и спиккул, свойственных нормальной (невозмущенной) атмосфере, в последней наблюдается также ряд «возмущений». Эти «возмущения» наблюдаются в центрах активности Солнца. Понятие центра активности впервые было введено М. Н. Гневышевым в 1938 г. Можно дать следующие определения центра активности Солнца.

1. В широком смысле — центром активности можно назвать комплекс взаимосвязанных и взаимообусловленных явлений солнечной активности в различных слоях Солнца, локализованных в ограниченной ее области. Определяющим в этом процессе являются магнитные поля.

2. В узком смысле — центром активности называется только такой комплекс явлений, который содержит хотя бы одну группу

пятен с одной или несколькими солнечными вспышками, а в случае отсутствия последних — с площадью группы пятен не менее 100 м. д. п. (м. д. п. — миллионные доли площади видимой полусферы Солнца).

В центр активности входят весьма разнообразные по своим особенностям образования на Солнце. Они относятся к различным слоям солнечной атмосферы (фотосфере, хромосфере и короне) и резко различаются по продолжительности своего существования. Последнее позволило Э. Гибсону подразделить явления солнечной активности по скорости их изменения на три типа:

- 1) быстрые (например, возрастание яркости хромосферной вспышки);
- 2) промежуточные (например, развитие активной области);
- 3) медленные (например, нарастание активности от минимума до максимума цикла).

Временные шкалы этих явлений заключены между несколькими годами и несколькими секундами.

К первому типу центров солнечной активности относятся кратковременные явления с продолжительностью существования от десятых долей секунды до десятков минут. Это солнечные вспышки, а также движущиеся и обладающие бурными изменениями протуберанцы.

Ко второму типу относятся активные образования со временем жизни от нескольких часов до нескольких месяцев. Это группы солнечных пятен, факельные площадки, корональные конденсации, спокойные протуберанцы (волокна).

Историю «жизни» центра активности Ю. И. Витинский, А. И. Оль и Б. И. Сазонов условно подразделяют на три стадии, которые присущи не только наиболее развитому, но любому центру активности:

- 1) начальную (до появления группы пятен);
- 2) активную (или «факельную»);
- 3) конечную (после разрушения факельной площадки).

Центры солнечной активности образуются в ходе развития так называемых активных областей.

Активная область (АО) представляет собой исключительно сложное явление, включающее в себя большое число разнообразных, но связанных между собой событий, протекающих в фотосфере, хромосфере и короне. Активные области сильно различаются по размерам, внешнему виду и продолжительности жизни. Продолжительность жизни АО колеблется от нескольких часов до нескольких месяцев. Наличие тех или иных явлений активности определяется фазой и стадией эволюции АО. Вид и размеры АО зависят от того, в каком спектральном диапазоне проводятся наблюдения, а также от возраста АО.

Особенности АО определяются сильным магнитным полем, которое влияет на ее развитие и характер. В местах выхода подповерхностного магнитного потока на поверхность образуется про-

тяженная биполярная или мультиполярная область с сильной концентрацией поля в солнечных пятнах.

С физической точки зрения активные области (вне солнечных пятен) характеризуются повышенной плотностью и температурой и соответственно повышенным излучением по всему спектру от рентгеновского до радиодиапазона (за исключением некоторых спектральных линий). Например, плотность в корональной части АО (корональная конденсация) может возрасти в десять раз, температура — в пять раз, а радиоизлучение — на несколько порядков. Для активных областей также характерны крупномасштабные потоки плазмы (со скоростями до $\sim 100 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) и ускорение частиц, а также повышенное излучение в крайнем ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

Новые активные области имеют тенденцию развиваться вблизи уже существующих или недавно существовавших областей. Так, на 27-дневных календарях выявляются скопления активных областей в виде длинных рядов на предпочтительных (активных) долготах, представляющие собой комплексы активности (семейства). Комплексы активности, по-видимому, имеют постоянный 27-дневный период вращения независимо от солнечной широты.

Как показывают наблюдения, предпочтительные долготы сохраняются в течение нескольких лет. Они отличаются также повышенной частотой протонных вспышек. Похоже, что предпочтительные долготы существуют попарно на расстоянии 180° друг от друга. Возможно, тенденция солнечной активности к такой группировке объясняется тем, что области комплекса создаются на солнечной поверхности устойчивыми подповерхностными источниками, имеющими постоянный период вращения.

Для центров активности характерен ряд явлений, характеризующих солнечную активность.

Главным среди этих явлений являются:

- пятна;
- факелы (флоккулы);
- хромосферные вспышки;
- протуберанцы;
- корональные лучи;
- корональные дыры.

Рассмотрим основные особенности этих важнейших явлений солнечной активности, происходящих в солнечной атмосфере.

2.2. Солнечные пятна

Солнечные пятна — это наиболее отчетливо видимые неоднородности на поверхности Солнца. Они иногда видны даже невооруженным глазом, через закопченное стекло или просто сквозь дым. Известны такие наблюдения более 2000-летней давности. Зарисовки солнечных пятен и первые сведения об их форме и распространенности появились сразу после изобретения телескопа в

1611 г. По движению пятен на солнечном диске Фабрициус установил факт вращения Солнца, а Галилей получил первую оценку скорости этого вращения.

Солнечные пятна образуются в БМО, вероятно, в результате модификации и частичного подавления конвективных движений в подфотосферном грануляционном слое сильным магнитным полем (при наличии которого движения плазмы поперек магнитных силовых линий становятся крайне затрудненными): ослабление конвективного теплопереноса приводит к охлаждению фотосферного газа и, следовательно, к появлению относительно холодных пятен.

Пятна зарождаются в виде маленьких темных пор диаметром в 2—4". Типичное зрелое пятно состоит из темной центральной тени со средним диаметром около 17,5 тыс. км и яркостью в 20—30% от яркости окружающего фона (невозмущенной фотосферы). Эту тень окружает менее темная кольцеобразная полутень со средним внешним диаметром около 37 тыс. км и яркостью в 75—80% от яркости фона. Типичная площадь пятна 10^{-4} от площади видимой поверхности Солнца. Компенсируя сниженный уровень излучения в области тени и полутени, вокруг пятна на расстоянии от его центра в среднем 50 тыс. км располагается кольцо с повышенной яркостью (приблизительно на 3% выше фона); оно наиболее резко выражено в верхней хромосфере над пятном.

Время существования индивидуальных солнечных пятен варьирует от нескольких дней до нескольких месяцев.

Солнечные пятна кажутся темными лишь по контрасту с невозмущенной фотосферой. Их кажущаяся чернота означает, что их излучение в видимом свете меньше, чем у невозмущенной фотосферы. Фотосфера находится в состоянии локального термодинамического равновесия и для нее радиационная температура будет близка к обычной (кинетической) температуре газа. Поэтому, считая, что пятна, как и фотосфера вообще, излучают как абсолютно черное тело, можно сравнить их радиационные температуры. Измеренная по интенсивности интегрального излучения средняя температура тени больших солнечных пятен равняется приблизительно 4200 К, приблизительно на 1600 К ниже температуры невозмущенной фотосферы.

Температура тени пятен заметно уменьшается с увеличением их площади. По измерениям в различных спектральных линиях температуры излучения одного и того же пятна оказываются различными. Но даже для пятен одинаковой площади по измерениям в одной и той же спектральной линии температуры излучения могут варьировать более чем на 1000 К (например, за счет разных глубин формирования этой линии).

Измерения скоростей движения газа в солнечных пятнах по доплеровскому сдвигу частот «центров тяжести» отдельных спектральных линий позволили Дж. Эвершеду еще в 1909 г. установить, что на уровне невозмущенной фотосферы и глубже газ вытекает из пятна с некоторым антициклоническим закручиванием по направ-

лениям, указываемым волокнами полутени (и с некоторой восходящей составляющей) со скоростью около $2 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, растущей с глубиной в фотосфере до $5\text{--}6 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. Более поздние измерения показали, что такое движение прослеживается до высот $500\text{--}1000 \text{ км}$ над поверхностью Солнца, а выше оно меняет знак, и на высотах примерно 2000 км в хромосфере наблюдается циклонически закрученное втекание газа в пятно с некоторой нисходящей составляющей.

Солнечные пятна наблюдаются лишь в определенных широтных зонах, внутри так называемых «королевских» широт (от 5° до 52° в каждом полушарии); подавляющее большинство пятен — в зоне от 8° до 30° широты (рекордно высокая широта появления пятен 52° была отмечена 13 августа 1953 г.).

Такое неравномерное распределение иллюстрирует рис. 2.1., на котором представлено распределение по гелиографической широте числа групп пятен с площадью более 500 м. д. п. в северном и южном полушариях Солнца.

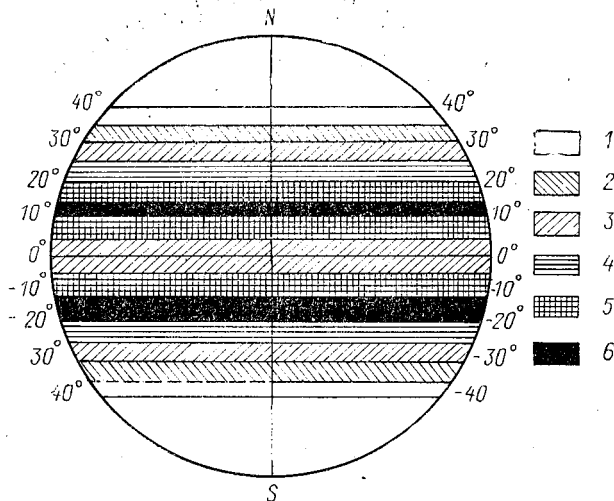


Рис. 2.1. Распределение по гелиографической широте числа групп пятен с площадью более 500 м. д. п. за 1874—1953 гг. Число групп пятен в области 1—0; 2—от 1 до 9; 3—от 10 до 19; 4—от 20 до 49; 5—от 50 до 99 и в области 6—от 100 до 149

Еще одной особенностью распределения солнечных пятен, которое еще в 1889 г. заметил А. Вольфер, является тот факт, что в течение нескольких лет или даже десятков лет может отмечаться повышенное (против среднего) количество пятен в некоторых активных долготных зонах, которое медленно меняется со временем.

Пятна в подавляющем большинстве появляются и существуют группами в среднем по 10 сут., но 37% групп имеют время жизни

больше 10 сут., 0,4% — больше 50 сут., 0,03% — больше 100 сут., 0,01% — больше 150 сут. Продолжительность существования группы пятен сильнее всего зависит от занимаемой этой группой площади и приблизительно пропорциональна последней: при площади $1 \cdot 10^{-4}$ от поверхности видимой полусферы время жизни группы пятен равняется 10 сут, при площади $4 \cdot 10^{-4}$ — 40 сут. За один солнечный цикл (в среднем 11,2 года) наблюдается около 3000 групп пятен.

Исключительно большое значение для понимания природы солнечных пятен имеет обнаружение в них сильных магнитных полей (измерения магнитных полей в солнечной атмосфере основываются на эффекте Зеемана — расщеплении спектральных линий в магнитном поле).

Раздвоение некоторых линий в спектрах солнечных пятен было замечено еще в 1866 г. Локьером, но лишь Дж. Хейл в 1908 г. открыл наличие в солнечных пятнах сильных магнитных полей. Измерениями Дж. Хейла на обсерватории Маунт—Вилсон в течение 1908—1924 гг. (результаты которых опубликованы им совместно с С. Николсоном в 1938 г.) создана основа современных сведений о магнитных полях солнечных пятен. Напряженность магнитного поля в центре пятна H растет с его площадью, имея значения порядка 100 Гс у наименьших и 4000 Гс у больших пятен; от центра пятна к его краю напряженность поля H спадает приблизительно по закону

$$H(r) = H \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right), \quad (2.1)$$

где r_0 — радиус пятна; r — расстояние от его центра. Магнитный поток, идущий через поверхность типичного пятна, имеет значения порядка 10^{21} Мкс. По мере развития пятна магнитный поток в нем сначала быстро возрастает, а затем остается приблизительно постоянным в течение значительной части жизни пятна; площадь пятна при этом растет, а напряженность поля убывает.

По характеру магнитного поля в областях, занимаемых группами пятен, как уже отмечалось ранее, различают униполярные (УМО), биполярные (БМО) и мультиполярные магнитные области. Из них БМО составляют подавляющее большинство (так, из 6384 групп пятен, зарегистрированных за 1919—1946 гг., 91% были БМО, 8,6% — УМО и только 0,4% составляли мультиполярные области). Поэтому ясно, что основное внимание должно быть сосредоточено на БМО.

В каждой БМО имеется переднее (в смысле направления вращения Солнца), или лидирующее пятно, которое мы будем обозначать буквой p и одно или несколько задних, или замыкающих пятен, f . Магнитные полярности пятен p и f в данной БМО всегда противоположны.

По занимаемой площади пятна p в среднем больше пятен f , имеют большие значения времени жизни, магнитный поток в них в среднем втрое больше, чем в пятнах f . БМО имеют, как правило, овальную форму и их большие оси наклонены к кругам широты так, что пятно p ближе к экватору, чем f . Угол наклона уменьшается с увеличением возраста БМО и с уменьшением широты.

Схему образования магнитного поля БМО вследствие дифференциального вращения Солнца поясняет рис. 2.2. Согласно этой схеме образование БМО может быть связано с всплыванием из-под подфотосферного грануляционного слоя некоторого участка магнитной силовой «трубки», которое создается локальным усилением магнитного поля. Такое усиление возможно, например, из-за неравномерности растяжения «трубки» дифференциальным вращением. При естественной тенденции к выравниванию полного (гидродинамическое плюс магнитное) давления усиление магнитного поля должно приводить к появлению архимедовой силы плавучести. Различие же формы и эволюции пятен p и f можно объяснить различием в действии на p и f — участки магнитной силовой «трубки» растущей с высотой угловой скорости вращения фотосферного газа.

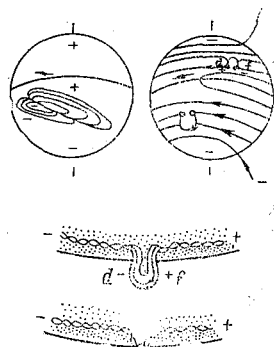


Рис. 2.2. Схема образования магнитного поля биопольярной группы солнечных пятен

Характер и особенности изменения во времени полярности как «общего» магнитного поля Солнца, так и магнитных полей p и f пятен описывают так называемые законы Хейла—Николсона. Согласно этим законам в пределах одного 11-летнего солнечного цикла в биопольярных магнитных областях все пятна p одного полушария и все пятна f другого полушария имеют одинаковую полярность, а в следующем цикле полярности всех таких пятен меняются на обратные, так что каждый солнечный цикл является эпохой постоянного распределения магнитных полярностей в БМО. Смены циклов соответствуют обращению полярности, и полный магнитный цикл содержит два соседних цикла пятен. Эти законы Хейла—Николсона показывают, с одной стороны, что механизм генерации магнитных полей в БМО действует колебательным образом, производя довольно регулярные (квазипериодические) обращения полярности генерируемого поля; с другой стороны, из этих законов видно, что генерация магнитных полей в БМО, и колебаний солнечной активности осуществляется одним и тем же механизмом. Таким образом, становится ясно, что теория солнечного цикла является глобальной проблемой магнитной гидродинамики Солнца.

2.3. Факелы

Факелы — это сравнительно долго живущие яркие области около солнечных пятен (маленькие факелы могут быть и не связанными с пятнами, но пятен без факелов не зарегистрировано). Они наблюдаются как на краю диска в белом свете, т. е. в фотосфере, так и по всему диску Солнца в свете хромосферных линий.

Яркие элементы хромосферных факелов называют флоккулами.

Фотосферные факелы имеют гранулярную структуру. Их яркость в среднем на 5—10% выше яркости невозмущенной фотосферы. В наиболее ярких факельных гранулах это превышение достигает 40—45%, а иногда доходит даже до 150%.

Большинство факелов появляется в области «королевской» широтной зоны, но простирающейся на 10° дальше в сторону полюсов и на 5° ближе к экватору. Кроме того, наблюдается небольшое количество полярных факелов, приблизительно равномерно распределяющихся по широтам $|\varphi| > 68^\circ$ (это маленькие округлые яркие пятна размерами 1800—3000 км со средним временем жизни всего около полсуток, появляющиеся более часто в эпохи минимумов солнечной активности).

Крупные факелы, связанные с солнечными пятнами, нередко появляются за несколько часов или даже за несколько суток до появления пятен и наблюдаются долго после их исчезновения, так что время жизни факелов оказывается в среднем втрое больше, чем у пятен; нередко они остаются видимыми в течение нескольких оборотов Солнца.

2.4. Солнечные вспышки

Солнечная вспышка — процесс взрывообразного характера, охватывающий небольшую по площади область атмосферы Солнца и проявляющийся во внезапном усилении эмиссионных линий водорода, кальция, гелия и других химических элементов в оптическом диапазоне длин волн, усилении рентгеновского излучения, появлении всплесков (или необычных явлений) в радиодиапазоне, активизации спокойных протуберанцев и образований протуберанцев-выбросов и петельных протуберанцев.

Согласно современным представлениям солнечная вспышка являет собой реакцию солнечной атмосферы (главным образом хромосферы и короны) на внезапный быстрый процесс выделения энергии (по всей вероятности, магнитного происхождения). Этот процесс приводит прежде всего к локализованному внешнему нагреву (тепловая вспышка), а также к ускорению электронов, протонов и тяжелых ионов (вспышка с выбросом частиц, или высокоэнергетическая вспышка). При этом:

— температура в хромосфере достигает $\sim 10^4$ К (хромосферная, или низкотемпературная вспышка), а в короне $\sim 10^7$ К (высокотемпературная вспышка);

— генерируется кратковременное излучение в широком диапазоне длин волн: от жесткого рентгеновского с $\lambda \sim 10^{-9}$ см (в очень редких случаях от γ -излучения с $\lambda \sim 2 \cdot 10^{-11}$ см) до километровых радиоволн с $\lambda \sim 10^6$ см, которое по своей природе преимущественно тепловое*.

Вспышки тесно связаны с активными областями и происходят в основном в молодых или развитых активных областях (преимущественно в факельных площадках с группами пятен). Вероятность их появления увеличивается с ростом максимальной магнитной напряженности группы пятен, усложнением магнитной конфигурации (т. е. увеличением числа магнитных полюсов группы) и возрастанием градиента магнитного поля. Однако часть вспышек (7% больших вспышек) происходит между активными областями или в старых активных областях с остатками флоккулов, в которых нет или почти нет пятен. Кроме того, необходимо отметить, что вспышки во многих случаях появляются «кортежами», в которых возникновение одной вспышки как бы предвещает появление следующих.

Полная энергия, выделяющаяся во время вспышек, колеблется в диапазоне $10^{30} \div 10^{32}$ эрг. Причем в видимом диапазоне длин волн выделяется большая часть их энергии, тогда как в рентгеновской и ультрафиолетовой областях на один-два порядка меньше. Энергия космических лучей солнечных вспышек и фронта межпланетной плазмы находится в пределах 10^{29} — 10^{31} эрг. Энергия вспышек в радиодиапазоне значительно ниже.

Продолжительность существования вспышек зависит от их интенсивности и колеблется от 20—30 мин до 60—150 мин. Вспышка может начаться либо с так называемой флэш-фазы, либо ей может предшествовать некоторое медленное уярчение, называемое предварительным нагревом.

Ф л а ш-ф а з о й вспышки называется период быстрого уярчения и роста площади вспышки до максимума. Продолжительность этого периода колеблется от нескольких минут до 15 минут. Во флэш-фазе часто наблюдается взрывная, или импульсная фаза: внезапное быстрое (в течение ~ 1 мин) возрастание яркости на небольшом участке вспышки (появляется так называемая импульсная вспышка), которое иногда сопровождается быстрым расширением этого участка.

Взрывная вспышка, по-видимому, является источником волн Моретона.

Волна Моретона — это волновое возмущение, которое генерируется сильными вспышками и распространяется в горизонтальном секторе $\sim 90^\circ$ с характерной скоростью ~ 1000 км·с⁻¹. Оно проявляется в виде:

* Лишь на очень коротких волнах и в радиодиапазоне наблюдаются нетепловые импульсные всплески излучения, генерированные энергичными частицами (нетепловое излучение, синхротронное излучение и т. д.) или ударными волнами.

— яркого или темного фронта (или их совокупности), движущегося от вспышки в хромосфере и представляющего собой последовательное опускание хромосферных элементов вдоль фронта (движении хромосферы вниз — вверх);

— колебательных движений удаленных волокон («мигание»), возбуждаемых прохождением корональной волны.

Солнечная вспышка оказывает существенное влияние на все (или почти все) составляющие центра активности и тем самым как бы определяет дальнейший ход их развития. По этой причине до сих пор нет удовлетворительной теории, которая полностью объясняла бы явление солнечной вспышки. Большинство существующих описаний носят эвристический или в лучшем случае полуколичественный характер. Даже по вопросу о физическом механизме не существует единого мнения.

Классификация солнечных вспышек основана на оценке площади и яркости вспышки, причем эти параметры оцениваются отдельно.

Площадь вспышки определяется в момент ее максимальной яркости как площадь всех участков хромосферы, урчающихся в линии водорода H_{α} , и выражается либо в миллионных долях солнечной полусферы (м. д. п.), либо в квадратных гелиографических градусах в центре солнечного диска. Причем это всегда исправленная площадь S , которая выводится из видимой площади S_i с помощью поправочного коэффициента:

$$S = \sum_i S_i \cdot \sec \theta_i, \quad (2.2)$$

где S_i — площадь i -го участка, а

$$\theta_i = \arcsin r_i/R, \quad (2.3)$$

где R — радиус видимого солнечного диска; r_i — расстояние от его центра до центра i -го участка.

Связь между различными единицами измерений площади позволяют определить следующие соотношения:

$$100 \text{ м. д. п.} = 3,04 \cdot 10^8 \text{ км}^2,$$

$$1 \text{ квадратный градус} = 1,48 \cdot 10^8 \text{ км}^2.$$

По площади все вспышки подразделяются на пять групп. Классификация солнечных вспышек в зависимости от занимаемой ими площади представлена в табл. 2.1. Вспышки балла S называются субвспышками, а вспышки балла ≥ 2 — большими вспышками.

По яркости солнечные вспышки делятся на слабые, нормальные и яркие и соответственно обозначаются буквами F , N и B . Однако количественной оценки яркости, которая соответствовала бы этим буквам, нет.

Сочетание индекса площади с индексом яркости дает двойной балл или класс вспышки, например $1N$, SB и т. д.

Классификация солнечных вспышек в зависимости от занимаемой ими площади

Балл	Площадь, м. д. п.	Площадь, квадратные градусы
S	< 100	< 2,0
1	100—250	2,1—5,1
2	250—600	5,2—12,4
3	600—1200	12,5—24,7
4	> 1200	> 24,7

Наряду с описанной классификацией, Додсон и Хедеман в качестве экспериментальной попытки оценить электромагнитное излучение комплексных вспышечных явлений ввели обобщенный индекс вспышки CFJ . Он определяется по формуле

$$CFJ = A + B + C + D + E, \quad (2.4)$$

где A — величина ионизирующего излучения по шкале 1—3, определяется по величине связанного с ним внезапного ионосферного возмущения; B — балл вспышки в H_z по шкале 1—3 (цифрой 3 обозначаются вспышки балла 3 и 4); C — логарифмы потока радиоизлучения на $\lambda = 10$ см в единицах 10^{-22} Вт/м². Гц; D — эффекты в динамическом спектре радиоизлучения; E — логарифм потока радиоизлучения на частоте 200 МГц в тех же единицах, что и C .

Последовательность этих пяти компонентов составляет примерный профиль излучения вспышки от коротких до длинных волн. Величина индекса изменяется в пределах от 0 до 17, причем значениям, превышающим 10, соответствуют вспышки с необычно сильным электромагнитным излучением. Этот индекс полезен главным образом при характеристике особенно значительных сложных вспышек и был рассчитан для наиболее мощных вспышек 1955—1969 гг. и 1970—1974 гг.

В заключение данного параграфа отметим, что частота появления вспышек меняется в широких пределах в зависимости от фазы солнечного цикла. В табл. 2.2. показано число вспышек балла ≥ 1 за год для 20-го цикла солнечной активности. Следует заметить, что даже на спаде 11-летнего цикла бывают периоды обилия вспышек, совпадающие с прохождением изредка наблюдающихся и в это время крупных центров активности. Субвспышки (площадь < 100 м. д. п.) наблюдаются примерно в десять раз чаще, чем вспышки балла ≥ 1 . Небольшие субвспышки достаточно часто наблюдаются везде, где есть центр активности, даже в годы минимума солнечной активности и при отсутствии вспышек балла ≥ 1 .

Число вспышек балла ≥ 1 за год для 20-го цикла солнечной активности (1964—1974 гг.)

Год	Число вспышек балла 1	Число вспышек балла 2 и выше	Общее число вспышек	Среднегодовые цюрихские числа солнечных пятен
1964	11	2	13	10,2
1965	82	6	88	15,1
1966	240	50	290	47,0
1967	458	63	521	93,8
1968	518	51	569	105,9
1969	567	64	631	105,5
1970	585	52	637	104,5
1971	176	13	189	66,2
1972	218	17	235	68,9
1973	128	13	141	38,0
1974	150	13	163	34,5

2.5 Протуберанцы

Протуберанцы — это лентообразные холодные сгущения газа во внутренней короне, видимые на краю Солнца как светящиеся выступы, а на диске — как темные волокна. Типичный спокойный протуберанец имеет длину до 200 тыс. км (иногда она доходит даже до 1900 тыс. км), высоту 50 тыс. км, ширину не более 6000 км и состоит из нитей диаметром около 1000 км; его среднее время жизни — три оборота Солнца. Протуберанцы наблюдаются, во-первых, в зоне широт, содержащей солнечные пятна, но смещенной к полюсам, и, во-вторых, в высоких широтах (венец полярных протуберанцев).

Протуберанцы, связанные с пятнами, нередко имеют форму арок, дуг, фонтанов и петель, вероятно, следующих конфигурации магнитных силовых линий. Сконденсированное в протуберанцах вещество, «поддерживаемое» магнитным полем, преимущественно стекает вниз. Схему магнитной «поддержки» протуберанцев иллюстрирует рис. 2.3.

Протуберанцы почти всегда возникают в факельной области, как правило, с ее полярной стороны, причем, волокно обычно направлено к пятну (80% волокон к пятну p) и, по-видимому, в момент образования пятна расположено по меридиану. Затем волокно растягивается (в среднем на 100 тыс. км за оборот) и приобретает специфическую форму деформированного дифференциальным вра-

щением Солнца отрезка меридиана, причем высокоширотная часть волокна приближается к направлению на запад. Кроме того, волокно слегка смещается к полюсу (со скоростью от $2,3^\circ$ широты за оборот в широтной зоне $0-10^\circ$ до $0,8^\circ$ за оборот в зоне $51-69^\circ$); это смещение происходит путем разрушения низкоширотного и наращивания высокоширотного концов волокна. Наконец, почти все волокна претерпевают фазу внезапного исчезновения — за несколько часов стекают в хромосферу или всплывают в корону, или просто сжимаются, а через несколько дней вновь возникают в старой форме.

В протуберанцах типичная температура $15\,000\text{ К}$, электронная плотность $2 \cdot 10^{10}$, при этом плотность вещества равна $2 \cdot 10^{-14}\text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, при скоростях около $5\text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ плотность кинетической энергии равна $0,002\text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$ («невозмущенная» корона на этой же высоте характеризуется температурами до $700\,000\text{ К}$ и плотностями числа электронов порядка $2 \cdot 10^8$).

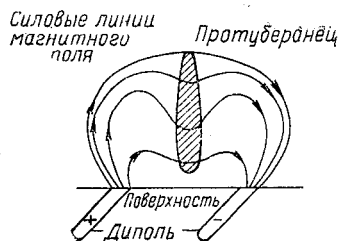


Рис. 2.3. Схема магнитной «поддержки» протуберанца

2.6 Корональные лучи и дыры

В короне выделяются лучи, которые имеют толщину у основания около 7000 км и электронную плотность впятеро больше, чем в окружающем веществе. Лучи тесно связаны с протуберанцами (на краю диска они часто совпадают) и, по-видимому, обычно являются корональными оболочками волокон; последние определяют общее распределение изофот белой короны. Одной из распространенных форм структуры короны являются опахала — лучи, склоняющиеся над системой концентрических дуг, охватывающих относительно темный купол, окружающий протуберанец.

Одним из важных событий в изучении Солнца в середине 70-х годов было открытие областей разрежения короны — корональных дыр. Установлена также связь этих образований с высокоскоростными струями солнечного ветра.

Расхождение магнитных силовых линий в короне действует как сопло Лавала — движение газа в областях расхождения силовых линий ускоряется до сверхзвуковых скоростей и приводит к разрежению газа. Основным материалом о «дырах» был накоплен на орбитальной космической станции «Скайлэб», хотя были привлечены и наземные наблюдения. Эти дыры формируются в фотосфере, но контролируются магнитным полем внутренней короны. Хотя дыры имеют тенденцию группироваться в полярных областях Солнца, их вращение жестко связано с вращением экваториальной зоны. Существуют также и корональные дыры, расположенные вблизи экватора Солнца.

2.7 Индексы солнечной активности

Для изучения временных закономерностей солнечной активности используются численные характеристики (индексы), характеризующие солнечную активность.

1. Числа Вольфа W (относительные числа солнечных пятен). Они определяются по формуле

$$W = k(10g + f), \quad (2.5)$$

где g — число групп пятен на видимом диске Солнца; f — число пятен во всех группах, включая ядра и поры; k — коэффициент, который выводится из сравнения различных рядов наблюдений и определяется условиями видимости, используемым инструментом, методом наблюдения, индивидуальными особенностями наблюдателя. Большого внимания ежедневным значениям чисел Вольфа придавать нельзя, а среднемесячные и среднегодовые могут быть использованы, поскольку надежность их в силу усреднения значительно выше. Среднемесячные значения W известны с 1749 г.

2. Плотность потока F_λ радиоизлучения Солнца на различных длинах волн λ : от декаметров до миллиметров, выраженная в 10^{-22} Вт · м⁻² · Гц⁻¹.

Наиболее надежные данные по излучению Солнца получены на частоте 2800 МГц ($\lambda = 10,7$ см) в Оттаве ($F_{10,7}$). Этот индекс имеет больший физический смысл, чем индекс W , поскольку интенсивность ионизирующего излучения Солнца пропорциональная изменению интенсивности радиоизлучения в этом диапазоне.

Число солнечных пятен тесно связано с радиоизлучением Солнца в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. М. Николе установил, что существует линейная корреляция между средненными за 27-дневный период значениями W (W_{27}) и величинами потока радиоизлучения на волне 10,7 см ($F_{10,7}$).

На тесную корреляцию между среднемесячными значениями $F_{10,7}$ и W в период 1957—1964 гг. указано в работе Швентека. Однако для $W < 30$ солнечный поток на 2800 МГц ослабляется меньше, чем ожидалось, т. е. характер связи W с $F_{10,7}$ будет различным для $W > 30$ и $W < 30$.

Теснота связи между W и рентгеновским излучением в различных диапазонах длин волн также не одинаковая.

3. Индекс Sa II. Он рассчитывается по формуле

$$S_{Ca II} = \sum_i I_i A_i \cos \left\{ \frac{2\pi(t - t_i)}{27} \right\} \cos L_i,$$

где t — время, число дней; t_i — время (число дней), когда i -й флоккул проходил через центральный меридиан; L_i — широта флоккула; I_i — интенсивность флоккула; A_i — площадь флоккула.

Суммирование производится для всех флоккул, видимых в момент времени t .

4. Корональные индексы солнечной активности. Каждый из них определяется интенсивностью различных корональных линий (чаще всего берут линии 530,3 и 637,4 нм). Наиболее надежные данные получены в Пик дю Миди (Франция) и Горной астрономической станции ГАО АН СССР.

Из других, менее используемых индексов; отметим следующие:

5. Суммарные площади солнечных пятен S_n . Суммарная площадь пятен определяется как сумма площадей всех групп пятен; видимых на солнечном диске, исправленных за перспективное сокращение по формулам (2.2) и (2.3).

Обычно эта площадь выражается в миллионах долей видимой полусферы Солнца (м. д. п.). Коэффициент корреляции W и S_n превышает величину 0,8. В среднем W и S_n связаны соотношением $S_n = 16,7 W$. Индексы W и S_n отражают в основном приток ультрафиолетовой радиации Солнца.

6. Суммарная площадь солнечных факелов S_ϕ . Выражается в миллионных долях видимой полусферы Солнца. Величина суммарных площадей фотосферных факелов зависит от того, какой минимальный контраст яркостей может быть выделен на используемых фотогелиограммах. Вероятно поэтому имеются большие различия между гринвичской и пулковской системами суммарных площадей фотосферных факелов.

7. Волновой индекс солнечной активности S_B . Этот индекс является функцией площадей пятен, факелов и светлых колец и их яркости. Его вычисление производится по формуле

$$S_B = av S_\phi + cd S_n - S_n, \quad (2.7)$$

где a — переменное отношение яркости факелов и пятен, v — переменное отношение площадей факелов по пулковскому и гринвичскому каталогу; c — отношение площадей светлых колец и пятен (равно $\sim 2,5$); d — отношение яркости светлых колец и пятен (равно $\sim 0,104$); S_ϕ , S_n — площади факелов и пятен по гринвичскому каталогу.

Подставив в формулу значения c и d и выполнив элементарные преобразования, запишем индекс в таком виде:

$$S_B = av S_\phi - 0,74 S_n. \quad (2.8)$$

«Технология» получения этого индекса изложена в работах В. Ф. Логинова. Описание других индексов (индекс рекуррентности, индекс М. Копецкого и др.) можно найти в работах М. С. Эйгенсона и Б. М. Рубашева.

2.8. Цикличность солнечной активности

Открытие солнечной цикличности, как известно, принадлежит Г. Швабе, который на основе анализа результатов своих 20-летних наблюдений получил продолжительность цикла, равную 10 годам. Позднее эта цикличность была подтверждена Р. Вольфом и получила название закона Швабе — Вольфа, который гласит, что

относительные числа солнечных пятен испытывают циклические изменения со средним периодом 11,1 года. Этот закон имеет гораздо более широкий, универсальный смысл и относится не только к среднему числу солнечных пятен, а ко всей солнечной активности в целом.

На рис. 2.4 в графической форме представлен ряд чисел Вольфа за период от 1754 по 1977 г. При его рассмотрении сразу же заметен циклический характер изменения значений W , причем наиболее резко выражен именно 11-летний цикл.

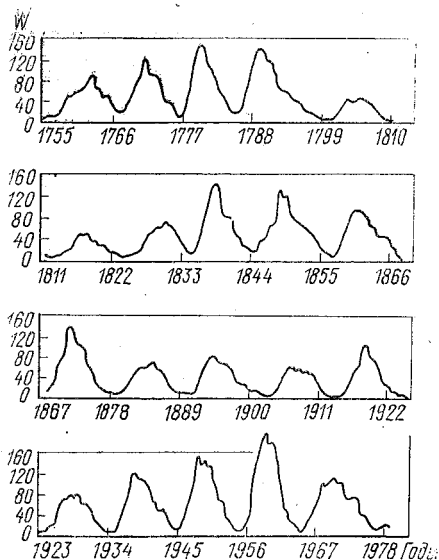


Рис. 2.4. Сглаженные среднемесячные значения чисел Вольфа

В то же время, как следует из анализа этого рисунка, промежутки времени между двумя последовательными максимумами и минимумами не является постоянным. Так, промежуток между минимумами варьирует от 9,0 до 13,6 лет, между максимумами — от 7,3 до 17,1 лет (гораздо больший разброс). В 1784—1798 г. длина цикла составила 14 лет, а в 1843—1856 г. — 13 лет. Непостоянство длины периодов и различные значения его амплитуды оправдывает название цикл в отличие от строгого — период.

Изменения количества пятен в течение солнечного цикла сопровождаются изменениями распределения пятен по гелиографическим широтам: первые пятна

очередного цикла появляются на полярных краях «королевских ширт», т. е. в среднем около широт 30° с. или 30° ю., последующие пятна появляются, как правило, все ближе и ближе к экватору: во время максимума — у широт 15° с. или 15° ю., а последние пятна цикла — около широт 8° с. или 8° ю. В работе Шперера 1894 г. эта закономерность прослежена назад до 1621 г.; иногда ее называют законом Шперера. Хорошей иллюстрацией закона Шперера является изображение всех пятен на диаграмме широта — время, представленное на рис. 2.5. Впервые такая диаграмма была построена в 1922 г. Е. Маундером и впоследствии получила название «бабочек Маундера». Она, кстати, показывает, что первые пятна следующего цикла появляются на высоких широтах раньше, чем исчезают последние пятна предыдущего цикла на низких широтах. Такое перекрытие соседних циклов, составляющее в среднем три года, сглаживает минимумы на кривой колебаний со временем чисел Вольфа. В то же

время соседние циклы независимы в том смысле, что соседние «бабочки» не пересекаются.

Переходя к рассмотрению циклических особенностей проявления солнечной активности, введем ряд определений.

Продолжительность каждого цикла солнечной активности измеряется от минимума до следующего минимума значения W .

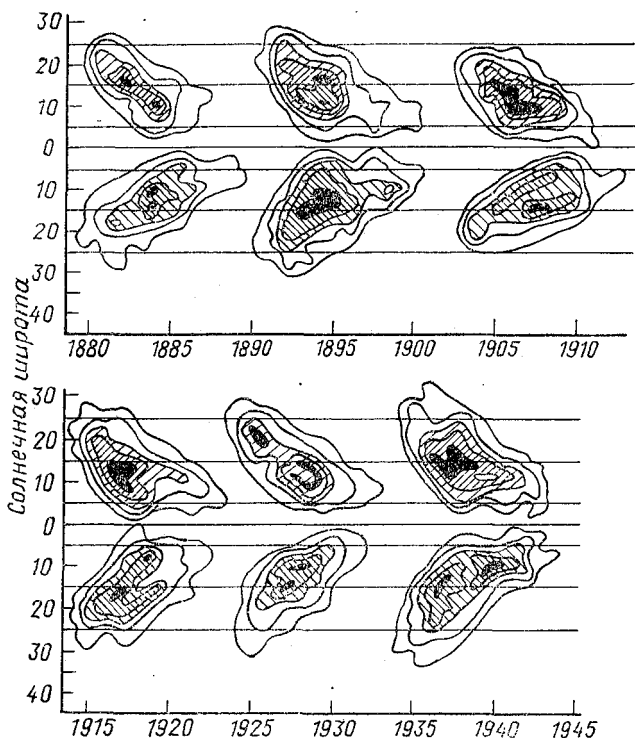


Рис. 25. Диаграмма «бабочек Маундера», представляющая широтное распределение солнечных пятен с 1874 по 1913 гг. (φ — гелиографическая широта)

Интервал времени от момента, соответствующего минимальному значению сглаженного среднемесячного числа Вольфа \overline{W}_m , до момента, соответствующего максимальному его значению \overline{W}_M , называется длиной ветви роста цикла T_r . Интервал времени между моментами, соответствующими \overline{W}_M и следующему за ним \overline{W}_m , определяется как длина ветви спада θ . Каждому 11-летнему циклу приписывается свой номер, причем № 1 имеет цикл 1756—1766 гг. Цикл № 20 охватывает 1964—1976 гг., в настоящее время развивается цикл № 21.

Согласно Вальдмайеру, если ввести число \bar{W}_5 — сглаженное среднемесячное число Вольфа через 5 лет после эпохи максимума, — то значения T_r , θ , \bar{W}_M и \bar{W}_5 в 11-летнем цикле связаны следующими уравнениями:

$$\lg \bar{W}_M = 2,58 - 0,14 T_r, \quad (2.9)$$

$$\theta = 3,0 + 0,003 W_M, \quad (2.10)$$

$$\bar{W}_5 = -11,4 + 0,29 W_M. \quad (2.11)$$

Высота кривой 11-летнего цикла может быть выражена формулой Стюарта—Пановского

$$W = F \tau^a e^{-b\tau}, \quad (2.12)$$

где τ — интервал времени между данным моментом и эпохой предшествующего минимума (в годах); a , b и F — постоянные для данного солнечного цикла. Формула (2.12) отражает взрывной характер солнечных циклов. Впервые «взрывную» гипотезу для объяснения нерегулярностей солнечных циклов в 1935 г. предложил М. Вальдмайер. Согласно этой гипотезе последующие циклы считаются совершенно не зависящими от предыдущего, как если бы каждый цикл был проявлением некоторого происходящего заново взрыва внутри Солнца.

Весьма четкую количественную формулировку гипотезе «взрывной» природы солнечных циклов Вальдмайера получили Л. И. Гудзенко и В. Е. Чертопруд, рассматривая солнечный цикл как результат «работы» генератора колебаний. В ходе проведения статистической обработки данных о колебаниях чисел Вольфа W за 19 циклов, Л. И. Гудзенко и В. Е. Чертопруд оценили жесткость «генератора» солнечного цикла. Оказалось, во-первых, что она почти не зависит от периода цикла τ , во-вторых, для средней жесткости было получено большое значение, так что генератор солнечного цикла оказывается отчетливо релаксационным — он быстро «забывает» предыдущие отклонения от «среднего» цикла, что и является количественной формулировкой взрывной гипотезы Вальдмайера. Таким образом, можно сделать вывод, что колебания солнечной активности определяются не периодической перекачкой одной форм энергии в другие (в том числе не перекачкой энергии между полоидальной и тороидальной компонентами магнитного поля или между кинетической и магнитной энергией), а связаны с накоплениями энергии и ее последующими выбросами из автоколебательной системы. Воспользовавшись историческими данными о наблюдениях полярных сияний (числа ночей с полярными сияниями в умеренных широтах хорошо коррелируют с числами Вольфа), наиболее полный каталог которых за последние 2000 лет составил в 1873 г. Х. Фритц, Гудзенко и Чертопруд получили, что в уравнения, описывающие «работу» генератора солнечного цикла, нужно ввести

обратную связь, т. е. циклы солнечной активности не являются абсолютно независимыми. Это подтверждает результаты Е. Е. Слущкого, который еще в 1935 г. на основе этих же данных Фритца заметил весьма длительную связь между флукутациями фазы солнечной активности (в том числе между длинами последовательности циклов).

Наиболее серьезные факты, опровергающие «взрывную» гипотезу солнечной цикличности, представлены М. Н. Гневнышевым и А. И. Олем. Они будут изложены ниже.

Важное значение для выявления циклического характера проявления солнечной активности имеет принцип наложения эпох, в результате применения которого получают так называемые циклические кривые. На рис. 2.6 изображены такие циклические кривые для различных индексов солнечной активности. Циклическая кривая по какому-либо индексу получается следующим образом: среднегодовые значения этого индекса располагаются по одноименным фазам 11-летнего цикла, т. е. практически по соответствующим годам. После этого для сравнимости различных циклов значения приводятся к одной ординате: максимальное значение соответствующего индекса принимается за 100% и значения в отдельные годы выражаются в процентах относительно максимального. Затем кривые для отдельных циклов совмещаются. На приведенных рисунках совмещение произведено эпохами минимумов, однако практикуется также и совмещение эпохи максимумов.

На рис. 2.6, *а, б* даны циклические кривые наблюденных и сглаженных чисел Вольфа. Обе эти кривые обладают среди других наибольшим весом, так как построены по наибольшему числу 11-летних циклов. Кривые рис. 2.6, *а* позволяют обнаружить характерные особенности 11-летнего солнечного цикла, с его крутой и сравнительно короткой ветвью роста и пологой и длинной ветвью спада.

На рис. 2.6, *б* приведены кривые площадей пятен, факелов и протуберанцев. Как видно, циклический ход этих трех индексов в общем одинаков (площади факелов дают некоторый рост в самом конце цикла, но это отмечается лишь на 11-м году и вес соответствующей точки кривой рис. 2.6, *б* мал). Более реальным является замедленное по сравнению с пятнами и факелами уменьшение площади протуберанцев в конце 11-летнего цикла. Любопытно, что подобная картина наблюдается и при развитии отдельных активных центров на Солнце, т. е. явлений локальных и имеющих гораздо меньший характерный масштаб времени.

Рис. 2.6, *в* показывает циклический ход индексов продолжительности и мощности солнечных явлений. Как видно, эти индексы не обнаруживают заметного хода в 11-летнем цикле, его цикловая амплитуда, т. е. разность значений в максимуме и минимуме, незначительна.

Возвращаясь к рис. 2.4. отметим, что при его анализе могут быть отмечены и долгопериодные вариации. Такие вариации отчет-

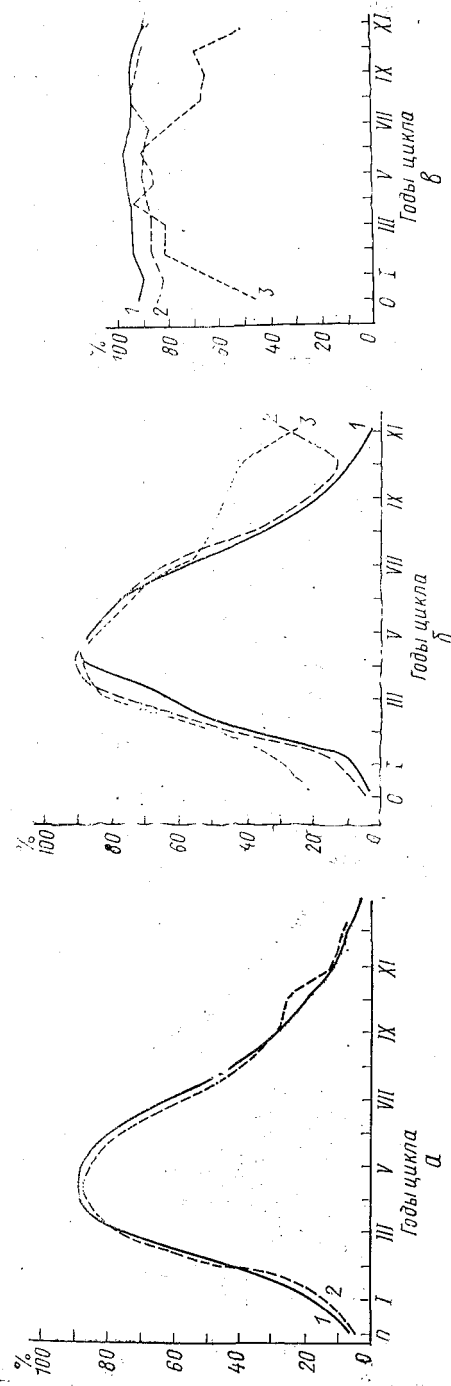


Рис. 2.6. Циклические кривые: а — наблюдаемых (1) и сглаженных (2) чисел Вольфа; б — площади пятен (1), факелов (2), протуберанцев (3); в — индексов продолжительности и мощности явлений солнечной активности: кривая 1 — средней продолжительности жизни всех групп пятен (с учетом групп — «однодневок»), выраженной в оборотах Солнца; кривая 2 — то же, что и кривая 1, но без учета групп — «однодневок», кривая 3 — среднегодовое из максимальных за появление площадей групп пятен

ливо видны на рис. 2.7, где представлены сглаженные по 44 точкам среднегодовые значения чисел Вольфа за период 1701—1967 гг. Именно влиянием долгопериодных вариаций можно объяснить изменение средних годовых значений чисел Вольфа в минимумах 11-летних циклов от 0 до 13, а в годы максимумов — от 46 до 190. По данным Шове длительность долгопериодного цикла колеблется от 30 до 120 лет, среднее значение периода — 79 лет. С увеличением «высот» 80—90-летнего цикла увеличивается длина ветви его роста (коэффициент корреляции между этими параметрами равен 0,58), что качественно отличается от аналогичной зависимости для 11-летнего цикла. Вместе с тем, чем мощнее 80—90-летний цикл, тем длиннее его ветвь спада ($r = +0,47$), как и в 11-летнем цикле.

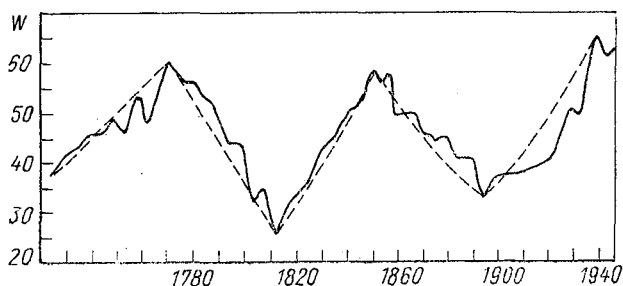


Рис. 2.7. Кривая сглаженных по 44 точкам среднегодовых значений чисел Вольфа за период 1701—1967 гг.

Аппроксимация 80—90-летнего цикла лучше всего дается выражением

$$W = C_1 \cos ta + C_2 \sin ta, \quad (2.13)$$

где C_1 , C_2 и a — постоянные. В соответствии с этой аппроксимацией 80—90-летний цикл имеет характер свободных псевдогармонических колебаний.

Важное значение в формировании 80—90-летнего цикла имеет асимметрия солнечной активности в северном и южном полушариях Солнца, которая была обнаружена еще в 1941 г. Наличие такой асимметрии и совпадения циклов ее изменения с 80—90-летним циклом солнечной активности было обнаружено Вальдмайером. Исследования А. Я. Безруковой, В. Ф. Логинова и других показали, что асимметрию активности полушарий Солнца необходимо учитывать при исследовании характера воздействия солнечной активности на Землю.

Дальнейшие исследования цюрихского ряда чисел Вольфа, в частности, спектрально-корреляционным методом, привели к выводу о существовании цикла со средней продолжительностью $169 \div 176$ лет. Аналогичный результат был получен из рассмотре-

ния ряда Шове: период 160—170 лет («двойной» 80—90-летний цикл).

Помимо двойного 80—90-летнего цикла солнечных пятен, по-видимому, существуют циклы длительностью в несколько столетий, установление средней продолжительности которых пока весьма затруднительно на основе данных только о солнечной активности. По косвенным данным периоды этих циклов порядка 400, 600 и 900 лет.

2.9. Характер солнечной активности со статистической точки зрения

В 2.8 было показано, что если исходить только из того, что установлено при использовании индекса чисел Вольфа, и отбросить наиболее сомнительные циклы, то и тогда солнечная активность характеризуется большим количеством циклов различной длительности.

Естественный вопрос о связи этих циклов друг с другом давно привлекал внимание исследователей. Попытки представить солнечную активность двояко или многопериодической функцией не имели большого смысла. Вообще периодограммные приемы, основанные на постулировании жесткой периодичности, не соответствуют тому, что в действительности имеет место в случае солнечной активности.

Но если нет «иерархии периодов», то, быть может, существует «иерархия циклов». М. С. Эйгенсон утвердительно отвечает на этот вопрос. Он считает, что в основе солнечной цикличности лежит весьма низкочастотное колебание, т. е. имеющее огромный период. Вся же наблюдаемая совокупность циклов, или, как говорит Эйгенсон, «ритмов», представляет проявление медленных глубинных процессов. Для доказательства приемлемости такой гипотезы привлекаются следующие аргументы: всякий цикл высшего ранга есть не что иное, как сумма циклических процессов более низкого ранга. Сумма понимается, конечно, не в буквальном смысле. Например, 11-летний цикл складывается из развития отдельных активных центров; 80-летний цикл — из 11-летних, и т. д. Далее Эйгенсон считает, что имеется морфологическое подобие циклов более высокого ранга, с одной стороны, и более низкого — с другой; в третьих, средняя длительность каждого следующего по порядку «ритма» примерно вдвое или втрое больше длительности «ритма» предшествующего порядка.

Рассмотрим эти соображения. Начнем с определения характера солнечной активности как многоритмического. Что означает такое определение?

Исследование временных рядов солнечных, геофизических и других индексов приводит к следующей естественной классификации выражаемых ими процессов:

- 1) случайные колебания;
- 2) возмущения;

- 3) ритмические колебания;
- 4) периодические колебания;
- 5) скрытая периодичность.

Дадим краткую характеристику этих процессов.

1. Случайные колебания являются независимыми во времени. Исследуя временной ряд с помощью коррелограммы, можно обнаружить, что случайные колебания почти выпадают и их эффект проявляется лишь в дисперсии, величина которой порядка $1/N$, где N — число членов ряда.

2. Возмущения также носят случайный характер, но внутри некоторого промежутка времени они обнаруживают связь друг с другом. При коррелировании через некоторый интервал времени наблюдается постепенное ослабление связи, что дает возможность установить спектр размеров возмущения.

3. Ритмические колебания представляют чередование возмущений разных знаков. Существует некоторый средний период, но каждое следующее возмущение определяется только концом предыдущего; по истечении некоторого времени может накопиться любая разность фаз по сравнению с колебаниями, имеющими период, равный среднему.

4. Периодические колебания — их можно рассматривать как ритмические, со строгим чередованием одинаковых циклов.

5. Скрытая периодичность — отдельные циклы различаются по длине и интенсивности вследствие наложения на периодически членные колебаний, возмущений или ритмов. Этот вид временных процессов называют иногда «период с возмущениями». Такое определение хотя допустимо, но несколько обедняет понятие скрытой периодичности, так как истинный период может искажаться не только возмущениями, но и случайными колебаниями и ритмами.

Каждый из этих типов процессов по-своему отражается на коррелограмме. О поведении случайных колебаний уже говорилось. Возмущения представляются кривыми экспоненциального типа с определенным декрементом затухания. Ритмы дают волны, период которых равен среднему периоду колебания, причем максимальная ордината имеет место при $t = 0$; амплитуда постепенно затухает через интервалы времени, равные среднему периоду; фазы будут различными. Периодические колебания дают на коррелограмме правильные волны; амплитуда их одинакова каждый раз, когда $t = 0$, при этом одинакова и фаза. Скрытая периодичность дает на первый взгляд картину коррелограммы, сходную с той, какую представляют ритмы, но на самом деле различие между ними существенно.

Различают два класса периодических явлений (заметим, что оба эти случая не относятся к категории строгой периодичности).

В первом случае имеется основной период, на который накладываются некоторые нерегулярные воздействия. Тогда наступление каждой данной фазы может быть ускорено или замедленно; на первичную же причину, вызвавшую основную периодичность, не-

регулярные воздействия не влияют, при этом одна и та же фаза будет возвращаться приблизительно через равностоящие друг от друга эпохи, но именно приблизительно, а отклонения эпохи возвращения данной фазы от той, которая соответствовала бы равным промежуткам, будет иметь характер случайных ошибок. При длине истинного периода T после n -го периода наблюдаемая фаза будет отличаться от nT на величину $\pm \epsilon$. Величина ϵ не будет зависеть от n .

Во втором случае при наличии среднего периода сам он подвержен изменениям, а именно, если наступление какой-либо фазы было в какой-то момент ускорено, то это ускорение будет распространяться на все последующие фазы. Если вероятное ускорение или запаздывание в наступлении данной фазы обозначить $\pm \epsilon$, то по прошествии n периодов это отклонение будет $\sqrt{n} \cdot \epsilon$.

Отклонения наблюдаемых эпох максимумов и минимумов 11-летних циклов от соответствующих расчетных были осреднены по четырем циклам. Систематического роста значений отклонений с увеличением номера не наблюдается, что вновь подтверждает правильность схемы «период с возмущениями», а не «ритм». Оказывается, что наблюдается правильное чередование положительных и отрицательных значений отклонений наблюдаемых эпох максимумов от расчетных при усреднении по четырем циклам. Этот и другие факты привели А. И. Оля к гипотезе о том, что отклонения не являются совершенно случайными. Они в известной мере определяются общим уровнем солнечной активности, изменения которой обнаруживает цикличность более высокого ранга, чем 11-летняя. В этом смысле действительно можно говорить о воздействии циклов более высокого ранга, например, 80-летних на 11-летние, однако это воздействие сводится не к искажению самого 11-летнего «периода», т. е. превращению его в ритм, а к появлению тех признаков, которые были отнесены нами к категории возмущений. Если обработать данные тем же способом, каким обрабатывали Ньюком и Оля данные об 11-летних циклах, то можно прийти к заключению, что и 80-летние циклы являются именно циклами, а не ритмами. Действительно, принимая согласно Глейсбергу, ибо использована его таблица, длину многолетнего цикла равной 7,1 длины 11-летнего цикла и применяя метод Ньюкома, можно показать, что разности реальных и предвычисленных начал 80-летних циклов не обнаруживают какого-либо систематического возрастания и ведут себя в этом отношении совершенно аналогично соответствующим разностям эпох 11-летних циклов. Таким образом, можно сделать вывод, что и многолетний цикл является периодом с возмущениями. Небольшой материал Глейсберга не дает, к сожалению, возможности повторить применительно к этому случаю исследование того типа, какой выполнил Оля.

Подводя итоги, отметим следующее.

1. Нельзя говорить о многоритмичности солнечных явлений. Среди этих явлений различных рангов, которые удалось на сегодняшний день отнести к определенной категории статистических процессов, нет ни одного, относящегося к категории ритмов. Можно говорить о «многоцикличности» явлений на Солнце, но и здесь требуется осторожность. В этом смысле единственно, что можно считать установленным, является обнаруженная А. И. Олем зависимость эпох наступления определенных фаз 11-летних циклов от цикличности несколько более высокого ранга. Этот вывод косвенно подтверждается тем, что и 11-летний, и 80-летний циклы относятся к одной и той же категории процессов, а именно являются периодами с возмущениями.

2. Табл. 2.3 показывает, что к вопросу о морфологическом подобии циклов более низкого и более высокого рангов следует подходить с большой осторожностью. Например, 11-летний цикл со статистической точки зрения никак не может быть процессом высшего ранга по отношению к флуктуациям солнечной активности, поскольку последние вообще не принадлежат к категории циклических явлений, а должны быть отнесены к случайным колебаниям. Далее, внутренние закономерности 11-летнего и 80-летнего циклов совершенно различны. Если для первого r_t характерна четкая отрицательная корреляция между временем роста и высотой в максимуме, то для второго r_t характерна сравнительно слабая положительная связь между этими параметрами.

Упомянутая внутренняя характеристика 11-летнего цикла обуславливает существенное отличие его также и от флуктуаций, вообще не обнаруживающих связи мощности со временем роста или спада, и от повторяющихся групп, где имеется достаточно четкая положительная корреляция между временем роста и максимальным развитием.

Таблица 2.3

Свойства явлений и циклов различных рангов

Тип процесса	Ранг процесса	r_t	r_r	Использованный индекс
—	Повторяющаяся группа	+ 0,70	+ 0,35	Площадь в максимуме
Случайные колебания	Флуктуация	+ 0,33	+ 0,33	Амплитуда индекса флуктуируемости
Период с возмущениями	11-летний цикл	— 0,81	+ 0,43	Числа Вольфа
То же	80-летний цикл	+ 0,58	+ 0,27	Числа Вольфа

3. Соотношение средних длительностей циклов различных рангов показывает тенденцию к удвоению длины цикла при переходе к очередному — высшего ранга. Однако дальше двойного 80-летнего, близкого к циклу Андерсона—Бонова, это соотношение, насколько можно судить по имеющимся данным, не распространяется.

2.10. Прогноз солнечной активности

Выше было показано, что в настоящее время отсутствует единая точка зрения на природу изменений солнечной активности. Авторы относят солнечную активность к случайным, периодическим или циклическим явлениям. Использование для исследования и прогноза изменений солнечной активности теории случайных процессов, а также методов, связанных с определением частот, амплитуд и фаз отдельных периодических составляющих, и последующее их суммирование не привели к созданию удовлетворительных методов прогнозирования.

В последние годы получила развитие точка зрения, согласно которой изменения солнечной активности представляют собой циклический процесс, который отличается по своим свойствам как от случайного, так и сложно-периодического. Она основана на наличии в циклах солнечной активности соотношений между различными параметрами, характеризующими эти циклы. Такой внутренней закономерностью является обнаруженная Вальдмайером отрицательная корреляция между временами подъема кривой чисел Вольфа в цикле, а также правило объединения 11-летних циклов в пары, состоящие из четного и нечетного циклов, установленное М. Н. Гневышевым и А. И. Олем. Наличие этих закономерностей по мнению М. Н. Гневышева и А. И. Оля не согласуется с такими трактовками солнечной активности, как процесса случайного или сложно-периодического, равным образом они вступают в противоречие с «эруптивной» гипотезой Вальдмайера, когда каждый 11-летний цикл рассматривается как «взрыв» активности.

В настоящее время принято, что для понимания сущности физических процессов на Солнце необходимо изучать все проявления солнечной активности в их взаимосвязи. В качестве примера можно привести установленную А. И. Олем связь между величиной (S), характеризующей интенсивность рекуррентных геомагнитных возмущений в конце цикла, и значениями чисел Вольфа в следующем цикле (W_M). Коэффициент корреляции между W_M и S равен 0,97. Указанная связь используется для прогноза W_M с заблаговременностью в несколько лет.

Физически тесную связь между интенсивностью рекуррентных геомагнитных возмущений в конце цикла и высотой следующего 11-летнего цикла солнечных пятен А. И. Оля рассматривает как указание на существование физической связи униполярных магнитных областей в конце цикла с биполярными областями (группами пятен) в следующем цикле. Предполагается, что степень развития

униполярных областей отражает интенсивность полоидального поля.

В развитии 11-летнего цикла активности Солнца важную роль играет момент обращения общего магнитного поля Солнца, наступающий в год максимума или спустя один-два года после максимума солнечной активности в 11-летнем цикле. Первая и вторая половины 11-летнего цикла по физическим свойствам протекания электромагнитных процессов существенно различаются, тогда как относительные числа Вольфа могут не отличаться по величине. Об этом можно судить по изменению спорадических и рекуррентных геомагнитных возмущений (последние приходятся на вторую половину 11-летнего цикла), крупных протонных вспышек и интенсивности короны, которые имеют второй максимум во второй половине 11-летнего цикла. В это время наблюдается выход магнитной энергии из солнечных глубин в форме устойчивых униполярных магнитных областей. Здесь образуются устойчивые потоки плазмы из униполярных областей, плотность плазмы понижается и образуются корональные дыры.

Подробно методы прогнозирования солнечной активности анализируются в работах Ю. И. Витинского.

Новый метод прогнозирования солнечной активности, как уже отмечалось, предложен А. И. Олем. Последняя модификация этого метода состоит в следующем. В качестве предиктора для W_M была выбрана величина

$$m' = \sum_{i=-1}^{-3} \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} - \frac{W_i - \bar{W}}{\sigma_W} \right), \quad (2.14)$$

где сумма берется за три года от -1 до -3 года, причем нулевым считается год минимума, которым заканчивается данный 11-летний цикл; M_i и W_i — средние значения индекса $M = 10$ ($\Sigma K_p - 10$) и числа Вольфа W ; \bar{M} и \bar{W} — средние значения M и W за все девять циклов (с 11-го по 19-й); σ_M и σ_W — стандартные отклонения величин M и W . Коэффициент корреляции $r_{m', W_M} = 0,97$, а уравнение регрессии имеет вид

$$W_M = 17,938 m' + 69,38. \quad (2.15)$$

Прогнозируемое число W_M для 21 цикла составило 177, а фактическая величина — 155. Следует отметить, что большинство астрономов предсказывало 21-й цикл маломощным. Так, американские ученые полагали, что увеличение плотности верхней атмосферы будет небольшим и предсказали работу «Скайлэба» до 1982 г. Однако «Скайлэб» сгорел в плотных слоях атмосферы уже в 1979 году. Этот факт со всей наглядностью показывает, к чему может приводить неправильный прогноз солнечной активности.

2.11. Вариации астрофизической солнечной постоянной

В последнее время интерес к этому вопросу резко возрос. И главной причиной этому послужило расхождение между предсказаниями теории и экспериментальными результатами по регистрации солнечных нейтрино. Их приходило на Землю меньше, чем ожидалось.

Согласно общепринятой теории эволюции звезд, светимость Солнца меняется существенно во временной шкале 10^8 — 10^9 лет. Эпик высказал идею о внезапных изменениях внутренней структуры Солнца, когда его светимость меняется на 10—15% в зависимости от толщины слоя перемешивания. Периоды оледенения Земли Эпик отождествил с периодами понижения солнечной светимости. Фаулер предложил гипотезу о скачкообразном перемешивании вещества в недрах Солнца. Эта гипотеза приемлема для объяснения расхождения теории солнечных нейтрино и отрицательных экспериментальных результатов по регистрации нейтрино.

В течение фазы перемешивания светимость Солнца будет ниже нормы и изменения светимости составят десятки процентов. Время между процессами перемешивания солнечных недр составляет приблизительно 100 млн. лет, а длительность процесса около 10 млн. лет. Если исходить из экспериментальных данных по нейтрино и геологических данных, согласно которым возникновение современных арктических ледников относится ко времени 5 млн. лет назад, то в современную геологическую эпоху уровень солнечной светимости ниже, чем это было в прошлом.

За последние десятилетия идея о нестабильности излучения, приходящего от Солнца и из космоса, получила новые экспериментальные подтверждения. Предметом дискуссии остается вопрос о величинах временных вариаций различных видов излучений и их связи с запятненностью Солнца.

О том, что Солнце является переменной звездой, можно судить хотя бы по изменениям на поверхности Солнца и наличию 11-летних циклов солнечных пятен, а также 22-летних циклов солнечной магнитной активности. Ряд исследователей указывал на реальность вековых и сверхвековых циклов солнечной активности.

В последние годы делались неоднократные попытки измерить солнечную постоянную на спутниках. Наблюдения на «Маринерах-6 и 7» осуществлялись в марте — июне 1969 г. Радиометры измеряли излучение в области спектра 0,2—50 мкм. Разрешение по интенсивности измеряемой радиации составляло 0,03% от солнечной постоянной. Рассеяние самих измерений относительно среднего (после введения поправки на небольшой тренд) составляло 0,08% от солнечной постоянной.

Сравнение вариаций измеряемой радиации с прохождением пятен и факелов по диску Солнца показало, что при изменении площади пятен на 800 миллионов долей полусферы (м. д. п.) солнеч-

ная постоянная меняется не более чем на 0,03%. На столько же она менялась при изменении площади факелов на 2000 м. д. п.

Последующие измерения на «Нимбусе-6», где радиометр имел 10 каналов для измерения интегральной и спектральной солнечной постоянной, показали, что изменчивость солнечной постоянной, большая чем 0,1%, отсутствовала в течение 2,5-летнего периода наблюдений, совпадающего с низкой солнечной активностью.

В 1980 г. Вилсон с сотрудниками провел высокоточные измерения солнечной постоянной и дважды обнаружил снижение радиации до 0,2% в момент развития крупных групп пятен. Максимальное снижение радиации наблюдалось 8 апреля, оно составило около $3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Эдди и Хойт разработали модель солнечной постоянной, исходя из значений площади и яркости активных образований на Солнце, которая удовлетворительно описывает экспериментальные данные Вилсона.

В среднем, изменения солнечной постоянной за счет изменения площади и яркости активных образований на Солнце, составляют величину 0,02—0,03%. Величина изменения солнечной постоянной может быть существенно большей, если допустить, что невозмущенная часть фотосферы Солнца, имеющая площадь около 98—99%, несколько меняет свою яркость. Вариации радиуса Солнца могут также приводить к изменениям солнечной постоянной.

Результаты измерений на спутниках и ракетах показывают сильную нестабильность рентгеновской и ультрафиолетовой частей спектра. Поток радиации Солнца в интервалах длин волн 0—0,9 нм, 0,8—2 нм и 4,4—6 нм изменяется соответственно в 30, 10 и 3,1 раза в течение 11-летнего цикла солнечных пятен, в интервале 20,3—33,5 нм — в 1,4—5,1 раза. Обнаружено 11-летнее колебание в УФ излучении: увеличение излучения с длиной волны 175 нм от минимума 1964 г. к максимуму 1970 г. происходило в 2 раза, а вблизи длины волны 290 нм — на 20%. Выявлено квазидвухлетнее колебание излучения в линии Лайман — α ($\lambda = 121,6 \text{ нм}$).

Вариация в ультрафиолетовом излучении в течение 27-дневного цикла быстро уменьшается с ростом длины волны; в области 175 нм около 5—6% и в области 300 нм — около 1%.

Таким образом, амплитуда вариации излучения в 11-летнем и 27-дневном циклах уменьшается с увеличением длины волны.

Во время хромосферных вспышек также возникает дополнительное количество ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Так, хромосферная вспышка класса 2^+ дает дополнительный к невозмущенному поток энергии в спектральной области 0,9—2 нм около $0,5 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а в области длин волн 0—0,8 нм — порядка $0,1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Излучение вспышек в области мягкого рентгена (0,1—2 нм) на два-три порядка больше, чем излучение в этой спектральной области при отсутствии вспышек. Существенные изменения (на 10—50%) во время вспышек происходят и в ультрафиолетовой части

спектра. Однако даже во время крупных хромосферных вспышек интегральное излучение Солнца изменяется всего на 0,01%.

Следует, однако, отметить, что в настоящий момент абсолютная точность данных о спектральном солнечном излучении все еще сравнительно низка. В коротковолновом конце диапазона 200—400 нм солнечная радиация известна с точностью $\pm 15\%$. В области волн 300 нм точность повышается до $\pm 10\%$. В участке спектра от 330 до 400 нм точность данных находится в пределах $\pm (5-3)\%$. Любые модели теории климата, схемы прогнозов погоды на долгие сроки и прогнозов изменения климата должны исходить из этого факта.

Информация о нестабильности физических процессов на поверхности Солнца за длительный интервал времени включает ряд косвенных показателей, таких как изменение содержания C^{14} в кольцах деревьев, отношение изотопов в колонках льда, а также в лунных и метеорных пробах. В последнее тысячелетие в активности Солнца наблюдались минимумы: маундеровский (1645—1715 гг.) и шпереровский (1450—1540 гг.), когда на Солнце было очень мало пятен, а в XII и XIII столетиях активность Солнца была высокой. В ряде работ указано, что причина «малых ледниковых периодов» и «малых межледниковых периодов» в климате может быть связана с солнечной активностью.

В заключение этого раздела рассмотрим возможные причины вариаций солнечного излучения.

Активные образования (пятна, факелы, светлые пятна) на Солнце испытывают короткопериодные и долгопериодные изменения.

По средним оценкам доля излучения ядра пятна (тень) составляет 0,2—0,4, а полутени 0,7—0,8 от невозмущенной фотосферы. Окружающие пятна светлые кольца дают избыток излучения 1—3%. В ряде работ указано на наличие связи между площадями тени и полутени, зависящей от площади пятна, а также долгопериодного цикла солнечной активности. Имеется зависимость между площадью и яркостью пятен. Последние зависимости требуют специального исследования, чтобы корректно ответить на вопрос о связи яркости и площади пятен с вариациями солнечной постоянной.

Наибольшие сложности возникают при анализе яркости факелов. Это связано как с трудностью наблюдения факелов, так, возможно, и с большими вариациями яркости факелов относительно среднего значения. В среднем, яркость факелов превышает яркость фотосферы на 5%. Площадь факелов по данным гринвичского каталога существенно превышает площадь пятен. Связь между ними не является линейной: при больших значениях площади пятен площадь факелов практически остается постоянной. Вторая трудность связана с тем обстоятельством, что данные площадей факелов по гринвичскому и пулковскому каталогам различаются в 4—12 раз. Основываясь на этих сведениях, были разработаны

модели изменения солнечной постоянной и индексы солнечной активности.

Принципиальным вопросом является также вопрос установления роли различных диапазонов длин волн в изменчивости интегральной солнечной постоянной. Возможны следующие варианты ответа на вопрос о причинах изменчивости интегральной солнечной постоянной:

а) изменчивость солнечного излучения разной амплитуды во всех интервалах длин волн;

б) изменчивость солнечного излучения в рентгеновской и ультрафиолетовой частях спектра;

в) перераспределение энергии в солнечном спектре, что приводит к незначительной изменчивости интегральной солнечной постоянной.

Окончательный ответ на этот вопрос может быть дан после проведения серии аэростатных, ракетных и спутниковых измерений излучения Солнца в различных диапазонах длин волн.

2.12. Вариации солнечной постоянной, измеренные на земной поверхности и в нижней атмосфере

В начале XX столетия были выполнены первые измерения интенсивности солнечной радиации с поверхности Земли. Разброс наблюдаемых величин был довольно велик, четко определить влияние атмосферы и ошибок приборов на вариации значений солнечной постоянной не представлялось возможным. Современный уровень знаний изменений оптических свойств средней и верхней атмосферы показывает, что определить с точностью до 0,1% величину астрономической солнечной постоянной из тропосферы и стратосферы невозможно. Величина интенсивности солнечной радиации на верхней границе тропосферы получила название метеорологической постоянной I_M .

Наиболее широкий комплекс работ по исследованию метеорологической солнечной постоянной был проведен Смитсоновским институтом под руководством Аббота, который впервые привел обширные данные наблюдений за 1915—1955 гг., подтверждающие вариации метеорологической солнечной постоянной на 1%.

Ангстрем, основываясь на данных Аббота по измерению солнечной радиации за 1915—1917 гг., показал, что имеется связь между метеорологической солнечной постоянной и относительными числами Вольфа. Он нашел, что солнечная постоянная возрастает приблизительно на 2% при увеличении чисел Вольфа от 0 до 80 единиц. При дальнейшем увеличении чисел Вольфа солнечная постоянная падает приблизительно на такую же величину. Позже Олдрич установил, что в разных солнечных циклах имеются свои особенности связи метеорологической солнечной постоянной и чисел Вольфа. Средняя кривая, полученная за два полных 11-летних цикла солнечной активности (1923—1944 гг.), в основном подтверж-

дала выводы Ангстрема, но изменения солнечной постоянной оценивались в полпроцента, а максимум солнечной постоянной приходился на значения относительных чисел Вольфа около 30 единиц. В дальнейшем результаты по измерению солнечной постоянной, проведенные на аэростатах под руководством К. Я. Кондратьева, подтвердили, что максимальные значения солнечной постоянной приходятся на диапазон от 80 до 100 единиц относительных чисел Вольфа и амплитуда ее изменения составляет около 2—2,5%.

В последующем эта величина была уточнена и в настоящее время амплитуда изменений метеорологической солнечной постоянной принята около 1,5%. Выводы Смитсоновской школы и ленинградских геофизиков, если отвлечься от амплитуды изменения солнечной постоянной, сходятся в одном: рост солнечной постоянной происходит до каких-то средних значений чисел Вольфа, после чего начинается ее снижение.

Анализ причин вариаций потока прямой солнечной радиации, измеренной на высотах приблизительно 30 км, проведенный К. Я. Кондратьевым и Г. А. Никольским, показал, что ее ослабление составляло 2,6% и более и определялось изменением количества окислов азота — NO_x в средней и верхней атмосфере, генерируемых при атомных взрывах. Эти молекулы определяют прозрачность средней и верхней атмосферы.

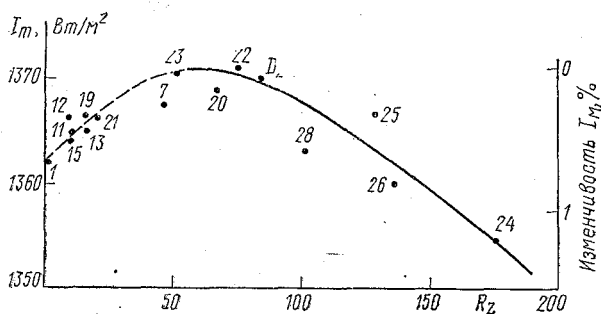


Рис. 2.8. Изменение метеорологической солнечной постоянной в зависимости от относительных чисел Вольфа

Другим фактором, ответственным за изменение количества окислов азота, являются частицы высоких энергий — космические лучи солнечного и галактического происхождения. Воздействие космических лучей определяет изменения оптических свойств атмосферы и метеорологической солнечной постоянной (I_M). Спад I_M при больших значениях чисел Вольфа связан с воздействием энергичных солнечных протонов на химический состав средней и верхней стратосферы, в частности, на увеличение количества молекул NO_x (рис. 2.8). Минимум I_M при малых значениях чисел Вольфа

обязан большой интенсивности галактических космических лучей в этот период. Напомним, что наибольшая напряженность потока высокоэнергичных частиц из Галактики наблюдается в периоды отсутствия пятен на Солнце. Периоды с небольшой плотностью космических лучей в межпланетной среде совпадали в геологическом прошлом с периодом мягких климатических условий на Земле. Отметим, что для периодов изменений порядка нескольких сотен и более лет большее влияние на изменение интенсивности космических лучей оказывает уже не солнечная активность, а вариация напряженности магнитного поля Земли.

Для промежутков времени от нескольких лет до нескольких столетий фактором, определяющим интенсивность космических лучей, является солнечная активность. За последнюю тысячу лет известны периоды, когда солнечная активность существенно понижалась. Понижения температуры в периоды низкой солнечной активности, а следовательно, высокой интенсивности космических лучей и низкой метеорологической солнечной постоянной, таким образом, находят разумное объяснение.

Следует отметить, что исследование изменений в химическом составе верхней атмосферы с учетом нестабильности потоков высокоэнергичных частиц, ультрафиолетового и рентгеновского излучений Солнца только начинается, но уже получены многие интересные факты, заставляющие пересмотреть роль этих агентов в изменениях климата Земли. Эти виды излучений в состоянии изменять оптические свойства атмосферы, а последние, в свою очередь, могут влиять на коротковолновую солнечную радиацию и на длинноволновое излучение подстилающей поверхности. На оптические свойства атмосферы оказывают влияние стратосферные и мезосферные аэрозоли. Данжон, Дюбуа и Вокулер на основании фотометрии лунных затмений и пепельного света Луны установили возрастание замутненности земной атмосферы в течение двух первых лет после минимума солнечной активности. Это увеличение замутненности может быть связано, как показано В. Ф. Логиновым, с увеличением числа вулканических извержений вблизи минимумов 11-летних и вековых циклов.

Таким образом, проведенные к настоящему времени измерения интегральной солнечной постоянной вне атмосферы свидетельствуют о ее вариациях порядка нескольких десятых процента, тогда как вариации метеорологической солнечной постоянной оказываются на порядок больше.

Известно, что для больших периодов времени роль притоков тепла от внешних источников становится доминирующим фактором изменения климата. Считается, что в связи с инерционностью земной климатической системы изменения солнечной постоянной приблизительно на 0,1% могут быть существенными для климата Земли, если они устойчивы во временном масштабе десятилетий и более. Во временном масштабе месяца или года климатически значимые изменения солнечной постоянной составляют несколько

десятих процента, а во временном масштабе нескольких дней они должны быть около 1% и более.

Именно этим обстоятельством можно объяснить тот факт, что наиболее четкие связи космических факторов с параметрами атмосферы обнаружены для больших периодов времени ($\geq 10^2$ лет).

2.13. Служба Солнца

В воздействии Солнца на Землю активные области представляют наибольший интерес, ибо они являются источниками корпускул и в значительной мере (наряду с остальными «невозмущенными» частями солнечной атмосферы) источниками ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Именно поэтому детальное изучение физических процессов в активных областях с помощью современного оборудования является предметом особого внимания.

Однако помимо важной задачи детального изучения физики активных областей имеется не менее важная задача систематической и по возможности непрерывной регистрации всего того, что происходит на Солнце каждый день. Ведь для того, чтобы иметь возможность предсказывать различные проявления солнечной активности, необходимо изучить развитие активных областей во времени. Лишь такого рода непрерывные и всесторонние наблюдения позволяют установить основные законы, определяющие развитие активных областей на Солнце. Полные данные об активных областях на Солнце совершенно необходимы и для текущей практической работы по составлению прогнозов.

По перечисленным причинам в настоящее время в различных странах, в том числе и в Советском Союзе, созданы и работают так называемые Службы Солнца. Назначение каждой Службы Солнца состоит в том, чтобы давать за каждый прошедший день полную характеристику солнечной активности, т. е. данные о солнечных пятнах, факелах, флоккулах, протуберанцах, вспышках, короне. Так, например, в число данных о солнечных пятнах включаются число групп пятен и самих пятен, положение (координаты) пятен на диске, площадь пятен, их магнитные поля и т. д. Систематическое ежедневное определение магнитного поля для каждого пятна на диске весьма важно в связи с большой их ролью: во-первых, магнитное поле оказывает непосредственное влияние на возникновение и развитие различных образований в активных областях; во-вторых, это поле, без сомнения, влияет на процессы выбрасывания частиц (корпускул) из активных областей Солнца.

В Советском Союзе основой Службы Солнца являются обсерватории и станции, ведущие ежедневные (если позволяет погода) наблюдения Солнца по единой программе. Данные всех обсерваторий и станций сводятся центрами Службы Солнца СССР (включая и наблюдения самих центров) в единую систему, после чего сообщаются всем заинтересованным учреждениям. Кроме того, на основе данных Службы Солнца СССР с 1956 г. издается с задерж-

кой приблизительно на шесть месяцев специальный бюллетень «Солнечные данные» (АН СССР, Ленинград). В этом бюллетене на каждый день воспроизводится карта Солнца, на которую наносятся некоторые главные элементы солнечной активности: пятна (с указанием напряженности магнитного поля), флоккулы, вспышки, волокна, протуберанцы и данные об интенсивности короны в различных линиях ее спектра. Здесь же приводятся таблицы групп пятен, вспышек, выбросов, интенсивности радиоизлучения, всплесков.

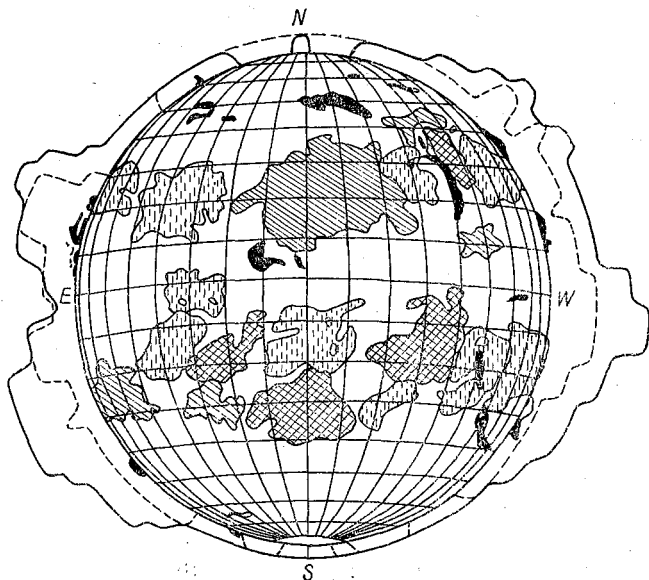


Рис. 2.9. Карта Солнца из бюллетеня «Солнечные данные» Пулковской обсерватории АН СССР (сплошная линия — интенсивность корональной линии $\lambda = 5303 \text{ \AA}$, пунктирная — $\lambda = 6374 \text{ \AA}$)

В качестве примера на рис. 2.9 воспроизведена одна из таких карт. Диск Солнца на карте показан в виде круга, на который нанесены солнечные меридианы и параллели. Прямая линия NS — ось вращения Солнца, — на картах она является центральным меридианом Солнца. Параллель EW является экватором Солнца. Большие заштрихованные площади — флоккулы, причем флоккулы с различной яркостью имеют различную штриховку. Темные точки внутри некоторых флоккул — пятна. Они окружены небольшим ободком — полутенью. Узкие темные полосы на диске — волокна. Положение вспышек во флоккулах обозначено крестиками. На краю диска черные образования неправильной формы — протуберанцы. Наконец, сплошная и пунктирная линии, идущие вокруг

всего диска Солнца, характеризуют распределение интенсивности свечения короны соответственно в «зеленой» и «красной» линиях.

Вид синоптической карты ото дня ко дню меняется как за счет изменений в самих активных областях, так и в результате того, что Солнце вращается.

Кроме АН СССР, данные о солнечной активности регулярно публикуются целым рядом других учреждений. Наиболее значительными из этих публикаций являются следующие.

1. «Solar geophysical Data», NOAA/ESSA, Boulder, USA. Издается, начиная с 1945 г., различными учреждениями США и имеет различное содержание. В настоящее время является наиболее полной и оперативной публикацией данных о солнечной активности и связанных с ней межпланетных и геофизических явлениях. Состоит из двух частей: 1) оперативные сообщения (с задержкой один-два месяца); 2) полные сообщения (с задержкой шесть месяцев), которые содержат исчерпывающие данные об активных областях (все виды оптических наблюдений, гелиограммы в рентгеновском и сантиметровом диапазонах, магнитограммы и данные о вспышках), об интенсивности потока радиоизлучения от всего диска и радиовспышках, интенсивности рентгеновского излучения, о космических лучах, солнечном ветре и потоке протонов, межпланетных магнитных и электрических полях, ионосферных и геомагнитных возмущениях.

2. «Photoheliographic Results», Royal Greenwich Observatory. Содержит наиболее длительные и полные серии данных о солнечных пятнах (с 1874 г.): координаты и площади групп солнечных пятен и их главных пятен.

3. «Monthly Bulletin on Solar Phenomena», Photographic Journal of the Sun, Osservatorio di Roma. Начиная с 1958 г. (до 1964 г. бюллетень выходил под другим названием), публикует данные о солнечных пятнах (координаты, площадь, напряженность магнитного поля).

4. «Quarterly Bulletin on Solar Activity», 'AU, Eidgenössische Sternwarte, Zürich. Публикуется начиная с 1917 г. (до 1938 г. выходил под другим названием) с задержкой приблизительно в полтора года. Бюллетень содержит числа Вольфа и площади солнечных пятен, синоптические карты магнитных полей, интенсивности потока радиоизлучения от всего диска, сведения о наиболее крупных событиях в радиодиапазоне (всплески), карты активности в радиодиапазоне.

5. «Heliographische Karten der Photosphäre», Eidgenössische Sternwarte, Zürich. Публикуется начиная с 1897 г. и содержит синоптические карты активных областей (группы пятен и фотосферные факелы) и таблицы эволюции пятен.

6. «Cartes synoptiques de la Chromosphere Solaire et Catalogue des Filaments et Centeres d'Activite», Observatoire de Paris—Meudon. Публикуется начиная с 1919 г.

Глава 3. ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО

3.1. Солнечный ветер

Из-за высокой температуры и, что более важно, небольшого температурного градиента по высоте солнечная корона не находится в гидростатическом равновесии, а непрерывно расширяется в межпланетное пространство. Образующееся при этом истечение корональной плазмы известно как солнечный ветер. Из-за очень высокой электрической проводимости корональной плазмы как теплопроводность, так и истечение вещества определяются магнитным полем короны. В районах, где магнитные силовые линии вытягиваются высоко в корону (например, над так называемыми корональными дырами), корональное расширение резко усилено.

Скорость расширения очень мала во внутренней короне, но быстро возрастает с высотой. На расстоянии критического радиуса тепловая энергия становится сравнимой с кинетической энергией расширяющейся плазмы; в этой критической точке скорость расширения близка к скорости звука в плазме и ее иногда называют звуковой точкой. На больших расстояниях скорость расширения возрастает еще больше и солнечный ветер становится сверхзвуковым.

Солнечное магнитное поле выносится расширяющейся плазмой, образуя межпланетное магнитное поле (ММП). На расстоянии около $20 R_{\odot}$ от Солнца расширение короны становится почти радиальным, но вращение Солнца закручивает силовые линии ММП в спирали Архимеда, располагающиеся на конусах, описываемых вращением радиуса-вектора (рис. 3.1).

Непосредственные измерения космическими аппаратами подтвердили обоснованность концепции солнечного ветра. В табл. 3.1 приведены типичные значения основных физических параметров солнечного ветра, измеренные вблизи Земли.

Высокоскоростные потоки. Бесструктурное расширение короны, описываемое в большинстве моделей солнечного ветра, наблюдается редко. Более того, солнечный ветер испытывает вариации с характерным временем в несколько дней, сравнимым с основным временным масштабом общего расширения. Главным элементом солнечного ветра является высокоскоростной поток в том смысле, что солнечный ветер, наблюдаемый вблизи Земли, часто может рассматриваться как последовательность таких потоков. В потоке скорость истечения возрастает от низких (менее $400 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) значений примерно за два дня. Последующее уменьшение скорости происходит более постепенно, хотя иногда наблюдаются потоки, сохраняющие высокую скорость в течение нескольких дней, особенно в фазе спада солнечного цикла. Плотность и напряженность магнитного поля возрастают до необычно высоких значений вблизи переднего края потока. За этими максимумами следуют очень низ-

кие значения (район разрежения), сохраняющиеся в потоке в течение нескольких дней. Важно подчеркнуть, что такое морфологическое описание потока справедливо только для расстояний от Солнца, близких к 1 а. е., т. е. в окрестностях Земли.

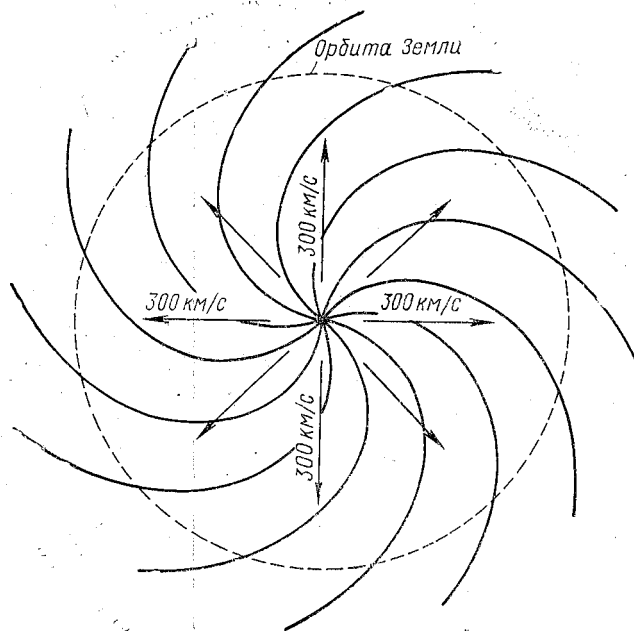


Рис. 3.1. Идеализированная конфигурация магнитного поля, возникающая под действием солнечного ветра, «дующего» со скоростью 300 км/с, и вращения Солнца

Таблица 3.1

Параметры солнечного ветра

Параметр	Значения		
	минимальное	среднее	максимальное
Поток (10^8 ион \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$)	1,0	3,0	100
Скорость (км \cdot с $^{-1}$)	200	400	900
Плотность (ион \cdot см $^{-3}$)	4,0	6,5	100
Электронная температура (1000 K)	5	200	1000
Протонная температура (1000 K)	3	50	1000
Напряженность магнитного поля (γ) ($I \gamma = I n T = 10^{-9} T = 10^{-5}$ Гс)	2,0	6,0	80
Альвеновская скорость (км \cdot с $^{-1}$)	30	60	150
Содержание гелия (относительное)	0,0	0,05	0,25

Высокоскоростные потоки истекают, по-видимому, из областей короны с расходящимися силовыми линиями и открытой конфигурацией магнитного поля. Такие районы часто отмечены появлением корональных дыр. Кроме того, установлено, что потоки в основном униполярны или по меньшей мере имеют преобладающую магнитную полярность. Такие магнитные условия обычно довольно стабильны и существуют в течение нескольких солнечных оборотов, вследствие чего высокоскоростные потоки обнаруживают заметную тенденцию к повторению.

Движение потоков плазмы солнечного ветра с различными скоростями истечения подвержено сильному влиянию Солнца. Высокоскоростной поток, изогнутый по спирали вращением Солнца, будет догонять движущиеся медленнее окружающие потоки солнечного ветра и сталкиваться с ними. Высокая электрическая проводимость намагниченной плазмы препятствует взаимопроникновению различных плазменных образований, вследствие чего окружающая быстрый поток плазма с меньшей скоростью истечения сжимается и отклоняется от первоначального направления, двигаясь параллельно границе раздела. Подобным же образом быстро движущаяся плазма будет замедлена и сжата на своем переднем крае. Так как граница раздела между двумя плазменными областями — область взаимодействия — распространяется в межпланетном пространстве по направлению от Солнца; развивается система ударных волн, ограничивающих область взаимодействия: головная ударная волна, движущаяся от Солнца относительно границы раздела, и соответствующая обратная ударная волна, движущаяся к Солнцу. Большая часть массы, связанной с потоком, заключена в узком слое, ограниченном головной и обратной ударными волнами. Предполагается, что такие слои оказывают сильное влияние на распространение галактических космических лучей.

Важно отметить, что именно наличие медленно движущейся плазмы приводит к сжатиям плазмы. Поскольку медленно движущийся солнечный ветер истекает из областей короны с более замкнутой и ограниченной конфигурацией магнитного поля (связанной, например, с солнечными пятнами и другими проявлениями солнечной активности), следует ожидать большого количества областей взаимодействия (и соответственно меньшего уровня космических лучей) при высокой солнечной активности. Существенно, вероятно, и то, что районы с замкнутыми силовыми линиями имеют наибольшую широтную протяженность в максимуме цикла солнечной активности, когда корональные дыры над полюсами исчезают.

По-видимому, все большее признание приобретает мнение, что высокоскоростной солнечный ветер является обычным нормальным состоянием, а медленно движущийся солнечный ветер есть результат сил натяжения в короне, препятствующих свободному истечению корональной плазмы. Полярные области Солнца, которые в течение большей части солнечного цикла покрыты униполярными корональными дырами с расходящимися силовыми линиями маг-

нитного поля открытой конфигурации, должны быть источниками долгоживущих высокоскоростных струй солнечного ветра. Некоторое подтверждение такого заключения следует из радионаблюдений нерегулярностей солнечного ветра, указывающих на общее возрастание скорости солнечного ветра с широтой.

Разрывы в солнечном ветре. Границы между различными плазменными областями переносятся потоком солнечного ветра. Состояния плазмы по обе стороны от такой границы не являются независимыми, а связаны уравнениями Максвелла и условием равенства давления по нормали к границе. При тангенциальном разрыве магнитное поле и скорость потока должны быть параллельны границе, но величина и ориентация двух векторов может изменяться произвольным образом, совместимым с этим ограничением. Тангенциальный разрыв стационарен по отношению к плазме.

Выбросы вещества. В дополнение к непрерывному корональному расширению часто наблюдаются нестационарные выбросы вещества короны. Выбросы определенного типа происходят при солнечных вспышках, когда вещество быстро расширяющегося вспышечного выброса движется от Солнца, сжимая и отбрасывая в сторону плазму более медленного солнечного ветра. Обычно ударный фронт формируется на переднем крае сжатого плазменного слоя. Область сжатия за ударной волной имеет толщину от 0,1 до 0,2 а. е. За тангенциальным разрывом, который отделяет сжатый солнечный ветер от вспышечного выброса, часто наблюдается тонкий (толщиной 0,01—0,1 а. е.) слой, обогащенный гелием (гелиевая область). И наконец, выброс часто сопровождается локализованным высокоскоростным потоком низкой плотности, длящимся 1—2 суток. Хотя масса и энергия в типичном большом выбросе превышают потерю массы и энергии при нормальном «спокойном» расширении солнечного ветра, такие выбросы случаются столь редко, что переносят менее 10% общей массы и энергии в солнечном ветре.

Выбросы вещества другого типа связаны с эруптивными протуберанцами или исчезающими волокнами. Масса, вовлеченная в такой выброс, меньше примерно в 10 раз; эти выбросы случаются примерно в 10 раз чаще, чем вспышечные выбросы.

Увеличения плотности плазмы (и соответствующие увеличения напряженности магнитного поля), обусловленные выбросами обоих типов, являются причиной сильного рассеивания космических лучей и вносят вклад в модуляцию галактических космических лучей солнечной активностью (ф о р б у ш — понижения интенсивности космических лучей).

Волны в солнечном ветре. Наблюдения свидетельствуют о существовании непрерывных флуктуаций магнитного поля в плазме солнечного ветра, которые являются, по-видимому, преимущественно альвеновскими волнами, переносимыми от Солнца. Помимо такого переноса существует и движение волн от Солнца относительно плазмы. Из этого распространения волн следует, что они гене-

ируются вблизи Солнца, по крайней мере внутри критического радиуса. Предполагается, что источником этих волн в солнечном ветре является фотосферная супергрануляция.

Вращательные разрывы являются резкими «изгибами», распространяющимися вдоль магнитных силовых линий со скоростью Альвена. Напряженность магнитного поля и скорость плазмы по обеим сторонам такого разрыва одинаковы. Разрывы в солнечном ветре обоих типов являются весьма обычными явлениями.

Волокна в солнечном ветре — это довольно неопределенное понятие, означающее, что отдельные области плазмы солнечного ветра разграничены сходным образом ориентированными тангенциальными разрывами, простирающимися вплоть до Солнца. Такая картина вытекает из волокнистой модели солнечного ветра. Наблюдения же, по-видимому, показывают, что такие волокна редки и что ориентация поверхностей разрыва обычно меняется от одной поверхности к другой, в результате чего среда имеет разрывную, а не волокнистую структуру.

Ударные волны образуются, когда две смежные плазменные области сталкиваются с относительной скоростью, превосходящей локальную скорость звука (или скорость Альвена). Существует довольно сложный набор возможных типов ударных волн. Рассматриваются два граничных класса ударных волн. Поршневые волны, генерируемые протяженными и длительными возмущениями вблизи Солнца, характеризуются возрастанием плотности, скорости и температуры движущегося за ударным фронтом газа. К другому классу относятся взрывные волны, генерируемые импульсными возмущениями вблизи Солнца, для которых характерно понижение плотности, скорости и температуры после прохождения ударного фронта. Поршневые волны связаны с высокоскоростными потоками или вспышками, которые поставляют массу и энергию в солнечный ветер в течение периода времени больше пяти часов, тогда как межпланетные взрывные волны связаны, по-видимому, со вспышками, которые высвобождают энергию за время короче получаса. Промежуточные типы ударных волн являются результатом выбросов с характерным временем 0,5—5 ч.

3.2. Космические магнитные поля

Радиальные потоки солнечной плазмы (солнечный ветер), унося «вмороженное» в них солнечное магнитное поле, образуют межпланетное магнитное поле. Такой перенос силовых линий солнечного магнитного поля высокопроводящей плазмой солнечного ветра возможен потому, что плотность кинетической энергии солнечного ветра на два порядка превышает плотность магнитной энергии.

Из-за вращения Солнца радиально направленные магнитные силовые линии будут по мере роста расстояния от Солнца искривляться, принимая форму архимедовых спиралей. Такая идеализиро-

ванная конфигурация силовых линий космического магнитного поля представлена на рис. 3.2.

Воспользовавшись приведенными на рис. 3.2 обозначениями, выведем уравнение спирали в полярных координатах. Положение любой точки на спирали будет характеризоваться ее радиус-вектором r и углом φ между начальным направлением радиус-вектора φ_0 и его направлением в данный момент времени t . Тогда, предполагая, что солнечный ветер движется наружу с постоянной скоростью так, как если бы магнитного поля не было, получаем:

$$r(t) = v \cdot t + R_{\odot}, \quad (3.1)$$

$$\varphi(t) = \omega \cdot t + \varphi_0, \quad (3.2)$$

где v — скорость солнечного ветра; ω — угловая скорость вращения Солнца; R_{\odot} — радиус Солнца.

Исключая t из этих выражений и выбирая полярную ось системы координат так, что $\varphi_0 = 0$, находим уравнение спирали

$$v = R_{\odot} \omega + \frac{v}{\omega} \varphi. \quad (3.3)$$

Когда радиус-вектор пересекает Землю, то $r = R$ и угол между направлением потока и линией Солнце — Земля определяется соотношением

$$\theta = \frac{\omega}{v} [R - R_{\odot}] \approx \frac{\omega}{v} R, \quad (3.4)$$

а угол между касательной к силовым линиям и направлением Солнце — Земля определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega R}{v}. \quad (3.5)$$

Подставляя в правые части двух последних формул численные значения

$$\omega = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ град} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$R = 1,5 \cdot 10^8 \text{ км};$$

$$v = 400 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Находим

$$\theta = 56^\circ, \quad \psi = 45^\circ.$$

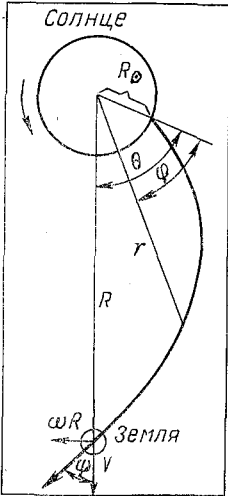


Рис. 3.2. Форма магнитных силовых линий, вынесенных из Солнца потоком солнечной плазмы

При $v = 300 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно получаем

$$\theta = 75^\circ, \quad \psi = 53^\circ.$$

Отсюда следует важный вывод, что магнитная силовая линия, выходящая из Солнца в плоскости эклиптики под углом $\sim 60^\circ$ к западу от линии Солнце — Земля, пересекает Землю.

На основе данных о вращении Солнца было исследовано влияние гелиографической широты областей на Солнце, являющихся источником межпланетного магнитного поля, на возможность пересечения создаваемых ими силовых линий с магнитосферой Земли (т. е. с корпускулярными потоками из активных областей, движущимися по силовым линиям магнитного поля). Результаты такого анализа показали, что источники поля должны быть расположены в полосе $\pm 10\text{—}15^\circ$ относительно солнечного экватора. На рис. 3.3, поясняющем влияние гелиографической широты φ , эта полоса выделена стрелочками.

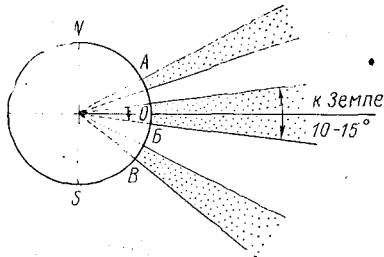


Рис. 3.3. Схема, поясняющая связь между широтой, на которой находятся активные образования на Солнце, и влиянием этих образований на атмосферу Земли при наличии радиальных потоков: А и В — магнитные силовые линии не достигают Земли, Б — достигают

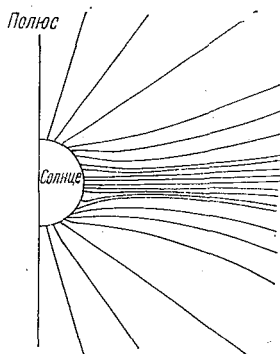


Рис. 3.4. Конфигурация силовых линий ММП по расчетам Ван де Хойвела

Используя подобную же модель распространения солнечного ветра и предполагая, что наряду с радиальной присутствует и азимутальная компонента скорости, а также сделав ряд предложений о магнитном поле в «окрестности» поверхности Солнца, можно рассчитать конфигурацию силовых линий межпланетного магнитного поля и в плоскости, перпендикулярной плоскости эклиптики. Типичная конфигурация силовых линий магнитного поля, получающаяся в результате реализации такого расчета, представлена на рис. 3.4.

Наряду с теоретическими исследованиями в последние годы были проведены очень детальные и точные измерения магнитных полей в межпланетном пространстве с помощью ИСЗ и межпланетных космических станций. Эти измерения подтвердили теоретически ожидаемый угол силовых линий с радиальным направлением (спираль Архимеда) и позволили выявить пространственную структуру межпланетного магнитного поля как в плоскости эклиптики, так и в плоскости, перпендикулярной к ней.

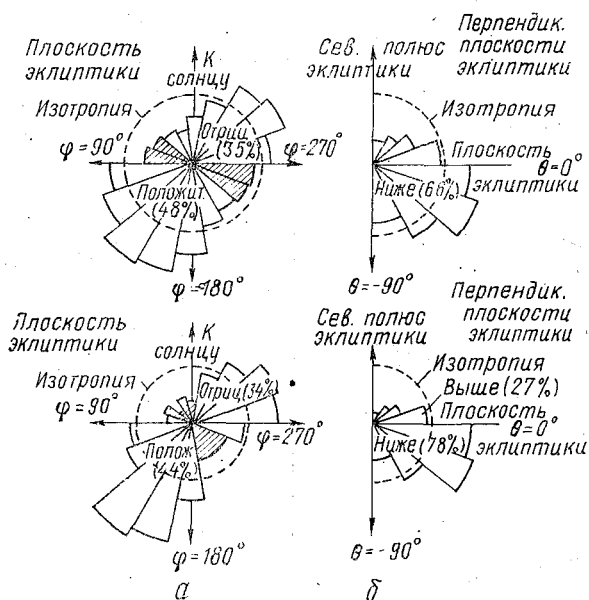


Рис. 3.5. Диаграмма распределения направлений ММП в плоскостях, параллельных и перпендикулярных к плоскости эклиптики, при двух масштабах временного осреднения

Пример диаграммы такого распределения по данным ИСЗ «IMP—1» при двух интервалах усреднения (а — 5,46 мин, б — 3 ч) представлен на рис. 3.5. На этом рисунке гистограммы показывают угловое распределение направленности поля (пунктирные окружности соответствуют изотропному распределению). В плоскости эклиптики максимум распределения соответствует углу, образуемому касательной к спирали Архимеда с радиальным направлением. Распределение направлений поля в плоскости, перпендикулярной эклиптике, показывает, что межпланетное поле в основном параллельно, а не перпендикулярно эклиптике, с чем согласуются и данные теоретических расчетов.

Кроме того, эти измерения выявили секторную структуру межпланетного магнитного поля (ММП).

Секторная структура ММП. Измерения параметров межпланетного магнитного поля, выполненные с помощью ИСЗ вблизи экваториальной плоскости Солнца, обнаружили его крупномасштабную упорядоченность. Эта упорядоченность выражается в том, что магнитное поле состоит из нескольких (обычно четырех) секторов или областей, в которых магнитное поле направлено преимущественно к Солнцу или от Солнца вдоль архимедовой спирали, образующейся в результате вращения Солнца. Секторная граница, разделяющая поля противоположной полярности, обычно очень тонкая

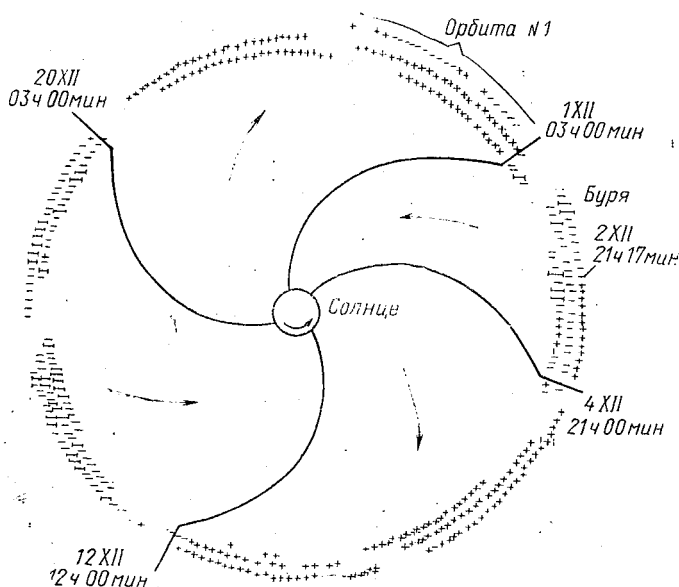


Рис. 3.6. Структура солнечных магнитных секторов по данным спутника *IMP-1*. По Вилкоксу и Нессу. Знаки «+» (от Солнца) и «-» (к Солнцу) — результаты трехчасовых измерений направления ММП; стрелки — преобладающее направление поля

и проносится мимо наблюдателя (вследствие ее вращения) за время порядка нескольких минут, а время, соответствующее ширине типичного сектора, составляет примерно неделю. Секторная структура межпланетного магнитного поля по данным ИСЗ «*IMP-1*» представлена на рис. 3.6. Угловые интервалы, в пределах которых поле в основном направлено от Солнца (или к нему), обозначены как положительные или отрицательные (в соответствии с обозначениями + и -).

Источником секторной структуры в межпланетном магнитном поле являются солнечные униполярные магнитные области. На участке спада 11-летнего цикла солнечной активности униполярные

магнитные области развиты наиболее сильно и наиболее долговечны. Поэтому в этот период в межпланетном магнитном поле наблюдаются весьма устойчивые четыре сектора. Вблизи же максимума и особенно на ветви роста цикла солнечной активности униполярные области развиты слабо и не отличаются устойчивостью. По этой причине для межпланетного поля в это время характерно наличие двух секторов с противоположной полярностью.

Связь межпланетного магнитного поля с магнитными полями на Солнце приводит к концепции магнитного нейтрального слоя. Этот слой разделяет области, в которых плазма движется из двух различных полушфер Солнца, обычно имеющих противоположное направление магнитного поля. Две плазменные области (северная и южная) разделены на Солнце широким экваториальным поясом замкнутых силовых линий, откуда солнечный ветер либо вообще не истекает, либо истекает в очень небольших количествах. Каждый раз, когда наблюдатель пересекает нейтральный слой, он отмечает прохождение через границу сектора.

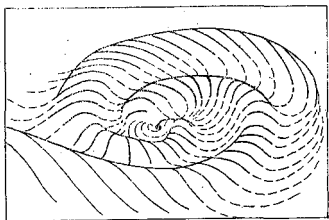


Рис. 3.7. Схема гофрированного токового слоя во внутренней части солнечной системы; сплошные и пунктирные линии изображают токовый слой соответственно над и под экваториальной плоскостью (в центре кружком отмечено Солнце)

Нейтральный слой не расположен точно в плоскости солнечного экватора. Крупномасштабное азимутальное упорядочение фотосферного магнитного поля на Солнце является причиной искривления (гофрировки) в межпланетном пространстве экваториального магнитного нейтрального слоя. В результате он попеременно отклоняется к северу и югу от плоскости солнечного экватора, так что наблюдатель, находящийся вблизи солнечной экваториальной области, в течение оборота Солнца обнаруживает плазму попеременно то с одной, то с другой стороны нейтрального слоя.

Как следствие этого и наблюдается секторная структура с меняющейся полярностью магнитного поля, причем сама секторная граница в этом случае представляет собой наклонную поверхность токового слоя.

Трехмерная структура магнитного нейтрального слоя представлена на рис. 3.7. В центре изображено Солнце (в другом масштабе). Изображена ситуация для четырехсекторной структуры. Сплошные и пунктирные линии изображают токовый слой, располагающийся соответственно над и под экваториальной плоскостью. Предполагается, что протяженность по широте токового слоя составляет $\pm 15^\circ$.

Вблизи границ секторов ММП испытывает существенные вариации параметров солнечного ветра, изменяется напряженность магнитного поля. Для иллюстрации таких вариаций на рис. 3.8 пред-

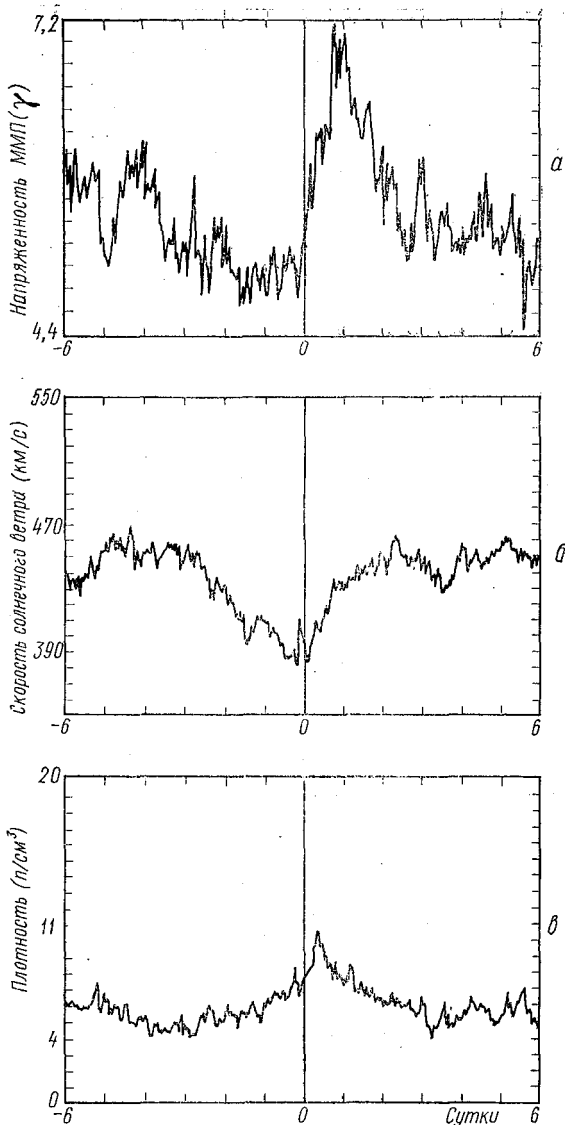


Рис. 3.8. Изменения напряженности ММП (*a*), скорости (*б*) и плотности частиц (*в*) солнечного ветра при прохождении границ секторов межпланетного магнитного поля (усредненные данные за 1965—1974 гг.; моменту прохождения соответствует 0 на оси абсцисс)

ставлены усредненные за период 1965—1974 гг. изменения напряженности ММП (рис. 3.8, *a*), скорости и плотности частиц солнечного ветра (рис. 3.8, *b* и 3.8, *в*) при прохождении границ секторов (момент прохождения соответствует 0 на оси абсцисс). Анализ представленных рисунков показывает, что указанные параметры изменяются в 1,2—2,5 раза за период 2—3 суток.

3.3. Магнитные бури и полярные сияния

Магнитные бури. Еще в 1600 г. появилась книга английского ученого Гильберта, в которой он утверждал, что Земля является большим магнитом. В настоящее время известно, что постоянное магнитное поле Земли в первом приближении можно описать как поле диполя. На дипольное поле накладываются различные аномалии, связанные с неоднородным строением земной коры.

Ось земного диполя наклонена приблизительно на 11° к оси вращения Земли и пересекает земную поверхность в точках с координатами: $\varphi = 81^\circ$ с. ш. $\lambda = 84,7^\circ$ з. д. в Гренландии (северный геомагнитный полюс); 75° ю. ш. и $120,4^\circ$ в. д. в Антарктике (южный геомагнитный полюс).

Постоянное магнитное поле Земли испытывает медленные изменения, называемые вековыми вариациями. Изменения магнитного момента в первом приближении описываются соотношением

$$M(t) = (15,77 - 0,003951 t) \cdot 10^{25} \text{ [Гс см}^3\text{]}, \quad (3.6)$$

где t — время в годах, отсчитываемое от 1900 г.

Напряженность геомагнитного поля \vec{B} измеряется в гауссах (Гс), теслах (Т) или гаммах (γ):

$$1 \text{ Т} = 10^4 \text{ Гс}; \quad 1 \gamma = 10^{-5} \text{ Гс} = 1 \text{ нТ}.$$

В любой точке пространства напряженность геомагнитного поля \vec{B} можно представить с помощью локальной геомагнитной системы координат, представленной на рис. 3.9, модулем $|\vec{B}|$ и двумя углами: I и D . Угол наклоения I (или наклонение) — это угол между вектором \vec{B} и его горизонтальным компонентом H . Он считается положительным при отклонении вектора вниз от горизонтальной плоскости. Склонение D является азимутом, измеряемым от горизонтального направления на север.

Поле \vec{B} может задаваться также тремя взаимноперпендикулярными компонентами: северной X и восточной Y — в горизонтальной плоскости, V или Z — по вертикали. Величины $|\vec{B}|$, H , D , I , X , Y , Z или V называются магнитными элементами. Распределение геомагнитного поля по поверхности Земли таково, что на магнитных полюсах $I = 90^\circ$, $H = 0$. Напротив, на магнитном экваторе

$I = 0^\circ$, $Z = 0$. Z на магнитных полюсах составляет около 60 000 γ, H на магнитном экваторе равно примерно 33 тыс. γ.

Главное геомагнитное поле для каждой эпохи представляется при помощи изомагнитных карт, на которых нанесены изомагнитные линии: изогоны ($D = \text{const}$), изоклины ($I = \text{const}$), изодинамы ($|\vec{B}| = \text{const}$).

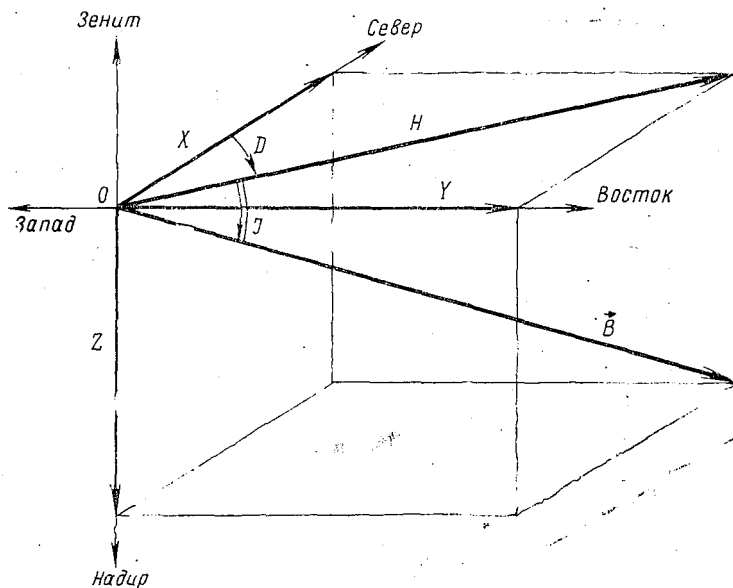


Рис. 3.9. Локальная система координат, используемая для описания геомагнитного поля: I — наклонение; D — склонение

Быстрые изменения геомагнитного поля получили название магнитных бурь. Магнитная буря обычно наблюдается одновременно на всей Земле, но ее проявления в разных местах земной поверхности могут быть неодинаковыми. На низких и средних широтах во время магнитной бури наблюдается внезапное падение горизонтальной составляющей (главная фаза бури), обычно измеряемое десятками, а иногда сотнями гамм. Иногда перед началом бури происходит кратковременный подъем H : поле может увеличиться на несколько десятков гамм за 2—3 мин. Такое явление называется внезапным началом магнитной бури. Если на записи нельзя выделить внезапного начала бури, то бурю относят к магнитным бурям с постепенным началом.

На высоких широтах, особенно вблизи зоны полярных сияний, падения H почти не наблюдается. В этих широтах возникают сильные и очень быстрые колебания геомагнитного поля.

Эти изменения имеют характер неправильных колебаний (флуктуаций), накладывающихся на так называемые «бухтообразные»

колебания, т. е. сравнительно плавные изменения геомагнитного поля (особенно в горизонтальной составляющей H). Колебания («бухты») могут быть положительными или отрицательными, в соответствии со знаком отклонения ΔH . Отрицательные бухты на высоких широтах (вблизи зоны полярных сияний) возникают, как правило, в ночное время, а положительные — в вечерние часы. В средних широтах, наоборот, ночью наблюдаются положительные бухты, а вечером — отрицательные. Бухты (иногда их называют суббурями) длятся около 1—2 ч; совокупность бухт, следующих друг за другом и сопровождающихся очень сильными флуктуациями, называется магнитной бурей. Сильные бури могут длиться 2—3 суток, причем в дневное время их интенсивность может затихать.

Возмущения геомагнитного поля вызваны электрическими токами, текущими частью в ионосфере на высоте около 100 км (электросфера), частью идущими из магнитосферы в ионосферу и обратно (вертикальные токи).

Эти токи образуют замкнутую систему, причем в некоторых местах токи сгущаются, возникают так называемые «электроструи», в других местах токи растекаются по большой поверхности ионизированного слоя атмосферы, где сила их ослабевает. Под электроструями находятся те участки земной поверхности, где полярные магнитные возмущения особенно сильны. В утренней электроструе ток течет вдоль магнитной параллели с «утра» на ночную сторону (к полуденному меридиану), а в вечерней — в обратном направлении — с «вечера» к полуденному меридиану. Аналогичная пара электроструй находится и в южном полушарии Земли.

Вся эта довольно сложная система электрических токов в ионосфере неподвижна относительно направления на Солнце, а Земля в своем суточном вращении проходит под ней.

Как же возникает система токов полярных магнитных возмущений?

Солнце непрерывно излучает в космическое пространство потоки заряженных частиц (корпускул), образующих так называемый солнечный ветер. Потоки усиленного солнечного ветра выбрасываются не из всей поверхности Солнца, как нормальный солнечный ветер, а из некоторых ограниченных областей солнечной поверхности. Существует два вида таких геоэффективных областей на Солнце:

1) активные области, связанные с группами солнечных пятен, вблизи которых происходят хромосферные вспышки;

2) корональные дыры, т. е. области пониженной интенсивности зеленой корональной линии, лежащие над униполярными магнитными областями, над которыми силовые линии магнитного поля Солнца образуют открытые структуры; вдоль этих силовых линий солнечная плазма может свободно утекать в космическое пространство.

Количество и интенсивность геоэффективных солнечных областей заметно меняется в 11-летнем цикле, но различным образом: активные области сильнее всего развиты вблизи максимума солнечной активности, а корональные дыры — незадолго (за 1—3 года) до минимума. В это время корональные дыры становятся особенно устойчивыми и могут существовать в течение нескольких десятков оборотов Солнца. Активные области существуют гораздо меньшее время, обычно 1—2 оборота Солнца и менее. Этим определяется основное различие между геомагнитными бурями, связанными с активными областями и с корональными дырами, — первые вовсе не обнаруживают 27-дневной рекуррентности (т. е. повторения через солнечный оборот, равный 27 дням) или же повторяются 1—2 раза, тогда как вторые имеют хорошо выраженную рекуррентность и на 27-дневных календарях образуют длинные последовательности. Такие магнитные бури называют рекуррентными в отличие от спорадических (или вспышечных) магнитных бурь, связанных с активными областями Солнца. Между магнитными бурями обоих типов существуют и другие отличия — спорадические бури длятся, как правило, дольше рекуррентных и у них главная фаза выражена лучше, чем у рекуррентных бурь.

Регулярные наблюдения геомагнитных возмущений на большом числе обсерваторий проводятся с конца XIX века. Анализ изменений числа и интенсивности этих возмущений от года к году позволил установить интересную закономерность: вспышечные возмущения изменяются пропорционально солнечной активности (числам Вольфа) — это понятно, так как источники возмущений этого типа, хромосферные вспышки, тесно связаны с большими группами солнечных пятен. Рекуррентные возмущения изменяются совершенно иным образом — их число и интенсивность в конце данного цикла пропорциональны высоте следующего 11-летнего цикла солнечных пятен. Коэффициент корреляции между этими величинами составляет + 0,97, что говорит о наличии физической связи между рекуррентными магнитными возмущениями, развивающимися на ветви спада 11-летних циклов, и солнечной активностью в следующих циклах.

Рассмотрим как возникает система токов полярных магнитных возмущений.

Для хорошо проводящей плазмы солнечного ветра геомагнитное поле является почти непреодолимым препятствием, которое солнечный ветер вынужден обтекать. Магнитное поле Земли как бы вырезает полость в солнечном ветре, в центре которой находится Земля (рис. 3.10). Полость эта содержит практически все силовые линии геомагнитного поля, так как в солнечный ветер эти силовые линии не проникают. Размеры полости довольно велики — ее поперечник составляет 100—200 тыс. км. Форма полости резко асимметрична: если со стороны Солнца ее можно уподобить полусфере, то с ночной стороны она представляет собой длинный цилиндр, доходящий до орбиты Луны. Эта полость получила название «магнитосферы»,

хотя она и не представляет собой сферы (шаровой поверхности). Цилиндрическая область магнитосферы, вытянутая от Солнца, называется «хвостом магнитосферы». Хвост магнитосферы простирается до 80 радиусов Земли (R_E), а передняя часть до $10 R_E$. Силовые линии геомагнитного поля, образующие хвост магнитосферы, направлены почти параллельно друг другу, но выше плоскости земного экватора они идут к Земле, а линии, лежащие ниже этой плоскости, направлены от Земли. Вблизи плоскости экватора лежит так называемый «нейтральный слой», разделяющий области хвоста с противоположным направлением магнитного поля. В самом нейтральном слое напряженность магнитного поля очень мала.

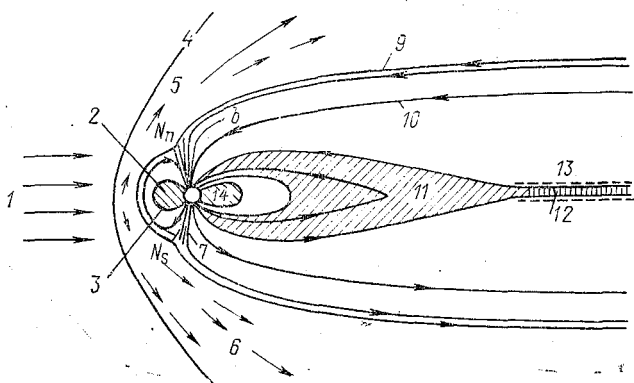


Рис. 3.10. Магнитосфера Земли:

- 1 — сверхзвуковой солнечный ветер; 2 — плазмопауза; 3 — плазмосфера; 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

Поскольку солнечный ветер распространяется в космическом пространстве со сверхзвуковой скоростью, то перед магнитосферой образуется так называемая «отошедшая ударная волна», отделяющая солнечный ветер от «переходной области», где плазма солнечного ветра несколько увеличивает свою энергию и турбулизуется. На дневной стороне северной и южной шапок Земли силовые линии геомагнитного поля образуют две воронкообразные области, называемые «дневными полярными каспами» (от английского «касп» — выступ, мыс). Дневные каспы отделяют замкнутые силовые линии на дневной стороне магнитосферы от разомкнутых силовых линий, уходящих в хвост. Внутри каспов геомагнитное поле ослаблено, и плазма переходного слоя может сравнительно легко проникать в полярные шапки вдоль силовых линий, ограничивающих каспы.

Существуют еще «магнитопауза» — граничная поверхность магнитосферы и «авроральные овалы» — области земной поверхности, куда приходит часть силовых линий, образующих геомагнитный хвост, а именно, те линии, которые ближе всего расположены к геомагнитному экватору. В области «ночного каспа» замкнутые силовые линии несколько вытягиваются в сторону хвоста. Это — переход между замкнутой магнитосферой и хвостом.

В магнитосфере наблюдаются магнитосферные возмущения. В ней происходит ускорение частиц солнечного ветра. Основным механизмом ускорения является процесс пересоединения силовых линий в хвосте магнитосферы. Этот механизм объясняет «взрывной» характер магнитосферного возмущения.

Основной особенностью механизма пересоединения силовых линий является постепенное накопление магнитной энергии в хвосте магнитосферы. Этот процесс сопровождается ростом напряженности магнитного поля хвоста и быстрым превращением накопленной магнитной энергии в кинетическую энергию содержащихся в плазменном слое хвоста заряженных частиц. Такой переход энергии происходит в процессе пересоединения противоположно направленных силовых линий.

Развитие магнитосферного возмущения можно разделить на три фазы:

1) фаза роста — начинается в момент перехода вертикальной составляющей ММП B_z к направлению на юг;

2) фаза расширения — характеризуется падением напряженности магнитного поля хвоста и развитием коллапса (коллапс — внезапный переход силовых линий хвоста к дипольной конфигурации, причем силовые линии сближаются и напряженность в каспе растет). Продолжительность этого явления 0,5—1 ч;

3) фаза восстановления — начинается в момент смены направления B_z на северное. Хвост магнитосферы приобретает при этом прежнюю конфигурацию (продолжительность 1—2 ч).

Еще одно важное следствие магнитосферного возмущения — наиболее энергичные из частиц, идущих из хвоста магнитосферы, прорываются через замкнутые силовые линии в область замкнутой магнитосферы и образуют там кольцевой ток, окружающий Землю. Этот ток идет таким образом, что горизонтальная составляющая его магнитного поля у поверхности Земли направлена против постоянного геомагнитного поля (магнитограф отметит в это время падение H — возникает главная фаза магнитной бури).

Полярные сияния. Потоки плазмы во время магнитосферного возмущения должны идти к ночной стороне авроральных овалов, где наблюдаются самые сильные полярные магнитные возмущения и полярные сияния. Заряженные частицы, проходящие в авроральные овалы, прежде всего, сталкиваясь с атомами и молекулами газов, входящих в состав воздуха (в основном азот и кислород), ионизуют их, т. е. отрывают от них один из электронов. При этом образуются положительные ионы и свободные электроны. Иногда

свободный электрон присоединяется к нейтральной частице и образует отрицательный ион. Усиленная ионизация нижней ионосферы сопровождается излучением света возбужденных при столкновениях с вторгающимися частицами атомов и молекул — так возникает свечение, называемое полярным сиянием. Одновременно в высокопроводящих сильно ионизованных участках ионосферы возникают электрические токи. Их магнитное поле называется магнитной бурей.

Основные формы полярных сияний — однородные дуги, полосы, светящиеся поверхности и пятна. Дуги обычно охватывают весь небосвод, простираясь от восточной к западной части горизонта. Полосы имеют искривленную форму, иногда напоминают подковы, или бывают изогнуты в форме буквы S. Спокойные однородные полярные сияния наблюдаются на высоких широтах почти каждую ночь. Иногда во время магнитных возмущений на небе появляются активные сияния, имеющие лучистую структуру. Дуги и полосы разделяются на отдельные почти вертикальные лучи, форма их изменяется, они движутся по небосводу. Лучистые полосы становятся похожи на светящиеся занавеси со множеством складок, которые развеваются и снова сворачиваются.

В вечерние часы наблюдаются обычно спокойные дуги и полосы. По мере приближения к полуночи (по местному времени) сияния активизируются, появляются лучистые формы, возникают пульсации свечения, по всей поверхности сияния пробегают волны света сверху вниз и снизу вверх. После полуночи на небе видны лишь отдельные светящиеся поверхности и пятна.

Если фотоснимки дуг полярных сияний перенести на карту земной поверхности, то окажется, что дуги направлены вдоль магнитных параллелей (кругов магнитной широты). Иное направление имеют дуги в полярных шапках Земли — там они вытянуты вдоль линий, идущих от Солнца к ночной стороне Земли.

Высота нижнего края полярных сияний составляет около 100 км и только у самых сильных высота несколько меньше: 80—90 км. Сияния, наблюдаемые над полярными шапками, имеют большие высоты, до 150—160 км. Это означает, что они вызываются частицами с меньшими энергиями, чем обычные сияния в авроральных овалах.

Цвет спокойных полярных сияний обычно зеленоватый. Во время активной фазы они переливаются разными цветами, от красного до голубовато-фиолетовых тонов, бывают и с нижним краем кроваво-красного цвета. Эти сияния имеют меньшие, чем обычно, высоты (до 80 км). Иногда на средних широтах наблюдаются сияния с красной окраской в верхней части.

Большинство полярных сияний наблюдается в двух кольцевых зонах, отстоящих на 20—25° от магнитных полюсов Земли, но иногда, в случае особенно сильных магнитосферных возмущений, сияния могут наблюдаться даже на очень низких широтах, вблизи экватора.

Спектр свечения полярных сияний насчитывает свыше 150 линий и полос, принадлежащих атомам и молекулам элементов, входящих в состав верхней атмосферы Земли. Главную роль среди них играет зеленая линия ($\lambda = 557,7$ нм) и красный триплет атомарного кислорода ($\lambda = 630,0; 636,6; 639,2$ нм). Обычная зеленоватая окраска обусловлена преобладанием свечения в линии 557,7 нм. Большую интенсивность имеют также полосы в фиолетовой и синей частях спектра, излучаемые однократно ионизированной молекулой азота. В красной и инфракрасной частях спектра наблюдаются полосы нейтральной молекулы азота. Красное свечение верхних участков связано с усилением интенсивности красного триплетта кислорода. Красные сияния с окраской нижнего края обусловлены свечением полос нейтральной молекулы азота.

Полярные сияния разделяются на два класса: электронные, в которых свечение вызвано возбуждением потоками электронов, и протонные, возникающие при столкновениях с протонами. Большинство сияний, имеющих определенную форму, являются электронными, а протонные имеют форму широких красноватых дуг, вытянутых вдоль магнитных параллелей. Обычно они имеют небольшую яркость.

3.4. Общая характеристика заряженных частиц, приходящих из космоса

Заряженные частицы (корпускулярное излучение) в первом приближении можно разделить на два класса: низкоэнергичные частицы солнечных корпускулярных потоков (солнечная плазма) с энергией протонов 10^3 — 10^5 эв и высокоэнергичные частицы (космические лучи) с энергией протонов $> 10^6$ эв. Последние приходят к Земле главным образом из Галактики. Мягкие космические лучи (10^6 — 10^9 эв) приходят также от Солнца во время мощных хромосферных вспышек. Энергия, приносимая частицами низких энергий, достигает в отдельные периоды 10^3 эрг·см⁻¹ с⁻¹, что примерно на 6—10 порядков выше энергии, приносимой частицами высоких энергий.

Интегральный энергетический спектр корпускулярного излучения представлен на рис. 3.11. Здесь:

- 1 — тепловые частицы межпланетной плазмы;
- 2 — частицы корпускулярных потоков;
- 3 и 4 — частицы, вызывающие полярные сияния (соответственно результаты измерений Ван Аллена и оценки Чемберлена);
- 5 — частицы, вызывающие поглощение радиоволн в полярной шапке;
- 6 и 7 — спектр солнечных космических лучей от вспышки 23.03.56 согласно измерениям Ван Аллена и Мейера,
- 8 — спектр космических лучей галактического происхождения,
- 9 — шкала геомагнитных широт обрезания,

10 — шкала высот для проникновения протонов в атмосферу,
 11 — предел независимости протонов при их движении в геомагнитном поле.

Кривые 1, 2 и 11 — расчетные.

Информация о низкоэнергичных частицах, приходящих от Солнца, дана в предыдущей главе.

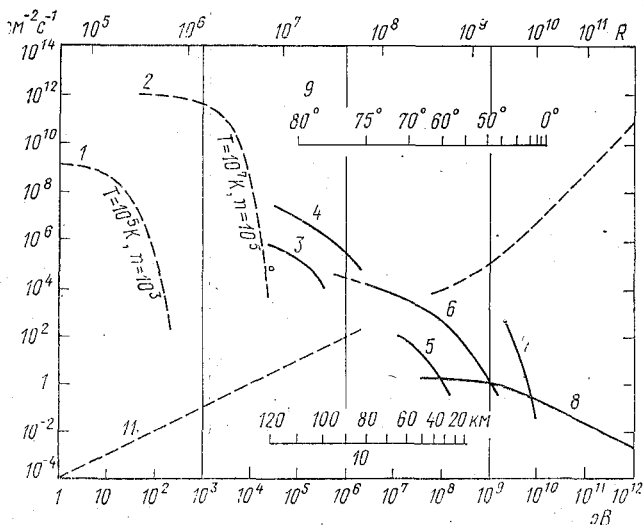


Рис. 3.11. Интегральный энергетический спектр солнечного корпускулярного излучения:

Кривые 1, 2, 11 — расчетные; 3 ÷ 8 — экспериментальные;
 9 — шкала геомагнитных широт обрезания; 10 — шкала высот для проникновения протонов в атмосферу Земли

Здесь более подробно остановимся на частицах высоких энергий — космических лучах. В зависимости от происхождения различают галактические и солнечные космические лучи. Кроме того, имеются вторичные космические лучи, в состав которых входят различные частицы. Многие из этих частиц нестабильны. Они образуются в результате столкновения первичных космических лучей с атмосферой. Высокоэнергичные частицы с энергиями более нескольких сот мегаэлектронвольт на нуклон испытывают ядерные столкновения с образованием вторичных частиц; в свою очередь эти частицы также могут породить другие частицы.

Поток первичных космических лучей, а следовательно, и интенсивность вторичных частиц в атмосфере зависят от геомагнитной широты.

Рассмотрим лишь те частицы, которые входят в магнитосферу из межпланетного пространства и имеют энергию, достаточную

для движения поперек геомагнитного поля и проникновения в самый верхний слой земной атмосферы.

Большая часть космических лучей, обычно наблюдаемых в Солнечной системе, имеет галактическое происхождение. Однако время от времени в периоды вспышечной активности Солнце испускает высокоэнергичные частицы. Тогда в течение короткого промежутка времени в космическом излучении межпланетного пространства могут преобладать солнечные частицы.

Галактические космические лучи состоят из электронов, позитронов и ядер всех элементов. Обычно это стабильные изотопы, но в потоке космических лучей также содержатся некоторые нестабильные ядра. Регистрируются и ядра с периодом полураспада, достаточно большим по сравнению со временем их перемещения от источника в Солнечную систему.

Полный поток космических лучей, достигающих земной атмосферы, имеет интенсивность порядка $1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что значительно меньше числа фотонов, приходящих из космического пространства. Мала и полная энергия, поступающая на Землю с космическими лучами: она составляет 10^{-7} от энергии, излучаемой спокойным Солнцем (тем не менее в целом во Вселенной энергия, заключенная в космических лучах, сравнима с энергией электромагнитного излучения).

Измерения на спутниках показали, что поток галактических космических лучей модулируется активностью Солнца. Суть модуляции состоит в том, что движению галактических частиц, постоянно диффундирующих во внутренней части Солнечной системы, препятствуют солнечные магнитные поля, которые уносятся от Солнца облаками плазмы. Этот эффект сильнее всего выражен в периоды повышенной солнечной активности. Удобный метод наблюдений солнечной модуляции состоит в регистрации на поверхности Земли мю-мезонов или нейтронов вторичных космических лучей.

Рассмотрим солнечные космические лучи. Некоторое количество частиц с энергиями ниже 20 МэВ, возможно, покидает Солнце более или менее постоянно, даже в тех случаях, когда его поверхность кажется спокойной, однако испускание более энергичных частиц всегда связано с солнечными вспышками.

Энергетический спектр, интенсивность, состав и направление прихода корпускулярного излучения в явлениях, связанных с солнечными вспышками, могут меняться в очень широких пределах (наблюдались солнечные частицы с энергией порядка 10^{10} эВ). Это зависит не только от характера вспышки, но и от ее положения на солнечном диске относительно вектора, связывающего центр Солнца с детектором, а также от состояния межпланетной среды. Тем не менее вспышки солнечных космических лучей, наблюдавшиеся вблизи Земли, имеют некоторые общие свойства и характеризуются параметрами, лежащими в определенных пределах.

Вспышки солнечных космических лучей меняются от очень слабых, едва заметных событий, которые происходят относительно часто, до сильных событий, которые очень редки. Самая сильная из наблюдавшихся вспышек (23 февраля 1956 г.) продолжалась несколько суток и создала вблизи Земли поток частиц с энергией выше 20 МэВ, имеющий интенсивность более 10^{10} см⁻²·с⁻¹. Во время этого события энергия, уносимая ускоренными частицами, составила примерно 10^{32} эрг, что сравнимо с энергией оптической вспышки.

Первые частицы от вспышки солнечных космических лучей приходят по направлениям, близким к направлению среднего магнитного поля Солнца (которое имеет вид спирали Архимеда и составляет угол приблизительно 45° с линией Земля — Солнце вблизи орбиты Земли). Более энергичные частицы приходят раньше менее энергичных, однако с запаздыванием на 1—2 ч по сравнению со временем, необходимым для прихода по прямой, связывающей Солнце и Землю. Позднее распределение становится более изотропным. При сильных вспышках можно наблюдать солнечные частицы с полностью изотропным распределением направлений прихода спустя несколько дней после исчезновения видимой солнечной вспышки.

Эти наблюдения свидетельствуют в пользу того, что в течение некоторого времени частицы остаются в окрестности Солнца и, как только они покидают зону непосредственного влияния Солнца, их движение направляется общим межпланетным магнитным полем. Изотропия прихода после прекращения эмиссии указывает на сильное рассеяние частиц далеко за орбитой Земли.

Как видно из вышеизложенного, приходящие к Земле частицы обладают целым рядом особенностей. Эти особенности частиц различных энергий проявляются:

- 1) при проникновении в магнитосферу Земли;
- 2) при вторжении в глубокие слои атмосферы Земли;
- 3) при взаимодействии с частицами воздуха.

Потоки частиц высоких энергий настолько разрежены, а энергии их настолько велики, что взаимодействием частиц между собой можно пренебречь. Частицы с энергией 10^8 — 10^{10} эВ способны фокусироваться в магнитном поле Земли и на поверхности Земли. В результате этого будут образовываться зоны Штермера — небольшие районы с повышенной интенсивностью высокоэнергичных частиц. Они могут проникать в нижние слои атмосферы всех широт и вызывать ионизацию молекул воздуха.

Частицы низких энергий оказывают влияние друг на друга, кроме того, на них влияет магнитное поле Земли. Деформация солнечным ветром магнитосферы Земли приводит к деформации радиационных поясов. Такая деформация дает толчок к выселянию электронов и протонов из внешнего радиационного пояса в зонах, близких к зоне полярных сияний. Частицы низких энергий

влиять в основном на ионизацию и нагревание термосферы высоких широт.

Заряженные частицы совершают вращательные движения в магнитном поле Земли, «навиваясь» на силовые линии магнитного поля.

Для протонов радиус криволинейной траектории равен

$$r_p = \frac{143 \sqrt{\omega}}{H}, \quad (3.7)$$

где ω — энергия протона в электрон-вольтах; H — напряженность магнитного поля в эрстедах.

В северном полушарии протоны вращаются против часовой стрелки, если смотреть от экватора в сторону полюса. Если рассмотреть движение протонов высоких энергий, то окажется, что в более плотных слоях они движутся с запада на восток, а в разреженных — с востока на запад. Эта анизотропия космических лучей носит название западно-восточной асимметрии.

3.5. Индексация геомагнитной активности

Величина, выражающая степень возмущенности геомагнитного поля за определенный промежуток времени при взаимодействии корпускулярного излучения Солнца с магнитосферой, называется геомагнитной активностью.

В предыдущих разделах были рассмотрены вариации геомагнитного поля, связанные с изменением корпускулярного излучения. Кроме указанных вариаций возникают периодические вариации вследствие вращения Земли вокруг своей оси и Солнца, а также вращения Луны вокруг Земли.

Солнечносуточная вариация (S_q -вариация) — это вариация с периодом 24 ч, которая проявляется в виде плавного изменения всех элементов геомагнитного поля. В возмущенные дни она становится незаметной. Регулярность S_q -вариации связана с вращением Земли вокруг своей оси и волновым излучением Солнца, в результате чего в ионосфере на высоте 100—120 км возникает система электрических токов, которая движется над поверхностью Земли вслед за Солнцем. Амплитуда S_q -вариации зависит от широты и изменяется от 5 до 100 γ . Она максимальна на магнитном экваторе, под экваториальным электроджетом и на средних широтах, под источником S_q -токовой системы электрических токов.

Лунносуточная вариация (L -вариация) — вариация периодического характера, с периодом ~ 25 ч, связанная с положением Луны относительно горизонта Земли. Амплитуда L -вариации равна 1—5 γ . Лунносолнечная вариация объясняется наличием горизонтальных вихревых токов, возникающих в ионосфере на высоте 100—120 км. Центры этих вихрей расположены приблизительно на 30° северной и южной широты.

Дни, когда наблюдаются только S_q и L -вариации и отсутствуют другие виды вариаций, называются магнитоспокойными днями.

При оценке общепланетарной геомагнитной активности за нулевой уровень отсчета принимают:

- 1) отклонение от S_q -вариации;
- 2) отклонение от $S_q + L$ -вариации;
- 3) отклонение от среднесуточного значения в магнитоспокойный день.

Многообразие в оценке уровня отсчета объясняется различным удалением обсерваторий от источников S_q и L -вариаций.

Количественной мерой геомагнитной активности являются индексы геомагнитной активности. Существующие индексы геомагнитной активности можно условно разделить на три группы.

К первой группе относятся индексы, характеризующие величину локальной геомагнитной активности, K, A_k, r_H, Q .

Ко второй группе можно отнести индексы, характеризующие геомагнитную активность на всей Земле. Это планетарные индексы: $C, C_i, C_p, C_q, K_p, K_M, K_z, K_n, A_p, A_p$.

К третьей группе относят индексы, которые отражают интенсивность магнитной возмущенности от вполне определенного источника (D_{st}, AF и др.).

Рассмотрим индексы, которые получили наиболее широкое распространение при исследовании солнечно-атмосферных связей.

К-индекс геомагнитной активности. K -индекс характеризует изменение солнечной корпускулярной радиации в трех часовых интервалах времени, начиная с 00 ч 00 мин UT (мировое время). Он выражается в баллах и принимает значения от 0 до 9. Балл 9 соответствует самому сильному геомагнитному возмущению.

K_p -индекс. Используется для оценки планетарной геомагнитной возмущенности. Индекс K_p характеризует возмущенность в трехчасовом интервале. Исходными данными для вычисления K_p -индекса являются данные K -индекса 12 обсерваторий, расположенных между 63 и 48° северной и южной геомагнитной широты.

В 60-е годы взамен индекса K_p были введены индексы K_N, K_S, K_m . Для их вычисления были выбраны в субавроральной зоне каждого полушария равномерно расположенные по долготе обсерватории, наиболее пригодные для характеристики планетарной магнитной активности.

Для вычисления индекса K_N было отобрано 11 обсерваторий северного полушария, а индекса K_S — 7 обсерваторий южного полушария. Индекс K_m характеризует среднюю планетарную возмущенность.

Для характеристики возмущенности за сутки введен индекс ΣK_p . А. И. Оль для каждого месяца года, начиная с 1884 г., вывел индекс $M' = 10 (\Sigma K_p - 10)$, который получил широкое распространение при гелиоклиматических исследованиях.

A_p-индекс. Для изучения статистических связей между геомагнитной активностью и процессами, протекающими на Земле, необходимо иметь индекс с линейной шкалой, который бы позволил находить значения, осредненные за некоторый период времени. Бартельс для этой цели ввел индексы a_k, A_k, a_p, A_p , имеющие линейную шкалу измерения. Индекс a_k является эквивалентной амплитудой возмущения в трехчасовом интервале на конкретной обсерватории.

Исходной шкалой для определения a_k -индекса является шкала, представленная в табл. 3.1.

Таблица 3.1

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a_k	0	2	7	15	27	48	80	140	240	400

Амплитуды a_k в этой шкале выражены в единицах, составляющих q гамм, где q равно значению нижнего предела a_k для $K=9$ на шкале данной обсерватории, деленному на 250. Например, для обсерватории с геомагнитной широтой $\varphi = 50^\circ$ нижний предел a_k для $K=9$ составляет 500, т. е. $q = 500/250 = 2$ и индексу $K=6$ на такой обсерватории соответствует $a_k = 80 \cdot 2 = 160 \gamma$.

Поскольку нижний предел для каждой обсерватории различается, то таблицы перевода K -индекса в эквивалентные амплитуды будут также различаться.

Индекс a_p вычисляется по данным K_p -индекса и представляет собой изменение наиболее возмущенного магнитного элемента D или H в трехчасовом интервале на среднеширотных станциях, выражаемое в единицах 2γ .

В табл. 3.2 даны соотношения между K_p -индексом и трехчасовой планетарной амплитудой a_p .

Таблица 3.2

K_p	0 ₀	0 ₊	1 ₋	1 ₀	1 ₊	2 ₋	2 ₀	2 ₊	3 ₋	3 ₀	3 ₊	
a_p	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	
K_p	4 ₋	4 ₀	4 ₊	5 ₋	5 ₀	5 ₊	6 ₋	6 ₀	6 ₊	7 ₋	7 ₀	7 ₊
a_p	22	27	32	39	48	56	67	80	94	111	132	154
K_p	8 ₋	8 ₀	8 ₊	9 ₋	9 ₀							
a_p	179	207	236	300	400							

Индекс A_p получается осреднением восьми значений a_p за день и поэтому он является эквивалентной среднесуточной планетарной амплитудой.

AU, AL, AE, AQ-индексы. Предложены Дэвисом и Сугиурой в 1966 г. Они являются количественной мерой магнитной активности в авроральной зоне и отражают усиление токов в ионосфере, протекающих вдоль границы аврорального овала (восточного и западного токов полярного электрожета). Индексы измеряются в гаммах и отражают весь диапазон возмущений магнитного поля Земли. Методика вычисления AU, AL, AE, AQ -индексов основана на осреднении величины отклонений H -составляющей геомагнитного поля от спокойного уровня, т. е. от среднемесячного значения H -составляющей, вычисленного по данным пяти международных спокойных дней. Для вычисления этих индексов используются данные 11 обсерваторий северной зоны полярных сияний.

AU и AL -индексы характеризуют соответственно интенсивность восточного и западного токов полярного электроджета.

AE -индекс определяется как алгебраическая разность AU и AL -индексов, которая представляет собой измерение максимальной амплитуды восточного и западного токов полярного электроджета. Значение $(AU + AL)/2$ — определяет значение AQ -индекса.

D_{st} -индекс. Введен Сугиурой в 1964 г. Индекс характеризует интенсивность симметричного кольцевого тока, типичного для восстановительной фазы магнитной бури. D_{st} -индекс представляет собой среднюю величину возмущения в часовом интервале, вычисленную по данным сети низкоширотных станций, разнесенных по долготе. Он измеряется в гаммах.

При солнечно-атмосферных исследованиях широко используются реперные даты (геомагнитные моменты).

1. Геомагнитно-возмущенные дни по критерию Р. Шапино. Список дат с 1884 по 1970 гг. составлен Р. Шапино. Отбирались дни, в которые международные магнитные характеристические числа C_i превышали, по крайней мере, на 1,0 значение предыдущего дня.

2. Сильные магнитные возмущения по критерию Аллена и Данхэма. Авторы использовали трехчасовые значения a_p за период с 1932 по 1974 гг., чтобы вычислить 24-часовые скользящие средние, аналогичные индексу A_p . Когда значение скользящего среднего, обозначаемого A_p^* , становилось равным или больше 40, возмущение рассматривалось как сильное магнитное возмущение.

3. Реперные даты по критерию Э. Р. Мустеля. Отобраны наиболее сильные и достаточно изолированные геомагнитные бури и притом со сравнительно быстрым ростом геомагнитной возмущенности к максимуму. В качестве некоторого «стандарта сравнения» использовался список первых дней геомагнитно-спокойных периодов, длительность каждого из которых составляет 10 дней. В работе Э. Р. Мустеля, а также в каталоге индексов солнечной и геомагнитной активности приводятся списки периодов с низкой

геомагнитной активностью, спорадических возмущений и рекуррентных возмущений.

4. Даты прохождения через центральный меридиан Солнца (ЦМО) нулевой кэррингтоновской долготы. Для определения начального (вращающегося) меридиана Солнца, от которого велся бы отсчет гелиографической долготы, различных особенностей, видимых на диске Солнца, Каррингтон принял среднее значение угловой скорости, для которой сидерический период вращения Солнца вокруг оси равен 25,38 средних солнечных суток, что соответствует среднему значению синодического периода вращения 27,275 суток. Меридиан Кэррингтона прошел восходящий узел солнечного экватора в средний гринвичский полдень 1 января 1854 г. (эпоха 1854,0). Отсчет оборотов этого меридиана ведется с 9 ноября 1853 г.

Глава 4. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛНЕЧНО-АТМОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ

4.1. Корреляционные связи в гелиогеофизике

Определение вклада внешних факторов в формирование изменчивости метеорологических характеристик сопряжено с большими трудностями как математического, так и технического характера. Назовем некоторые из них.

1. Информация, накопленная при наблюдениях, является статистически неоднородной.

2. Чаще всего выборки фиксированы и содержащаяся в них информация недостаточна для исследования того или иного вопроса.

3. Распределение метеорологических характеристик в ряде случаев не подчиняется нормальному, либо другим законам распределения, что создает определенные трудности при оценке достоверности результатов анализа.

4. Связи между физическими факторами и метеорологическими характеристиками зачастую нелинейны.

5. Наличие корреляции членов метеорологических рядов в пространстве и времени.

6. Наличие пропусков в исходных данных.

7. Отсутствие адекватных методов анализа и оценки реальности результатов.

Из-за указанных выше трудностей зачастую невозможен строгий статистический анализ связей, существующих в природе. Однако, удовлетворяя требованиям статистики, нельзя забывать о проведении физического анализа особенностей и причин установленных связей.

Так, нестабильность солнечно-атмосферных связей, обнаруженная в многочисленных работах, может определяться нарушением причинно-следственных связей под влиянием условий, препятствующих действию причины в определенных случаях. Удовлетворяя требованиям статистики с использованием рядов длительностью приблизительно 40 лет, можно выделить колебания, период которых не превышает 5—6 лет. Удлинение ряда физически не оправдано, так как за больший промежуток времени существенно меняется вековой уровень солнечной активности, параметры системы атмосфера—подстилающая поверхность (площадь ледового покрова, обрабатываемых земель, содержание CO_2 и аэрозолей и т. д.), что с неизбежностью должно привести к трансформации фаз и периодов. Массовый анализ гидрометеорологических рядов для разных районов, сезонов, интервалов времени привел разных авторов к противоречивым выводам о природе колебаний. Так, например, в разных работах утверждалось, что спектры гидрометеорологических характеристик есть и спектры «белого шума»; и спектры «красного шума» и содержат статистически значимые пики в определенной полосе частот, связанные с конкретными физическими причинами.

Имеются два способа выявления причинно-следственных связей:

- 1) по неодновременности реализации причин и следствий;
- 2) по неоднородности связи между причиной и следствием и между следствием и причиной.

Запаздывание какого-либо гидрометеорологического процесса относительно экстремумов солнечной активности может свидетельствовать о наличии причинно-следственной связи. Однако не каждая причина вызывает следствие.

Теория корреляции, а также необходимые методы и приемы исследования корреляционных связей изложены в многочисленных учебниках и руководствах по математической статистике, поэтому здесь имеет смысл остановиться только на некоторых вопросах исследования причинно-следственных связей.

С. Н. Бернштейн для характеристики причинно-следственной связи предложил величину (ρ), которую он назвал коэффициентом связи:

$$\rho = \frac{[AB] [ab] - [Ab] [aB]}{[AB] [ab] + [Ab] [aB]}. \quad (4.1)$$

Здесь квадратные скобки обозначают суммы числа случаев соответственных совпадений событий A и B или их отсутствие (a, b).

Величина ρ обращается в единицу, если $[A\sigma]$ или $[aB]$ равно нулю. Для количественной корреляции может быть применен аналогичный критерий, если за переменное принять число случаев действующих причин и следствий.

Как правило, выявление причинно-следственных связей должно проводиться в два этапа. Первый этап включает установление неслучайности проявления предполагаемого следствия вслед за предполагаемой причиной на качественном или количественном уровне; а второй этап включает раскрытие физического механизма связи.

Многочисленные примеры установления причинно-следственных связей переломов гидрометеорологических процессов в годы солнечных реперов, совпадающих с эпохами понижения и повышения солнечной активности, представлены в работах И. П. Дружинина. Задача формулировалась следующим образом: пусть переломы многолетнего хода гидрометеорологического процесса за n_1 лет, ожидаемые в годы солнечных реперов, наступили X_1 раз и не наступили Y_1 раз. И пусть в другие годы (их количество $n_2 = N - n_1$, где N — общее число лет ряда, обычно уменьшенное на единицу) переломы наступили X_2 раз и не наступили Y_2 раз. Нужно проверить, одинаковы ли вероятности в этих двух сериях. Иными словами нужно проверить гипотезу, что вероятность переломов в обоих случаях одинакова.

В качестве критерия различия вероятностей в этом случае может быть использована статистика

$$\chi_1^2 = \frac{(X_1 n_2 - X_2 n_1)^2 (n_1 + n_2 - 1)}{n_1 n_2 (X_1 + X_2) (Y_1 + Y_2)}. \quad (4.2)$$

Например, для геомагнитного индекса A_p имеем

$$X_1 = 9, Y_1 = 0, n_1 = 9, N = 30,$$

$$n_2 = 30 - 9 = 21, X_2 = 10, Y_2 = 11,$$

$$\chi_1^2 = \frac{(9 \cdot 21 - 10 \cdot 9)^2 (9 + 21 - 1)}{9 \cdot 21 (9 + 10) \cdot (0 + 11)} = 7,2.$$

Он оказался больше однопроцентного уровня значимости, который при одной степени свободы равен 6,63. Следовательно, вероятность того, что вероятности переломов хода индекса в годы солнечных реперов и в другие годы отличаются друг от друга лишь в результате влияния случайных факторов, меньше 1%.

Коэффициент связи (ρ) в последнем случае будет равен

$$\rho = \frac{9 \cdot 11 - 0 \cdot 10}{9 \cdot 11 + 0 \cdot 10} = 1.$$

Рассмотрим связи взаимодействия, которые зачастую встречаются в метеорологии и климатологии. Внешнее проявление связей взаимодействия — одновременность с попеременным управлением то одного, то другого из взаимодействующих факторов.

Примером связи взаимодействия может служить чередование зональной и меридиональной циркуляции в связи с неуравновешенностью радиационных и циркуляционных процессов в разных широтах, а также взаимодействие океана и атмосферы.

Связи сопряженности возникают между разными следствиями общих причин, например, связи между одновременными значениями метеорологических величин на разных станциях. Со сложной сопряженностью и смешанными типами связей может быть связан ряд возможных ошибок.

Ложная корреляция может возникать между рядами независимых величин. Если X, Y, Z — независимые переменные, коэффициенты вариаций которых соответственно V_x, V_y, V_z , то между рядами величин $\frac{X}{Z}$ и $\frac{Y}{Z}$ имеет место корреляция

$$r = \frac{V_z}{V(V_x^2 + V_z^2)(V_y^2 + V_z^2)}. \quad (4.3)$$

Примеры ложной корреляции широко представлены в работах О. А. Дроздова и Т. В. Покровской. Одним из таких примеров ложной корреляции может служить корреляция, возникающая в том случае, если прогноз месячной температуры осуществлять по первой пятидневке. Для большого ряда случайный прогноз такого рода обеспечивается с коэффициентом корреляции, равным $\sqrt{1:6} = 0,41$. В приведенном примере температуру первой пятидневки следует коррелировать со средней из пяти последующих.

Некорректные выводы могут возникнуть, когда непосредственная связь перекрывается непредвиденной опосредованной общей причиной. Возникают недоразумения, когда сопряженность ошибочно трактуется как причинно-следственная связь.

Очень важно определить форму связи, возникающей при корреляции. Лучше всего это сделать, руководствуясь физическими соображениями.

При вычислении ошибок определения коэффициентов корреляции важно учитывать асимметрию распределения величин, особенно при значениях коэффициентов, близких к ± 1 . В этих случаях используются следующие формулы:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}, \quad (4.4)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{n-3}}. \quad (4.5)$$

Необходимо также иметь в виду, что связность рядов может резко увеличить ошибку коэффициента, вычисленного для недостаточно длинного ряда. Прямой учет связности рядов сложен и с физической точки зрения не всегда целесообразен. При вычисле-

ний статистической значимости коэффициентов корреляции рекомендуется вычисление эффективного числа членов ряда по формуле

$$N_{\text{эф}} = \frac{1 - r_1}{1 + r_1} N_{\text{ист}}, \quad (4.6)$$

где $N_{\text{эф}}$ — эффективное число членов ряда; $N_{\text{ист}}$ — истинное число членов ряда; r_1 — коэффициент автокорреляции при сдвиге процессов относительно друг друга на единицу времени.

Однако здесь требуется определенная осторожность. Применяя эту формулу, можно в ряде случаев прийти к выводу об отсутствии статистической связи процессов, физически связанных почти функционально, только потому, что величины, характеризующие причины, и величины, характеризующие следствие, имеют сильную внутрирядную связь.

Например, между годовыми значениями относительных чисел Вольфа и критической частотой f_0 в области F2 за период 1940—1970 гг. для станции Томск коэффициент корреляции $r = 0,9$. Коэффициент автокорреляции $r_1 \approx 0,8$. Легко показать, что связь между относительными числами Вольфа и f_0 статистически незначима:

$$N_{\text{эф}} = \frac{1 - 0,8}{1,8} \cdot 31 = 3,44;$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{эф}} - 3}} \approx 1,51; \quad Z \approx 1,47; \quad \frac{Z}{\sigma_z} < 2.$$

Из физики ионосферы известно, что солнечная активность является основным фактором, определяющим критическую частоту f_0 области F2.

Одной из причин противоречивых результатов по вопросу воздействия внешних факторов на нижнюю атмосферу является пренебрежение в ряде работ статистическими критериями реальности полученных результатов. В этой связи необходимо обратить особое внимание на методические вопросы статистических исследований гелиогеофизических связей. Этот вопрос подробно рассмотрен в одной из работ О. А. Дроздова и Т. В. Покровской

В климатологии широко использовались и используются различные методы сглаживания рядов. Применяются также интегральные кривые, в которых вместо членов исходного ряда берется сумма отклонений от средней за весь предыдущий ряд. Подобный прием превращает прямолинейные участки эволюции ряда в криволинейные, что особенно заметно в случае продолжительного периода линейного роста или падения характеристики. Интегрирование периодических (или циклических) колебаний увеличивает амплитуды подобных колебаний пропорционально длине соответствующего периода, что облегчает выделение низкочастотных колебаний.

Однако этот способ имеет тот существенный недостаток, что влияние случайных факторов на значения членов ряда нарастает пропорционально корню из номера данного члена в ряду. Последнее обстоятельство может быть источником ложных закономерностей. Для случайного исходного ряда коэффициент корреляции между m -ным и n -ным членами интегральной кривой, где $m < n$, будет равен $r_{m,n} = \sqrt{m/n}$. Отсюда следует, что по мере роста m связь между соседними членами быстро стремится к единице. Случайные погрешности могут перекрывать влияние циклических колебаний и создают впечатление наличия сверхдлинных циклов, которых может и не быть.

В интегральной разностной кривой, где суммируются отклонения от N -летней нормы, рост ошибок происходит до $\frac{N}{2}$ пропорционально $n^2 \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N} \right)$, при $n > \frac{N}{2}$ преобладает компенсация сумм отклонений от нормы.

В исходном бессвязном ряду дисперсия членов интегрально-разностного ряда будет наибольшей в середине изучаемого ряда и накопление случайных ошибок может, таким образом, увеличивать амплитуду случайных колебаний в этой части ряда. Метод интегрально-разностных кривых может быть рекомендован к использованию в том случае, когда важны кумулятивные свойства ряда, например, при анализе осадков и речного стока с целью оценки накопления воды в водохранилище.

Другой, еще более распространенный метод сглаживания, — скользящее осреднение, как указывает О. А. Дроздов, имеет тот недостаток, что он растягивает и тем самым сглаживает резкие скачки в ряду и может создать представление о циклах с длительностью, равной тройному периоду осреднения, совершенно аналогично тому, как для несглаженного ряда по числу экстремумов ($2/3 n$) можно ошибочно прийти к выводу о наличии трехлетнего периода.

В таких случаях необходимо использовать критерии систематичности ряда, например, критерии Б. П. Вейнберга, М. А. Омшанского и О. А. Дроздова. Цель использования таких критериев — отличить колебания в анализируемых рядах от колебаний, имеющих место в случайных бессвязных рядах. В последнем случае число повышений и число понижений приблизительно равно, а число экстремумов составляет $2/3$ от числа членов ряда. Критерий Б. П. Вейнберга позволяет обнаружить систематическое изменение уровня ряда, а критерий М. А. Омшанского позволяет оценить длительность характерных циклов. Вероятная ошибка (f) числа повышений или понижений в сглаженном бессвязном случайном ряду вычисляется по формуле

$$f = 0,195 \sqrt{n + m},$$

где m — период осреднения; n — число членов ряда.

Поскольку изменчивость разностей повышений и понижений в ряду вдвое больше изменчивости числа повышений, то вероятная ошибка $f_{m(+)-n(-)}$ числа изменчивости разностей повышений и понижений равна

$$f_{m(+)-n(-)} = 0,390 \sqrt{n+m}.$$

В отличие от обычного ряда, где вероятность экстремума равна $2/3$, в сглаженном при $m > 3$, когда соседние разности в пределах трех членов будут независимы (связи возникают между разностями, разделенными m -членами), вероятность экстремума равна $1/2$. Полагая, что коэффициент корреляции между сменой повышения понижением на обратный процесс есть произведение $\left(-\frac{1}{3}\right)\left(-\frac{1}{3}\right) = \frac{1}{9}$, для дисперсии числа экстремумов получаем:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{экстр.}}^2 &= \frac{1}{4} \left[(n-m-1) + \frac{2}{9} (n-2m-1) \right] = \\ &= \frac{1}{36} [11(n-m-1) - 2m], \end{aligned} \quad (4.7)$$

а вероятная ошибка числа экстремумов

$$f_{\text{экстр.}} = 0,1124 \sqrt{11(n-m-1) - 2m}. \quad (4.8)$$

Количественные особенности ряда, в частности учет повышения и понижения его уровня, были учтены О. А. Дроздовым при вычислении нового критерия. В его основу были положены идеи последовательного анализа, разработанного Вальдом. Критерий вычисляется следующим образом. Составляется ряд последовательных разностей соседних равноудаленных по времени членов ряда $X_1, X_2, X_3 \dots X_N$:

$$d_1 = X_2 - X_1, d_2 = X_3 - X_2, \dots, d_{N-1} = X_N - X_{N-1}.$$

Легко видеть, что

$$D_k = \sum_{i=1}^k d_i = X_{k+1} - X_1, \quad (4.9)$$

т. е. при суммировании последовательных разностей вновь получается разностный ряд, но с интервалом в k членов.

Для бессвязного ряда

$$\sigma_{D_k}^2 = 2\sigma_X^2. \quad (4.10)$$

Как видно, дисперсия D_k от k не зависит и ее можно обозначить через σ_k . В то же самое время D_k выражает непосредственное изменение уровня ряда от первого члена к члену с номером

$(k + 1)$. Имеет смысл сравнивать D_k с σ_D или оценивать ряд отношений $\frac{D_k}{\sigma_D}$ для установления значимости систематических тенденций в ряду по сравнению с естественной изменчивостью. При наличии систематических тенденций эволюции уровня ряд $\frac{D_k}{\sigma_D}$ ($k = 1, 2, \dots, N$) в конце концов выйдет за пределы нескольких единиц, что будет характеризовать надежность установления тенденции.

Чтобы увеличить чувствительность критерия, можно брать не разности последовательных членов рядов, а средние из последовательных n -летий того же ряда

$$d_k^{(n)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=k+1}^{k+n} X_i - \sum_{i=k}^{k+n-1} X_i \right). \quad (4.11)$$

Суммирование $d_k^{(n)}$ дает величины

$$D_k^{(n)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=k+1}^{k+n} X_i - \sum_{i=1}^n X_i \right). \quad (4.12)$$

Для случайного бессвязного ряда

$$\sigma_D^2(n) = 2 \frac{\sigma_X^2}{n}. \quad (4.13)$$

Сравнивая ряд $D_k^{(n)}$ с $\sigma_D^{(n)}$, можно более точно оценить существенность отличия изменений в ряду X_i от колебаний в случайном бессвязном ряду.

t-критерий Стьюдента. Используется для выявления различий между двумя средними, поскольку зачастую нас может интересовать не столько общее поведение временного ряда, сколько сравнение средних значений ряда за два различных периода наблюдений. Если две рассматриваемые средние обозначить через \bar{X}_1 и \bar{X}_2 соответственно, а соответствующее число значений, из которых вычисляется каждое среднее значение, обозначить через N_1 и N_2 , то статистика критерия вычисляется по формуле

$$t_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left[\frac{N_1 \sigma_1^2 + N_2 \sigma_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right) \right]^{1/2}}. \quad (4.14)$$

Здесь предполагаемая разность между \bar{X}_1 и \bar{X}_2 , согласно «нулевой» гипотезе при наличии случайности принимается равной нулю. Величины σ_1^2 и σ_2^2 — соответственно выборочные значения дисперсий X_i в двух периодах наблюдений. Для «нулевой» гипотезы случайности распределение t_d следует t -распределе-

нию Стьюдента для $(N_1 + N_2 - 2)$ степеней свободы. Эта величина приводится во многих статистических справочниках.

Иногда полезно исследовать устойчивость длинного ряда наблюдений, сравнивая общую среднюю за весь период со средними определенных частей этого периода. В этом случае используется

критерий Крамера. Пусть \bar{X} и σ определяются соответственно как среднее и среднее квадратическое отклонение всех значений ряда.

Пусть \bar{X}_k — среднее значение для подпериода из n значений. Определив $\tau_k = \frac{(\bar{X}_k - \bar{X})}{\sigma}$, вычисляем

$$t_k = \left[\frac{n(N-2)}{N-n(1+\tau_k^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \tau_k. \quad (4.15)$$

Здесь t_k подчиняется t -распределению Стьюдента, имеющему $N - 2$ степеней свободы, поэтому статистическую значимость можно проверить таким же способом, как и статистику t_d .

4.2. Анализ временных рядов

Гармонический анализ. Любую функцию можно представить бесконечным рядом синусоидальных и косинусоидальных функций (гармоник). Такой ряд называется рядом Фурье. Первая гармоника имеет период, равный длине всего исследуемого периода, вторая — половине, а третья — $1/3$ этого периода. Если число наблюдений равно N , то число гармоник — $\frac{N}{2}$. В результате полу-

чается математическое представление, эквивалентное периодической функции. Различные гармоники можно рассматривать как независимые объекты и объяснять эти гармоники разными физическими причинами. Однако не каждая гармоника в отдельности имеет отчетливый физический смысл.

Особое распространение гармонический анализ получил в теории приливов, где каждая гармоника вызывается определенной вынуждающей силой. Следует отметить, что возможность разложения в ряд Фурье не является доказательством реальности полученных периодов и экстраполирование этого разложения за пределы рассматриваемого ряда недопустимо, так как в большинстве случаев полученные периоды являются кратными взятого промежутка и никакого реального смысла не имеют.

Периодограммный анализ. Этот метод позволяет выделить реальные периоды. Откладывая по оси абсцисс длину волны, а по оси ординат соответствующую ей интенсивность, получим кривую, которую Шустер назвал периодограммой процесса.

Суть метода состоит в следующем.

Исследуемую функцию можно представить в виде

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + \dots + \theta(t), \quad (4.16)$$

где

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau_1}; \quad \omega_2 = \frac{2\pi}{\tau_2} \dots \omega_n = \frac{2\pi}{\tau_n}$$

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ — действительные периоды, A_1, A_2, \dots, A_n — действительные амплитуды; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ — соответствующие фазы; $\theta(t)$ — некоторая неизвестная функция, представляющая собой вклад случайных явлений.

Чтобы найти амплитуду периода, равного некоторой величине τ , делим весь ряд на отрезки по τ значений и для каждого из столбцов вычисляем среднее значение $|\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_\tau$.

$$\begin{array}{cccccccc} Y_1 & Y_2 & \dots & Y_\tau \\ Y_{\tau+1} & Y_{\tau+2} & \dots & Y_{2\tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \bar{Y}_1 & \bar{Y}_2 & \dots & \bar{Y}_\tau \end{array}$$

Средние:

Если в ряду имеется период τ , то при группировке по τ членов, члены каждого вертикального столбца имеют одну и ту же фазу, а следовательно, в ряду $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_\tau$ сохраняется период τ .

По ряду $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_\tau$ находим значения коэффициентов первых членов ряда Фурье

$$\frac{\tau a_1}{2} = \sum_{t=1}^{t=\tau} \bar{Y}_t \sin \omega t; \quad \frac{\tau b_1}{2} = \sum_{t=1}^{t=\tau} \bar{Y}_t \cos \omega t, \quad (4.17)$$

где \bar{Y}_t — последовательно принимает значение $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_\tau$.

Амплитуда и фаза вычисляется соответственно по формулам

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{a_1}{b_1}. \quad (4.18)$$

Если период действительно существует, то при удлинении ряда наблюдений амплитуда его остается постоянной, а если она случайна, то при удлинении ряда уменьшается в \sqrt{N} раз.

Существует критерий, который позволяет отделить фиктивные периоды от реальных, основанный на вычислении вероятности того, что ордината какого-либо периода периодограммы ряда превзойдет среднее значение периодограммы в k раз. При построении периодограммы случайных величин вероятность того, что амплитуда в два раза превысит среднее значение периодограммы, составляет 4,3%. Этот критерий можно использовать только для эмпирически независимых рядов. В случае зависимых рядов оценки достоверности будут меньшими.

Энергетический спектр и его применение. Основывается на предпосылке, что временные ряды не обязательно состоят из конечного числа колебаний с дискретной длиной волны (что является основой при применении классического гармонического анализа), а из бесконечного числа малых колебаний, образующих непрерывное распределение длин волн. Поэтому спектр временных рядов есть непрерывное распределение дисперсии всех возможных длин волн — каждая произвольно близка к следующей — от бесконечной длины волны (линейный тренд) до наименьшей, которая может быть представлена в разложении любой схемой гармонического анализа и равна удвоенному интервалу между последовательными наблюдениями. Способы вычисления энергетического спектра различны, но в большинстве случаев основываясь на методе Тьюки и Блекмана.

Рассмотрим суть метода.

Пусть даны ряд из N значений. Вычисляются сериальные коэффициенты корреляций (ковариаций рядов) для сдвига от 0 до m единиц времени, где $m < N$. Далее подсчитывается косинус-преобразование таким образом, каким находится преобразование Фурье непрерывной переменной. Преобразование косинуса дает $m + 1$ предварительных оценок энергетического спектра. Предварительные оценки затем сглаживаются трехчленным взвешенным скользящим средним с весами равными $1/4, 1/2, 1/4$. Эта операция осреднения необходима для получения последовательной оценки конечного спектра, исходя из $m + 1$ дискретных оценок. Такая подготовительная процедура проводится для того, чтобы сделать кривую гладкой, не нарушая доверительного предела, соответствующего индивидуальным оценкам.

Математическое описание энергетического спектра. Имея N членов ряда X_i , вычислим ковариации рядов C_τ для всех сдвигов от $\tau = 0$ до $\tau = m$ по стандартной формуле

$$C_\tau = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} (X_i - \bar{X})(X_{i+\tau} - \bar{X}), \quad (4.19)$$

где \bar{X} — среднее значение всех X_i в ряду.

Предварительные спектральные оценки S_k можно получить прямо из этих величин C_τ по уравнениям

$$\begin{aligned} \hat{S}_0 &= \frac{1}{m} (C_0 + C_m) + \frac{1}{m} \sum_{\tau=1}^{m-1} C_\tau, \\ \hat{S}_k &= \frac{C_0}{m} + \frac{2}{m} \sum_{\tau=1}^{m-1} C_\tau \cos \frac{\pi k \tau}{m} + \frac{1}{m} C_m (-1)^k, \\ \hat{S}_m &= \frac{1}{m} [C_0 + (-1)^m C_m] + \frac{1}{m} \sum_{\tau=1}^{m-1} (-1)^\tau C_\tau, \end{aligned} \quad (4.20)$$

где $k = 1, 2, \dots, m - 1$.

Первое из этих уравнений используется для вычисления нулевой оценки спектра, которая соответствует фактически бесконечной длине волны — тренду; третье уравнение используется для вычисления последней оценки спектра, которая соответствует наименьшей длине волны спектра. Все промежуточные спектральные оценки вычисляются по среднему уравнению, полагая аргументами косинуса положительные целые значения $k = 1, 2 \dots m - 1$.

Окончательные оценки S_k спектра вычисляются после сглаживания «предварительных» оценок с трехчленным взвешенным осреднением. Формулы сглаживания таковы:

$$S_0 = \frac{1}{2} (\hat{S}_0 + \hat{S}_1),$$

$$S_k = \frac{1}{4} (\hat{S}_{k-1} + 2\hat{S}_k + \hat{S}_{k+1}), \quad (4.21)$$

$$S_m = \frac{1}{2} (\hat{S}_{m-1} + \hat{S}_m).$$

Свойства энергетического спектра. Наибольшее достоинство спектрального анализа Тьюки—Блекмана в том, что максимальный сдвиг m при вычислении сериальных коэффициентов корреляции ряда, используемых при расчете спектра, может быть принят независимым от общей длины ряда N . Если m выбрано очень малым, то разложение будет грубым, однако оценки будут очень устойчивыми в статистическом смысле.

Согласно Тьюки каждая оценка спектра распределяется как χ^2 , поделенное на число степеней свободы, вычисляемое по формуле $(2N - \frac{m}{2}) : m$. Этот факт позволяет легко определить доверительный интервал для каждой оценки подсчитанного энергетического спектра с помощью таблицы значений χ^2 . Таким образом, можно заранее выбрать значение m , которое в каждом индивидуальном случае дает оптимальное решение для желательного разложения спектра и статистической устойчивости индивидуальных оценок спектра, полученных при анализе.

В спектре различные виды неслучайностей могут быть обнаружены различными способами. Например, спектр чисел случайного ряда стремится быть по форме прямоугольным, т. е. все оценки спектра приближаются к одной и той же величине. Эта форма спектра часто называется «белым шумом» по аналогии с видимым светом, который рассматривается как белый.

Если во временных рядах содержится синусоида, то спектр ряда будет иметь относительно резкий пик на соответствующей длине волны. Если в ряду имеется периодичность несинусоидальной формы, то в спектре будут присутствовать не только вершина, соответствующая основной длине волны, но и другие вершины на

длинах волн, соответствующих первой или более высшим гармоникам основной длины волны. Если ряд содержит квазипериодичность (или ритм), то на спектре она будет представлена относительно широким горбом. Наконец, если временной ряд содержит трендовую составляющую, т. е. если на каждое значение ряда влияет только предшествующее значение, то спектр искривляется на всех длинах волн. В частности амплитуда спектра будет уменьшаться от длинной к короткой волне и спектр будет схож со спектром «красного шума».

Энергетический спектр имеет ряд недостатков.

1. Если в ряду имеются периодичности, то спектр не обязательно представит их так очевидно, как это может классический гармонический анализ.

2. Спектр теряет информацию о фазе колебаний, содержащихся в исходных рядах.

3. На спектр может оказать влияние утечка информации на других длинах волн «через щели спектрального окна». Это будет иметь место при наличии очень сильной периодичности, например, годового хода температуры. В таком случае годовую компоненту необходимо выделить и анализировать, например, классическим гармоническим анализом.

4. На спектре может появиться фиктивная волна, поскольку мгновенные наблюдения, сделанные через постоянные интервалы времени могут имитировать длинную волну. Этот недостаток может быть легко исправлен посредством замены мгновенных наблюдений средними за некоторый отрезок времени.

Критерии статистической значимости, применяемые к энергетическому спектру. Если сериальный коэффициент корреляции ряда при сдвиге на единицу (r_1) не отличается от нуля (в смысле статистической значимости), то ряд должен быть рассмотрен как свободный от постоянной составляющей. В этом случае соответствующий нулевой континуум есть «белый шум».

Если коэффициент корреляции при сдвиге на один или два шага больше, чем коэффициент, аппроксимированный выражениями: $r_2 \approx r_1^2$; $r_3 \approx r_1^3$ и т. д., то нулевой континуум предполагается соответствующим континууму марковского «красного шума», форма которого зависит от значения коэффициента корреляции при сдвиге на один шаг для совокупности (ρ) .

Континуум может быть получен следующим методом аппроксимации. Предполагается, что выборочный коэффициент r_1 при сдвиге на один шаг — несмещенная оценка ρ . Тогда решается следующее уравнение для различного числа выборочных гармоник при изменении k от 0 до m :

$$\hat{S}_k = \bar{S} \left[\frac{1 - r_1^2}{1 + r_1^2 - 2r_1 \cos \frac{\pi k}{m}} \right]. \quad (4.22)$$

В этом уравнении \bar{S} — среднее из $m + 1$ спектральных предварительных оценок \hat{S}_k в вычисляемом спектре. Полученные значения \bar{S}_k затем наносятся на график спектра. Сглаженная кривая их значений представляет собой нулевой континуум.

При вышеупомянутом процессе установления нулевого континуума делалось допущение, что ряд содержит некоторую марковскую составляющую и значение ρ в выборке — лучшая мера этой компоненты.

Главная задача состоит в том, чтобы выявить неслучайности иного вида. Для этого необходимо сравнить значение каждой спектральной оценки S_k с локальным значением нулевого континуума. Если ни одна из спектральных оценок не отклоняется на величину статистической значимости от континуума, то действительно континуум хорошо аппроксимирует спектр совокупного ряда. Если обнаруживается, что одна или более спектральных оценок отклоняется значительно от континуума, то континуум не является верной аппроксимацией спектра ряда. В таком случае необходимо или изменить форму континуума, чтобы она была более удовлетворительной, или, что тоже самое, установить величину расхождения и диапазон обнаруженных волн.

Статистика, связанная с каждой спектральной оценкой, на основе которой может быть определена статистическая значимость отклонения этой оценки от нулевого континуума, есть отношение величины спектральной оценки к локальной величине континуума. Это отношение есть величина, которую Тьюки обнаружил распределенной как χ^2 , поделенное на степень свободы.

Степень свободы ν каждой оценки спектра, который базируется на фиксированной длине ряда N и на максимальном сдвиге m единиц времени, определяется по формуле

$$\nu = \frac{2N - \frac{m}{2}}{m} \quad (4.23)$$

Отношение такой выбранной спектральной оценки S_k к его локальному значению континуума затем сравнивается с критическими уровнями процентных точек χ^2/ν -распределения для соответствующего значения ν . На практике критические уровни χ^2/ν -распределения для произвольного ν можно получить из работы Хальда.

Для нулевого континуума 95-процентный доверительный предел задается вторым континуумом, значение которого для любой длины волны в спектре равно определенному фиксированному кратному значению нулевого континуума на этой длине волны. Подобным образом 5-процентный доверительный предел для нулевого континуума задается третьим континуумом. Если какая-либо оценка спектра лежит выше 95 и 5% предела, то можно говорить о наличии статистически значимого пика на спектре.

В качестве примера рассмотрим результаты применения спектрального анализа к временному ряду, состоящему из среднегодовых значений чисел Вольфа W .

Из рис. 4.1 видно, что кривая числа солнечных пятен, построенная за большой промежуток времени, обнаруживает несколько различных периодичностей. Спектральный анализ средних годовых значений W за 1700—1960 гг., выполненный Митчелом, ясно показал преобладание цикла Швабе—Вольфа, хотя имеются дополнительные пики, приходящиеся на периоды 5,7; 8,4 и 90 лет. Этот 90-летний период лежит в пределах 80—100-летнего цикла, впервые отмеченного Глайсбергом. По данным за XX в. средняя длина цикла Швабе—Вольфа составляет $10,6 \pm 0,3$ года. Недавний анализ средних годовых за 1884—1972 гг., проведенный Радоски при помощи метода максимальной энтропии, примененного для улучшения спектрального разрешения, выявил, что 11-летний пик представляет собой триплет: 12,9, 10,9 и 9,5 года. Спектр Радоски имеет также пики на периодах 5,3 и 129 лет. Куртильо показал, что появившиеся триплета и периода большой длины может объясняться ограничениями, свойственными методу максимальной энтропии, т. е. эти периоды могут быть нереальными.

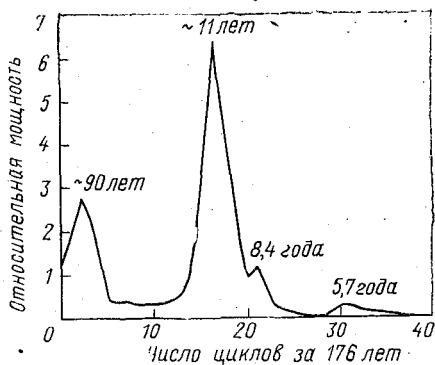


Рис. 4.1. Кривая спектральной мощности среднегодовых значений чисел Вольфа за 1700—1966 гг.

Коген и Линтц посредством применения метода максимальной энтропии показали изменения спектра числа солнечных пятен, обусловленных эффектом выборки. Опустив наименее надежные ранние значения чисел Вольфа, они использовали 12-месячные сглаженные средние за 1844—1971 гг. и нашли четыре спектральных пика: 11,0; 10,1; 9,7 и 8,3 года. Наконец, по всем значениям за 1750—1971 гг. был получен спектр с пиками на 89,6; 11,2; 9,9 и 8,1 года. Таким образом, пользуясь различными выборками из одной и той же совокупности данных, мы находим, что положения спектральных пиков смещаются. Тем не менее основные особенности в различных спектрах в общем сходны.

Итак, если принять, что расхождение результатов различных анализов связаны с эффектом выборки и ошибками, привнесенными самими методами спектрального анализа, то можно прийти к выводу, что главные периоды в относительных числах солнечных пятен составляют 9,7; 11,2; 80—100; 160—180 лет. В литературе можно встретить указание на наличие 2, 3, 4, 5, 8, 30—35, 40—50,

400—600-летних циклов в солнечной активности. Однако их статистическая достоверность вызывает сомнение.

Глава 5. ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

5.1. Влияние солнечной активности на ионосферу

Ионосфера простирается от 60 до 600 км. При переходе от нижней границы к верхней заметно изменяется концентрация нейтральных частиц n , а также состав и температура атмосферы. Так, если внизу преобладают молекулярные составляющие N_2 и O_2 , то на верхней границе рассматриваемой области атмосфера в основном состоит из атомных составляющих (кислорода, азота, гелия и водорода). Определяющими факторами, от которых зависят вариации ионосферы, являются:

- 1) момент наблюдений (час дня, сезон, фаза солнечного цикла);
- 2) место (высота, широта места);
- 3) ионизирующие и нагревающие агенты (коротковолновое излучение Солнца, корпускулярные потоки и космические лучи);
- 4) физико-химические процессы (теплопроводность, диффузия, фотоионизация, диссоциация, рекомбинация, перенос массы, ускользание частиц и т. д.).

Проблема описания изменений в верхней атмосфере отличается большой сложностью, поскольку действие многочисленных факторов перекрываются. Кроме того, необходимо учитывать взаимодействие нижней атмосферы с ионосферой и ионосферы с протоносферой.

Чтобы лучше понять причины изменения параметров верхней атмосферы, строятся модели, где учитывается в той или иной мере влияние указанных факторов. С помощью таких моделей удастся описать причины изменения верхней атмосферы.

Рассмотрим кратко основные процессы. Обычно в теории образования ионосферы пользуются так называемым уравнением непрерывности или баланса, которое описывает механизм вариаций ионизированной составляющей при совместном действии трех основных процессов: образования ионов и электронов, их переноса и рекомбинации. Если V_i — суммарная скорость переноса, то изменение концентрации за счет этого процесса равно дивергенции от потока $n_i V_i$.

Изменение концентрации ионов во времени можно описать уравнением

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = q_i - L_i - \operatorname{div} (n_i V_i). \quad (5.1)$$

Здесь q_i и L_i — соответственно скорости процессов образования и рекомбинации ионов.

Обычно уравнения вида (5.1) записывают для каждой составляющей и используют также условия электронейтральности плазмы $n_e = \sum n_i$.

Разные области ионосферы формируются под действием различных участков спектра солнечного коротковолнового излучения и имеют разный ионный состав. Различны также механизмы образования. В области E и $F1$ можно пренебречь процессами переноса по сравнению с двумя другими, а характерные времена процессов рекомбинации для основных ионов NO^+ и O_2^+ оказываются столь малыми, что для обычных условий $\frac{\partial n_i}{\partial t} = 0$. В этом случае рав-

новесные концентрации определяются условием фотохимического равновесия $q_i = L_i$. Во внешней ионосфере, наоборот, доминирует перенос.

Изменение концентрации в области максимума слоя $F2$ происходит под действием всех трех указанных процессов.

Рассмотрим процессы ионизации и рекомбинации. Днем основным источником ионообразования служит коротковолновое излучение. В ночное время в области E оказывается существенной ионизация за счет корпускулярного и рассеянного ультрафиолетового излучения. При ионизации нейтральных атмосферных составляющих образуются первичные ионы O^+ , O_2^+ и N_2^+ . В результате ионно-молекулярных реакций они превращаются в конечном счете в ионы NO^+ , которые уничтожаются по реакции диссоциативной рекомбинации. Часть первичных молекулярных ионов O_2^+ и N_2^+ уничтожаются непосредственно, вступая в реакции диссоциативной рекомбинации.

Первичные ионы образуются под действием излучения с длиной волны $\lambda < 103,76$ нм. Значения λ , соответствующие порогам ионизации для основных нейтральных составляющих атмосферы, представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Составляющая	O_2	N_2	O	N	NO
λ_i , нм	102,7	79,6	91,2	85,2	134,0

В нижней ионосфере оказывается существенным процесс ионизации излучением в линии Лайман — α ($\lambda = 121,6$ нм) такой малой атмосферной составляющей как окись азота NO.

Излучение с интенсивностью I_λ при прохождении слоя атмосферы dh с концентрацией частиц n см $^{-3}$ ослабляется на величину

$$dI_\lambda = - \sum_j \sigma_{dj\lambda} I_\lambda n_j dh = - I_\lambda d\tau_\lambda, \quad (5.2)$$

где τ_λ — оптическая толщина атмосферы на высоте h ; $\sigma_{dj\lambda}$ — сечение поглощения.

Для описания различных условий освещения Солнцем верхней атмосферы уравнение (5.2) записывается в виде

$$dI_\lambda = - I_\lambda \text{Ch}(\chi) d\tau, \quad (5.3)$$

где безразмерная величина $\text{Ch}(\chi)$ учитывает изменение толщи атмосферы при изменении зенитного угла Солнца χ и известна как функция Чепмена.

Для значений $\chi \leq 70^\circ$ функция Чепмена примерно совпадает с $\sec \chi$.

Скорость образования ионов j сорта в 1 см $^{-3}$ за единицу времени под действием ионизирующего излучения с длиной волны λ определяется как

$$q_{j\lambda} = \sigma_{ij\lambda} \cdot I_\lambda n_j, \quad (5.4)$$

где $\sigma_{ij\lambda}$ — сечение ионизации.

Подставляя в (5.4) I_λ , полученные путем интегрирования (5.3), скорость ионообразования для монохроматического излучения с длиной волны λ равна

$$q_{j\lambda}(h) = n_j \sigma_{ij\lambda} I_{0\lambda} e^{-\tau_\lambda},$$

где $I_{0\lambda}$ — интенсивность излучения с длиной волны λ на уровне верхней границы атмосферы.

При учете всего спектра от границы ионизации λ_i до рентгеновского излучения с длиной волны λ_r , а также учитывая многокомпонентность нейтральной атмосферы, окончательное выражение для скорости образования ионов j -го сорта:

$$q_j(h) = n_j \sum_{\lambda_i}^{\lambda_r} I_{0\lambda} \sigma_{ij\lambda} \exp \left[- \sum_j \sigma_{aj\lambda} \int_h^\infty \text{Ch}(\chi) n_j dh \right]. \quad (5.5)$$

На рис. 5.1 для некоторых зенитных углов Солнца приведены результаты расчетов суммарной скорости ионообразования ($q(\text{O}^+) + q(\text{O}_2^+) + q(\text{N}_2^+)$) для высокого ($F_{10,7} = 200$) и низкого ($F_{10,7} = 80$) уровней солнечной активности. В этих расчетах учтен ряд химических реакций, определяющих взаимодействие первичных ионов O^+ , N_2^+ и O_2^+ с нейтральными составляющими. Найдены с определенной погрешностью значения констант γ , которые опре-

деляют скорость протекания реакции в 1 см^{-3} за 1 с , т. е. интенсивность преобразования первичных ионов, вступивших в реакцию, равную интенсивности образования ионов, получившихся в результате реакции.

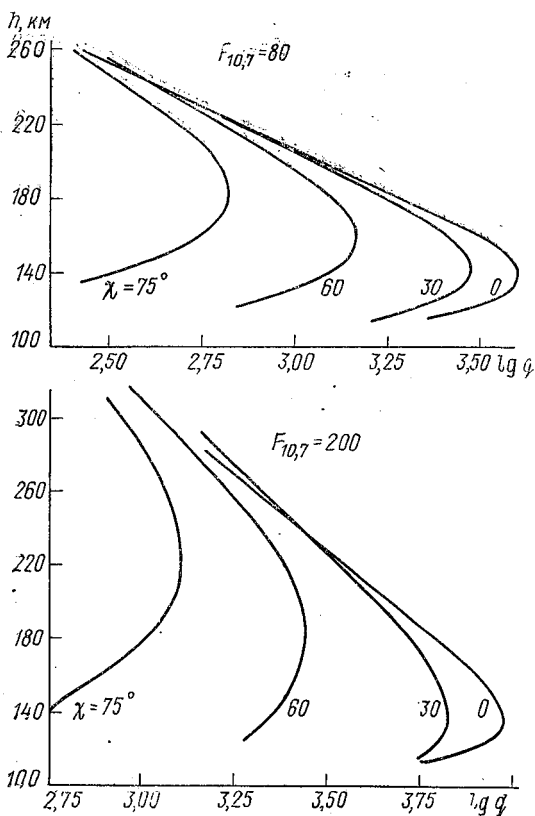


Рис. 5.1. Суммарная скорость ионообразования в зависимости от высоты и зенитного угла для периода равноденствия при разных уровнях солнечной активности

Заряженные частицы, образовавшиеся в некотором объеме в результате ионизации, могут либо тут же рекомбинировать, либо за счет динамических процессов переместиться из области их образования в другие области ионосферы. На высотах, где расположены области ионосферы E и $F1$, процессы переноса оказываются несущественными. Выше 150 км характерные времена переноса становятся сравнимыми с характерными временами рекомбинации и равновесные концентрации ионов уже не определяются локальными процессами, а приходится учитывать перенос плазмы из области образования в область, где происходит ее рекомбинация.

Здесь речь идет в основном о переносах по вертикали. Перенос плазмы в F_2 -области происходит в поле силы тяжести за счет процесса диффузии, а также под действием термосферных ветров и электрических полей.

В одномерном случае вертикальная составляющая скорости движения основного в области F_2 иона O^+ определяется так:

$$V_z = -D_{in} \sin^2 I \left[\frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{T_e}{n_e T_i} \frac{\partial n_e}{\partial z} + \frac{m_i g}{k T_i} + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial z} \right] + \frac{E_y}{B} \cos I + V_{nx} \sin I \cos I \cos D - V_{ny} \sin I \cos I \sin D. \quad (5.6)$$

Оси координат направлены: x — на юг, y — на восток и z — вверх; I и D — углы наклона и склонения магнитной силовой линии; g — ускорение свободного падения; m_i — масса иона O^+ ; k — постоянная Больцмана; T_e , T_i и T_n — температуры плазмы и нейтрального газа соответственно; D_{in} — коэффициент диффузии.

Вторым по важности фактором, после диффузии, являются термосферные ветры. Увлекая при своем движении плазму, которая в силу замагниченности перемещается вдоль магнитных силовых линий, термосферные ветры могут влиять на распределение электронной концентрации. Причиной возникновения термосферных ветров является нагрев и расширение атмосферы. Кроме того, на скорость термосферного ветра оказывает влияние вязкость, сила Корнелиса и ионное торможение. За счет ионного торможения появляется составляющая ветра, перпендикулярная изобарам и сравнимая по величине с геострофической составляющей. При концентрациях заряженных частиц больших $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ эффект ионного торможения становится определяющим и ветер будет направлен перпендикулярно изобарам.

Планетарная циркуляция и наблюдаемые скорости ветров испытывают значительные вариации при изменениях солнечной и геомагнитной активности, а также в зависимости от сезона. Так, летом из-за разогрева высокоширотных областей ветер направлен к экватору. В результате разогрева высокоширотной ионосферы при геомагнитных бурях ветер направлен также к экватору. В условиях зимы и равноденственных периодов в средних широтах ветер в основном направлен к полюсу, а ночью к экватору.

Рассмотрим более подробно вариации в ионосфере, связанные с солнечной и геомагнитной активностью, а также с космическими лучами.

Наиболее активные процессы на Солнце связаны с большими солнечными вспышками. Во время вспышек происходит усиление рентгеновского, ультрафиолетового, корпускулярного излучения и космических лучей. Вспышки, сопровождающиеся излучением космических лучей, называются протонными. Во время этих вспышек излучение проникает до нижней атмосферы и регистрируется на высоте около 30 км и даже на земной поверхности.

В области D под влиянием рентгеновского излучения, усиливающегося во время солнечных вспышек, возникают внезапные ионосферные возмущения (Sudden ionospheric disturbance— SID). Наиболее значительное увеличение ионизации во время SID происходит на высотах 60—70 км. Наряду с жестким рентгеновским излучением наблюдается усиление мягкого рентгеновского излучения, которое вызывает повышение ионизации в областях E и F .

Увеличение ионизации в области D и нижней части E вызывает поглощение космических шумов, а также увеличение поглощения коротких радиоволн. Последнее происходит внезапно и продолжается от нескольких минут до 1—3 ч.

Максимальное поглощение происходит в подсолнечной точке. В этой связи наибольшая вероятность появления поглощения приходится на лето. Большие вспышки, кроме того, сопровождаются малым и непродолжительным изменением геомагнитного поля («кроше»). Однако далеко не все большие вспышки вызывают SID . В то же самое время не все SID связаны с большими вспышками. Это свидетельствует о том, что однозначные связи между вспышками и SID отсутствуют.

С вторжением солнечных космических лучей в нижнюю ионосферу происходит аномальное поглощение радиоволн в полярной шапке (ППШ). Увеличение ионизации во время ППШ происходит на высотах 50—80 км. В большинстве случаев ППШ охватывает всю полярную шапку—от полюса до 60° геомагнитной широты. ППШ продолжается в среднем 3—4 суток. По данным арктических линий связи во время ППШ связь нарушается полностью в 47% случаев.

Другим типом аномального поглощения является авроральное поглощение, возникающее в результате повышения ионизации на высоте 60—80 км, вызываемого протонами и электронами, внедряющимися в нижнюю атмосферу. Области аномального поглощения могут иметь большую протяженность вдоль геомагнитной параллели, иногда до 160° по долготе, но эти области неоднородны по аномальности поглощения радиоволн. Ширина зоны аврорального поглощения зависит от времени суток, сезона и геомагнитной активности.

Возмущения в области F_2 охватывают всю Землю. Во время этих возмущений происходит понижение или повышение критических частот (f_oF_2), изменение электронной концентрации и увеличение высот области F_2 .

Как правило, изменение электронной концентрации в средних и высоких широтах противоположны изменению концентрации в низких широтах. Активность ионосферных возмущений, как и магнитных, на два года запаздывает относительно чисел Вольфа и имеет тенденцию к 27-дневной повторяемости. Возмущения в области F приводят к нарушению радиосвязи в том случае, если сопровождаются большими магнитными возмущениями.

Вариации параметров верхней атмосферы при изменении активности Солнца связаны в основном с зависимостью температуры T_{∞} от уровня солнечной активности. Изменения T_{∞} связаны с изменением индекса $F_{10,7}$. Изменение $F_{10,7}$ почти линейно связано с площадью солнечных пятен S_n . Однако для лет с высокой солнечной активностью при одном и том же значении S_n значения $F_{10,7}$ выше, чем для лет с низкой активностью. Для устранения систематического хода в зависимости T_{∞} от $F_{10,7}$ потребовалось введение параметра \bar{F} : среднего уровня солнечной активности за несколько солнечных 27-дневных оборотов, что позволило более точно рассчитать значение T_{∞} для конкретных условий на Солнце. При усреднения F за шесть оборотов Солнца зависимость можно представить так:

$$T_{\infty} = 350,9 + 5,163\bar{F} + 1,954(F - \bar{F}) - 0,00492\bar{F}^2 - 0,0783(F - \bar{F})^2. \quad (5.7)$$

В общем виде для различных моделей атмосферы последнюю формулу можно записать

$$T_{\infty} = \text{const} + a(F - \bar{F}) + b\bar{F} + c(F - \bar{F})^2. \quad (5.8)$$

Значения a , b , c для разных моделей различны. Относительные изменения T_{∞} в зависимости от солнечной активности передаются моделями атмосферы с точностью $\pm 5^{\circ}K$.

Температура атмосферы изменяется также при геомагнитных возмущениях

$$\Delta T_{\infty} = \kappa \Delta K_p, \quad (5.9)$$

где ΔK_p — изменение индекса геомагнитной активности за 5—10 ч до момента наблюдений; κ — коэффициент пропорциональности, равный для средних широт 25 — 50° на единицу K_p .

Наблюдаются отчетливые сезонные вариации в изменении отношения $\frac{\Delta T}{\Delta K_p}$. Оно меняется от 15 до 80 зимой и от 15 до 70

летом. Суточные вариации в степени влияния K_p на температуру верхней атмосферы также существуют: реакция температуры на 30% интенсивнее ночью, чем днем. Изменение температуры во всей верхней ионосфере наступает практически одновременно через 6—7 ч после геомагнитного возмущения и не зависит существенно от широты, но зависит от продолжительности геомагнитного возмущения. Реакция параметров нижней ионосферы более быстрая на геомагнитное возмущение в высоких широтах. С другой стороны, запаздывание возмущения в экваториальной атмосфере ниже 200 км может превышать 12 ч.

Во время геомагнитных возмущений на высоте 150 км наблюдалось увеличение плотности от 15 до 24%. Относительное увеличение плотности может быть вычислено как $0,12 \Sigma A_p$ %, где ΣA_p —

сумма значений индексов A_p за три дня, центрированных к максимуму бури. В высоких широтах вариации плотности достигают 35% при возрастании K_p от 0 до 8 единиц.

Долгопериодные изменения в ионосфере, связанные с солнечной активностью, еще более очевидны.

Для области F_2 характерно возрастание критических частот от лет минимума к годам максимума 11-летнего цикла солнечной активности, достигающее трех раз для зимнего сезона, что соответствует девятикратному увеличению электронной концентрации. Изменение электронной концентрации слоев E и F_1 в 11-летнем цикле не превышает 1,5—2,5 раза, а в слое D эта величина еще более уменьшается. В зависимости от мощности цикла, сезона, широты и других факторов изменение электронной концентрации от минимума к максимуму 11-летнего цикла будет несколько отличаться от указанных выше величин. Кроме увеличения электронной концентрации меняется и форма слоев ионосферы. В максимуме солнечной активности слой F_2 образуется на большей высоте, сильно расширяется его верхняя часть ($h > 300$ км).

Запуски искусственных спутников Земли с конца 50-х годов позволили получить информацию об изменениях плотности верхней атмосферы в 11-летнем цикле, определяемой по торможению спутников. Кинг-Хили и Риз использовали данные по торможению спутников в интервале высот 180—700 км за период с 1957 по 1963 гг. и установили, что плотность понижается вместе с уровнем солнечной активности от 1957 к 1963 гг. Этот эффект растет с высотой. Плотность газа в дневное время на высоте 600 км понизилась с середины 1958 к середине 1962 гг. в 30 раз, а на высоте 400 км — в 5 раз. Существенно изменились среднегодовые величины плотности также на других высотах. Так, дневная плотность в нижней ионосфере уменьшилась от 1958 к 1964 г. в 1,6 раза, а на 300 км — более чем в 3 раза. Атмосфера в целом по мере спада солнечной активности охлаждается и сжимается.

Кинг-Хили и Куинн позже показали, что вблизи 700 км плотность атмосферы в дневное время в 1958 г. была больше в 100 раз по сравнению с ночными величинами плотности в 1964 г. Эти систематические вариации температуры и плотности связаны с ультрафиолетовой радиацией с $\lambda < 1000 \text{ \AA}$, которая фотоионизирует и нагревает атмосферу выше 120 км.

Особенно многочисленными были работы, где проводились подсчеты коэффициентов корреляции параметров ионосферы, измеренных радиометодами, и индексов солнечной активности.

Коэффициенты линейной корреляции между $f_o F_2$ и индексами W , $F_{10,7}$ для различных районов равны соответственно 0,960 и 0,945.

Однако для отдельных циклов солнечной активности характер и теснота связи W с ионосферными параметрами становятся несколько другими. Так, в годы максимума 19-го цикла по цюрих-

ской нумерации (1957—1958 гг.) связь f_oF2 и W значительно отклоняется от линейной. Глобальное распределение различных видов зависимости подчиняется определенным законам.

Интересное исследование связи параметров ионосферы с солнечной активностью провел Л. Маглтон. Он использовал индекс, который характеризует средний уровень ионизации области $F2$ и обнаружил вариацию в характере связей между f_oF2 и относительными числами Вольфа. Амплитуда указанного индекса, выраженного в единицах относительных чисел Вольфа, составляет 5 единиц, а период около 40 лет. Максимум волны приходится на конец 30-х, а минимум на конец 50-х годов.

Критическая частота (на станции Томск) слоя $F2$ в 1937—1938 гг. (максимум 17-го цикла по цюрихской нумерации) по сравнению с 1957—1958 гг. ниже на 10%, тогда как числа Вольфа были ниже на 70%.

Следовательно, можно заключить, что одно и то же значение чисел Вольфа было более геоэффективным в конце 30-х годов по сравнению с другими годами рассмотренного периода (1936—1968 гг.).

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют об отсутствии в ряде случаев линейных связей параметров ионосферы с числами Вольфа, т. е. появление эффекта «насыщения» в характере связей, а также зависимости характера связей Солнце — ионосфера от фазы 11-летнего и, вероятно, более длинного цикла.

Вклад основного цикла солнечной активности в возмущенность параметров нижней ионосферы (слой D) уменьшается, добавляются другие агенты, влияние которых на слои, расположенные выше 100 км, относительно мало. Тесная связь установлена между среднегодовыми значениями f_{min} и W ; для среднемесячных значений сопоставляемых величин такой тесной линейной связи нет, особенно в зимнее время. Ю. Л. Трутце исследовал ход ночного поглощения радиоволн, которое определяется увеличением электронной плотности и частоты соударений в области D , почти за полный цикл солнечной активности. Обнаружено, что на частоте 75 кГц поглощение не изменяется в течение 1958—1965 гг. Для более низких частот поглощение уменьшается с повышением солнечной активности и увеличивается с ее уменьшением. Этот результат связан с поглощением радиоволн в слое, который образуется космическими лучами, модулируемыми корпускулярными потоками. На частотах более 75 кГц поглощение увеличивается с ростом солнечной активности. Из приведенных фактов следует, что на частотах около 75 кГц устанавливается равновесие между противоположно действующими солнечным источником (электромагнитное и корпускулярное излучение) и галактическими космическими лучами. Высота, на которой устанавливается это равновесие, составляет приблизительно 85—95 км.

Частота появления поглощения в зоне полярных сияний (зональное поглощение), а также его величина существенно меняются

в течение 11-летнего цикла: наибольшая частота появления зонального поглощения приходится на годы спада солнечной активности.

Следовательно, сопоставление хода солнечных индексов и поглощения радиоволн на различных частотах позволяет обнаружить прямую или обратную связь, отсутствие связи, если анализируется взаимосвязь поглощения на частоте 75 кГц, с солнечными индексами, максимальную повторяемость зонального поглощения на ветви спада 11-летнего цикла, зависимость тесноты связи от сезона и района.

Первые указания на зависимость системы ветров в нижней ионосфере (~ 95 км) от солнечного цикла были найдены при сравнении данных по МГГ и МГСС, показывающих значительное уменьшение преобладающей компоненты ветра и одновременное увеличение 12-часовой периодической компоненты с уменьшением солнечной активности от 1957—1959 к 1964—1965 гг. В максимуме солнечной активности зимой над центральной Европой преобладающая компонента ветра — западная, ее величина составляет 30—40 м/с, тогда как в течение минимума она меньше 23 м/с и направлена на юго-восток. Что касается 12-часовой периодической компоненты, то она сильно увеличивается с уменьшением солнечной активности и наоборот. С другой стороны, фаза 12-часовой периодической компоненты не обнаруживает зависимости от солнечного цикла. Сравнение двух максимумов солнечных циклов (1957—1959 и 1967—1968 гг.) показало, что в течение 1967—1968 гг. преобладающая компонента не стала такой большой и 12-часовая компонента не стала такой малой, как они были в течение 1957—1959 гг. Это находится в хорошем согласии с уровнем солнечной активности в эти годы.

На более низких уровнях теснота связи солнечных и геомагнитных индексов с параметрами атмосферы уменьшается, а время запаздывания увеличивается. На высотах более 110 км ветры северного направления усиливаются примерно через 40 ч после увеличения K_p . Запаздывание связано с распространением возмущения в поле ветра, приходящего из областей поглощения радиации, либо из-за поглощения корпускул в высоких широтах. Долгопериодная вариация северной компоненты ветра выше 110 км определяется значениями $F_{10,7}$ или W , и, следовательно, она может быть связана с ультрафиолетовой радиацией.

Получена положительная корреляция между ежедневными индексами $F_{10,7}$ и температурой нейтральной атмосферы на высоте 51—70 км над Тумбой ($8^\circ N$, $77^\circ E$). Запаздывание температуры относительно $F_{10,7}$ менее одного дня. Уравнение регрессии сопоставляемых характеристик может быть представлено в виде $T_{51-70} = 199,5 + 0,23 F_{10,7}$, где T_{51-70} и $F_{10,7}$ относятся к одним и тем же суткам. Принимается, что вариации далекого ультрафиолетового излучения, меняющегося в фазе с $F_{10,7}$, обуславливают изменения в нагреве термосферы, откуда волны тепла распространяются вниз в мезосферу, уменьшаясь по амплитуде.

Реакция мезосферы на солнечное излучение изменяется от месяца к месяцу. Сходные черты в характере связей обнаруживаются для таких групп месяцев: июль — сентябрь; октябрь — февраль; март — июнь.

Такие факторы, как увеличение электронной плотности и частоты соударений в области D , определяют, как известно, ионосферное поглощение. В свою очередь, ионизация области D обусловлена рентгеновским излучением, излучением в линии L_α и космическими лучами. Соотношение вклада этих агентов в зависимости от уровня солнечной активности и высоты меняется. При высокой солнечной активности ($W > 150$) вклад жесткого рентгеновского излучения доминирует. При средней активности Солнца ($W = 60 - 150$) вклады излучения с $\lambda \leq 2$ нм и $H(L_\alpha)$ -излучения сравнимы. При низкой солнечной активности ($W < 60$) ионизация в основном обусловлена $H(L_\alpha)$ -излучением, на втором месте стоит рентгеновское излучение, затем следуют космические лучи.

Следовательно, для того, чтобы получить высокие коэффициенты корреляции между каким-либо индексом солнечной активности и ионизацией в области D , необходимо, чтобы индекс хорошо отражал влияние на ионизацию в области D всех перечисленных агентов.

Анализ данных американской ракетной сети на 1963—1974 гг., проведенный В. Ф. Логиновым и Г. Л. Сухомазовой, показал, что вклад солнечной активности ($F_{10,7}$) в изменение ветра выше 35 км на низкоширотных станциях (22—38° с. ш.) составляет около 15%, а в тропосфере около 5%. В субтропической атмосфере (ст. Кеннеди) в холодное время года обнаружены три области различного влияния солнечной активности на ветровой режим: в верхней тропосфере и в области 35—60 км усиление солнечной активности приводит к ослаблению западного ветра, а в нижней стратосфере на высоте 20—30 км к усилению западного ветра. Зимой в нижней мезосфере и верхней стратосфере в субтропических широтах на максимуме 11-летнего цикла происходит ослабление скорости западного ветра на 20—30 м/с.

5.2. Влияние короткопериодных возмущений на Солнце и в космосе на нижнюю атмосферу

В подавляющем большинстве работ в области оценки влияния короткопериодных возмущений на Солнце и в космосе на нижнюю атмосферу авторы анализировали связь метеорологических характеристик со вспышками на Солнце и геомагнитными возмущениями.

Работы Дюллей, М. С. Жукова, Б. М. Рубашева, Л. А. Вительса, А. И. Оля, Б. И. Сазонова, а в последние годы Э. Р. Мустеля, Шурманса, Робертса, Кинга и многих других показали, что метеорологические характеристики в периоды времени, предшествующие таким реперным датам, как даты вспышек либо геомагнитных

возмущений, отличаются от метеорологических характеристик периодов, следующих за ними, а это означает, что выбор физически однородных периодов, соответствующих разному уровню солнечной и геомагнитной активности, позволяет разграничить всю статистическую выборку на два более однородных ансамбля. В подавляющем большинстве работ производился анализ 1-го статистического момента (среднего арифметического) до и после реперных дат. Приведем несколько примеров, которые показывают, что метеорологические характеристики после геомагнитных возмущений и протонных вспышек, сопровождающихся поглощением радиоволн, изменяются.

Наиболее обстоятельные работы в последние десятилетия по этому вопросу выполнены Э. Р. Мустелем. Им использовался метод наложения эпох (МНЭ), основу которого составлял выбор исходных (реперных) моментов, указывающих начало какого-то определенного явления солнечной природы. В качестве таких моментов Э. Р. Мустель использовал момент непосредственного вторжения солнечных корпускул в оболочку Земли. Таким моментом принимался первый день сравнительно изолированного (от соседних геомагнитных возмущений) геомагнитного возмущения. Списки геомагнитных моментов включали даты спорадических и рекуррентных геомагнитных возмущений. Исследование показало, что после геомагнитных моментов в обширных районах Земли наблюдается повышение или понижение давления с экстремумами примерно в одно и то же время (рис. 5.2). В среднем время запаздывания реакции атмосферы составляет 3 ± 1 сутки.

Обращает на себя внимание тот факт, что метеостанции с однотипным ходом давления группируются в определенных районах. Можно выделить шесть таких районов. В районах I (восток СССР), V (Северная Атлантика) и VI (Канадский архипелаг) после реперного момента давление падает, тогда как в районах II (Западная Сибирь), III (Европа) и IV (окрестности Карского моря) отмечается рост давления. Время реакции атмосферы, т. е. промежуток времени до наступления экстремума, зависит от широты. В околополюсных областях экстремум давления наступает через два дня, а в других районах, в среднем, через три-четыре дня. Картина распределения эффектов различна для разных сезонов, что говорит о зависимости последних от начальной синоптической ситуации.

Однако использовать непосредственно давление в качестве параметра для выявления солнечно-атмосферных связей представляется не очень целесообразным, поскольку возмущения атмосферы, вызванные солнечной активностью, порядка одних-трех суток, тогда как характерное время изменения поля давления на Земле около недели.

Уловить кратковременные колебания давления можно посредством анализа средних значений квадрата суточных разностей давления — дисперсии суточных разностей. Сравнивая ход дисперсий суточных разностей давления относительно геомагнитных момен-

тов, Э. Р. Мустель и В. Е. Чертопруд установили возрастание суточных перепадов давления на второй-четвертый день после геомагнитных моментов, т. е. нестабильности атмосферы (рис. 5.3). Зимой после спорадических возмущений эффект повышения средней дисперсии суточных разностей давления (примерно на 15%)

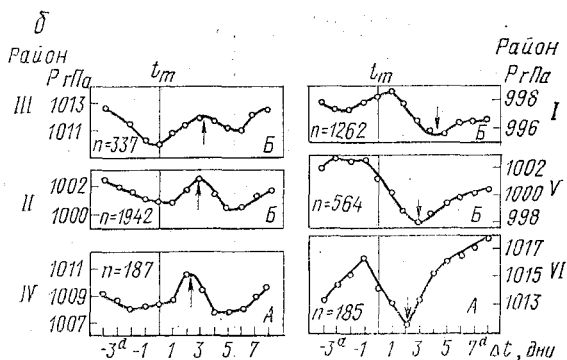
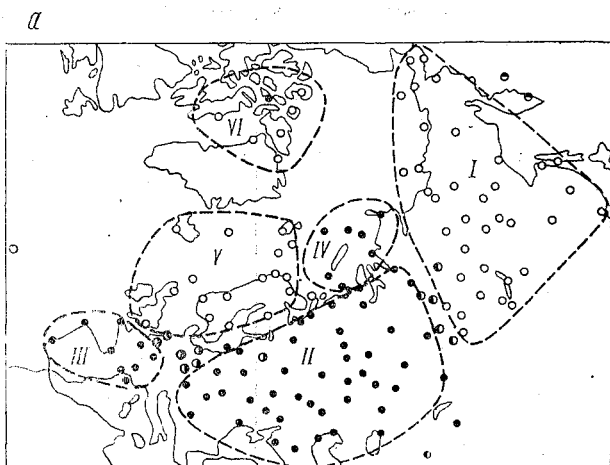


Рис. 5.2. Распределение по поверхности Земли знаков изменения наземного атмосферного давления после геомагнитных моментов t_m (а) и средние статистические кривые изменения давления для отдельных районов Земли (б). Северное полушарие, зима (XII—II) 1890—1967 гг., стрелки указывают положение t_m и \min_a

особенно четко проявляется на широтах 50—60°, а во всех других случаях на широтах 60—70°. В холодное полугодие это происходит на второй день после сильных спорадических и рекуррентных возмущений.

Вероятность случайного появления максимума в эти дни составляет менее 0,1%. Анализ карт разности давления для двух моментов времени: спокойного и возмущенного, показал, что попадание Земли в солнечный корпускулярный поток сопровождается в среднем углублением Исландской и Алеутской депрессий. Кроме того, депрессия перемещается с юга Гренландии на восток через Исландию.

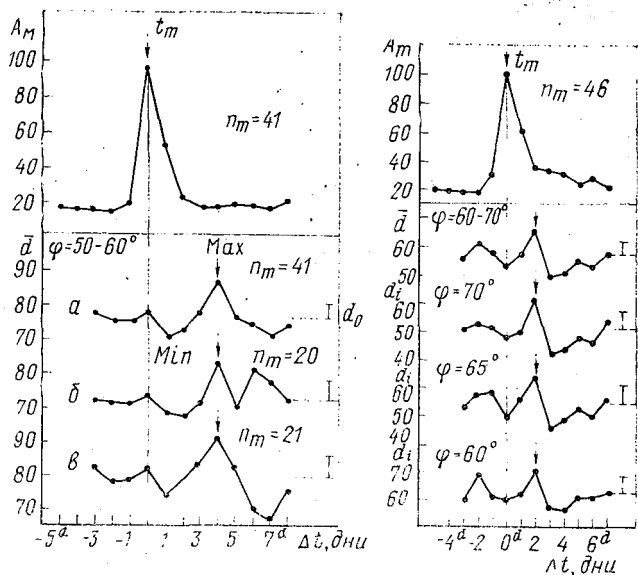


Рис. 5.3. Ход индекса геомагнитной активности A_m и дисперсии суточных разностей давления относительно моментов t_m для спорадических возмущений зимой (I) и весной (II): а — по данным 1880—1974 гг.; б — по данным 1880—1945 гг.; в — по данным 1946—1974 гг.

Вертикальными черточками указаны стандарты ошибок

Э. Р. Мустель рассмотрел также поведение давления на полярных станциях после вспышек, сопровождающихся инжекцией протонов высоких энергий, и всех остальных вспышек. Отчетливое падение давления в полярных широтах наступило только после вспышек, которые сопровождались инжекцией протонов высоких энергий. В последующем с привлечением более обширных материалов Т. И. Шука рассмотрела давление в различных районах в связи с протонными вспышками. Ее результаты приведены на рис. 5.4.

Независимо аналогичные исследования связи солнечных космических лучей с циркуляцией тропосферы провел Шурманс в Голландии. Он показал, что осенью и зимой после мощных хромо-

сферных вспышек (большинство таких вспышек сопровождаются выбросом протонов высоких энергий) давление на широтах 70—90° падает, а на широтах 45—65° растет. Поскольку солнечные высокоэнергичные протоны имеют, как правило, энергию не более $5 \cdot 10^8$ эВ, то они в состоянии проникать только в околорайонные

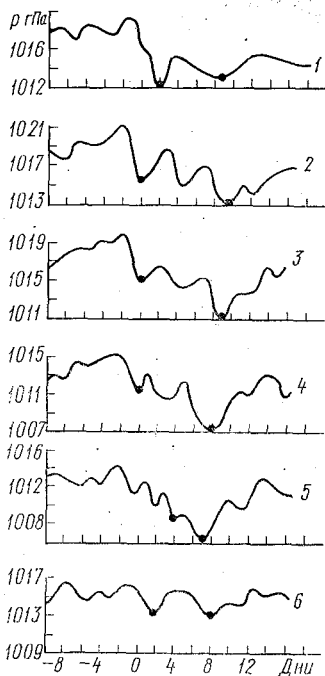


Рис. 5.4. Изменение давления в период ППШ для станций, имеющих различную геомагнитную широту:

1 — Алерт ($\varphi \sim 86^\circ$); 2 — Копермайн ($\varphi \sim 75^\circ$); 3 — Норман—Уэлс ($\varphi \sim 70^\circ$); 4 — Фербенкс ($\varphi \sim 67^\circ$); 5 — Ном ($\varphi \sim 64^\circ$); 6 — Св. Мери ($\varphi \sim 59^\circ$). Точками показаны статистически значимые отклонения

области Земли. Из этих районов во время протонных событий воздух выносится в умеренные широты. Такой перепад давления должен стимулировать развитие циклонов в высоких широтах и смещение антициклонов из субтропических в умеренные широты. При этом должна возрасти напряженность западного переноса. Шурманс обнаружил, что наибольшие изменения давления происходят на высотах 200—400 гПа и пришел к заключению, что источник изменений тропосферного поля давления находится в верхней тропосфере — нижней стратосфере.

Следует отметить, что идея стратосферного управления не является новой. Предположение о регулирующей или управляющей роли стратосферы в синоптических процессах было высказано и развито Штюве, Мюгге и другими. Построения Штюве базируются на основном уравнении статики, а выводы из него описывают одновременное состояние давления в различных слоях, но ничего не говорят о причинах и следствиях. Кроме того, неясными были в то время причины предполагаемых самостоятельных изменений температуры и самостоятельного меридионального перемещения воздуха в стратосфере. Относительно последнего высказывалось соображение об образовании волн на поверхности тропосферы, которые могут оставаться неустойчивыми.

Современный уровень метеорологии и позволяет предположить некоторые соображения о причинах самостоятельных изменений температуры в стратосфере и схемы передачи возмущения из стратосферы в тропосферу. Подробно этот вопрос рассмотрен при обсуждении механизмов солнечно-атмосферных связей.

В последние годы при исследовании солнечно-атмосферных связей широко используется такой показатель, как секторная структура межпланетного магнитного поля (ММП). Особенно существенные результаты в этом направлении получены Д. Вилкоксом в США и С. М. Мансуровым в СССР. После прохождения Землей секторных границ ММП происходит понижение индекса завихренности атмосферы (рис. 5.5).

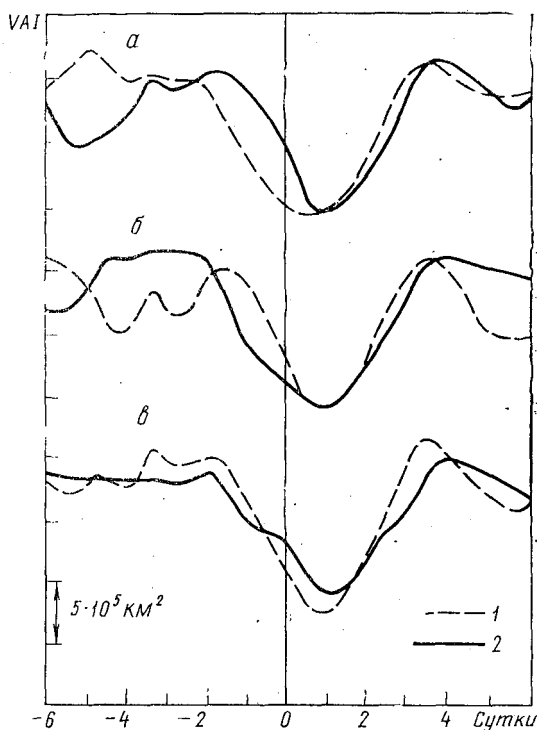


Рис. 5.5. Изменение индекса завихренности до и после прохождения границ магнитных секторов (ГМС)

- а) смена секторов: 1 — положительного на отрицательный, 30 случаев ГМС, 2 — отрицательного на положительный, 24 случая ГМС; б) зимний сезон: 1 — вторая половина зимы, 22 случая ГМС, 2 — первая половина зимы, 29 случаев ГМС; в) периоды: 1 — 1967 ÷ 1970 гг., 28 случаев ГМС, 2 — 1964 ÷ 1966 гг., 26 случаев ГМС

Характер изменения зональной циркуляции в различных секторах северного полушария отличается неустойчивостью и зависит от сезона, района и других факторов. Изменения циркуляции ока-

зались существенными только в случае прохождения Землей хейловских границ, т. е. таких границ, когда знаки полярности межпланетного магнитного поля и полярности полей в биполярных группах пятен соответствующего полушария совпадают. Имеется хорошая согласованность изменчивости зональной циркуляции в Атлантическом районе и интенсивности космических лучей вблизи хейловских секторных границ ММП, что может свидетельствовать о причинно-следственных связях сопоставляемых параметров.

5.3. Проявление 27-дневного цикла на Солнце, в околоземном космосе и атмосфере Земли

В метеорологии используются такие основные дискретные по времени единицы: сутки, пентада, декада, месяц, сезон, год и пятилетие. Физическим периодом времени следует считать сутки, сезон и год. Между тем, имеются другие физические периоды, которые широко используются в геофизике. К таким периодам прежде всего относится 27-дневный период, связанный с периодом вращения Солнца. Существование 27-дневных, связанных с солнечной активностью, последовательностей в геофизических процессах, свидетельствует о наличии на Солнце устойчивых активных долгот. Чередование активных и пассивных долгот на Солнце вызывает появление определенной цикличности в солнечной активности и связанной с нею геофизической активности.

Время сидерического (отнесенного к «неподвижным» звездам) оборота Солнца на экваторе составляет 25,38 суток, 26,2 суток на широтах $\pm 30^\circ$ и до месяца в более высоких широтах. При изучении влияния Солнца на Землю приходится принимать во внимание другой период — синодический, т. е. время, необходимое для того, чтобы пятно, наблюдавшееся на центральном меридиане Солнца (по отношению к Земле), снова вернулось на него. Поскольку Земля при своем обращении вокруг Солнца «догоняет» Солнце, то синодический период оказывается большим, чем сидерический. Его средняя длительность принимается равной 27,33 суток. Синодический период нельзя принимать в точности равным 27,33 суткам или вообще за какую-либо постоянную величину. Анализ периодов обращения солнечных пятен показал практическую равнозначность периодов 26—28 дней. Синодический период вращения Солнца 27,0 суток, часто используемый в статистических геофизических исследованиях, соответствует гелиографической широте $\pm 8^\circ$. Последовательности, связанные с повторяющимися группами солнечных пятен, длятся обычно два-три оборота (время существования биполярных магнитных областей), в отдельных случаях пять-семь солнечных оборотов (униполярные области).

Крупномасштабные особенности фонового магнитного поля одной полярности сохраняют свое положение на гелиографической долготе в течение, по крайней мере, десяти оборотов. Очень часто в периоды средней и низкой солнечной активности отдельные ряды

магнитных деталей составляют непрерывные потоки, сохраняющиеся несколько лет. Активные долготы, выявленные в результате анализа суммарных площадей солнечных пятен, как показали работы Ю. И. Витинского, сохраняются в течение двух и более 11-летних циклов. Для этих областей характерно жесткое вращение. Активные долготы выделяются также по индексам солнечных вспышек и всплесков радиоизлучения, солнечных магнитных полей и солнечной короны.

К настоящему времени установлено, что некоторые активные долготы проявляют себя то усиливаясь, то ослабляясь на протяжении нескольких десятков лет. Использование жесткого периода вращения при изучении активных долгот свидетельствует о том, что их «корни» лежат в слоях подфотосферной конвективной зоны Солнца, им присуще почти жесткое вращение, и они пронизывают практически всю толщу атмосферы Солнца. Наличие активных долгот говорит также о том, что изменения солнечной активности в течение длительных промежутков времени обуславливаются не всем Солнцем, а его отдельными долготными интервалами.

Активные долготы Солнца, являясь квазиперманентными областями повышенной солнечной активности, должны создавать условия повторения однотипных процессов в определенные дни солнечного календаря в магнитосфере, атмосфере, космических лучах. Расположение активных образований на Солнце, их мощность, а следовательно, интенсивность потока волнового и корпускулярного излучения изменяются от цикла к циклу и закономерности этих изменений требуют дальнейшего изучения.

5.4. Анализ 27-дневных вариаций гелиогеофизических индексов и параметров атмосферы

Наиболее простым способом для выявления особенностей, связанных с долготной неоднородностью солнечной активности, является построение 27-дневных солнечных календарей в системе кэррингтоновских долгот, содержащих ежедневные значения индексов солнечной и геомагнитной активности. При этом предварительно необходимо вычислить нормы индексов для каждого дня года, отклонения от нормы и средние квадратические отклонения для каждого дня года, а затем произвести нормирование вычисленных отклонений от норм на среднеквадратические отклонения для каждого дня. Такая процедура позволяет исключить из рассмотрения вклад годового цикла в изменчивость значений индексов геомагнитной активности (геометрический фактор) и уравнять веса каждого года при построении 27-дневных солнечных календарей.

Спектральный анализ индекса $F_{10,7}$ подтвердил наличие 27-дневного цикла практически во всех временных интервалах, тогда как 27-дневный цикл в изменениях индекса геомагнитной активно-

сти A_p за период с 1932 по 1973 гг. был обнаружен только в 30% случаев, в основном вблизи минимумов 11-летних циклов. Отмечается также большая мощность 13—14-дневного цикла в индексах солнечной и геомагнитной активности, особенно на нисходящей фазе нечетного и в первые годы восходящей ветви четного циклов, что свидетельствует о наличии двух активных районов на Солнце и различий в положении активных долгот на разных фазах 22-летних циклов.

Для многих процессов верхней атмосферы известна 27-дневная цикличность. В экспериментально установленной связи между плотностью в верхней атмосфере и радиоизлучением Солнца в сантиметровом и дециметровом диапазоне четко выделяется 27-дневная вариация, связанная с вращением Солнца. Обнаружены 27-дневные изменения содержания электронов солнечным потоком в среднеширотной атмосфере. Эти изменения на 35% меньше, чем изменения содержания электронов, связанное с 11-летним циклом. 27-дневная составляющая в турбулентных изменениях меридиональных и зональных компонент скорости обнаружена на высотах 80—100 км.

Первое исследование 27-дневных циклов в метеорологических параметрах было выполнено Д. О. Святским, который установил периодичность грозовой деятельности, связанную с этими циклами.

В 30-е годы широкие исследования в этом направлении были выполнены М. С. Жуковым, К. В. Бродовицким и П. П. Предтеченским. Они начали регулярно составлять долгосрочные прогнозы на разные сроки с использованием информации о солнечной активности.

Интенсивное исследование 27-дневного цикла в метеорологических процессах началось в 50-е годы Л. А. Вительсом. Построение солнечных календарей позволило автору выявить ритмы в атмосфере, часть которых использовалась ранее в методике прогнозов погоды Б. П. Мультановского и С. Т. Пагавы.

Оказалось, что высокие температуры на ЕТС приходятся, в основном, на 10—16-й день солнечного календаря, а похолодания наступают в 18 и 24 дни солнечного календаря (строго говоря, наблюдалась большая вероятность низких температур от 18 до 27-го дня солнечного календаря). За 1952—1954 гг. 80% наиболее холодных дней пришлось на вторую половину цикла. Эти особенности хода температуры в 27-дневном цикле были сопоставлены с повторяемостью различных типов преобразований форм циркуляции по Г. Я. Вангенгейму и повторяемостью ультраполярных процессов. Получена удовлетворительная согласованность температуры и атмосферной циркуляции.

В 60-е годы ряд исследований, посвященных вопросу проявления вращения Солнца в метеорологических процессах, был выполнен Е. В. Воробьевой. Она установила, что экстремально высокие значения интенсивности зональной циркуляции в американо-атлантической части северного полушария приходится на последнюю

треть цикла. Для струйных течений в первой половине 27-дневного цикла характерно более низкое положение в большинстве районов северного полушария, а во второй половине — более высокое.

Таким образом, к настоящему времени получены результаты, свидетельствующие в пользу неслучайного изменения метеорологических характеристик и атмосферной циркуляции в 27-дневном календаре в отдельные промежутки времени. Однако только в последние годы начали осуществляться очень важные работы по анализу устойчивости экстремумов метеорологических характеристик в 27-дневном календаре в различные периоды времени, исследованию сезонных особенностей изменения метеорологических характеристик с солнечными и геофизическими характеристиками в солнечном календаре. Без решения этих вопросов нельзя перейти к корректному учету эффекта вращения Солнца при диагнозе и прогнозе метеорологических процессов.

Первым этапом таких исследований является установление наличия 27-дневного либо кратных ему циклов в крупномасштабных характеристиках циркуляции атмосферы.

Индекс абсолютной завихренности на 500 гПа поверхности представлен на рис. 5.6 за период с 1946 по 1974 гг. Анализ атмосферной завихренности для холодного времени года и восходящих ветвей 11-летних циклов показал наличие двух максимумов и двух минимумов, разнесенных друг относительно друга на 13,5 дня. Жирными точками на графике показаны значения атмосферной завихренности, выходящие за 2σ . Использован период 26,995 суток. Кривой 2 представлен ход значений завихренности атмосферной циркуляции при использовании периода 26,99 дня. Реальный период, как видно из рис. 5.6, лежит между 26,99 и 27 днями ($\sim 26,995$ дня).

Подробный анализ значений завихренности атмосферной циркуляции для ветвей спада 11-летних циклов при использовании периодов 27,0, 26,99 и 27,01 дня показал, что наиболее четкое изменение завихренности в 27-дневном календаре наблюдается при использовании периода 27,01 (рис. 5.7, кривая 1). Экстремумы в ходе значений завихренности остаются такого же порядка, если использовать период 27,005 дня (кривая 2). Однако сравнение кривых на рис. 5.6 и 5.7 показывает, что экстремумы смещены друг относительно друга на 1,0—2,0 дня.

Таким образом, в течение рассмотренного периода времени наблюдалось два максимума и два минимума атмосферной завихренности, смещенные друг относительно друга на 13,5 дней. Период колебания атмосферной завихренности только на несколько сотых процента отличается от периода в 27 суток, удачно выбранного Бартельсом для анализа геомагнитной активности.

Строго говоря, понятие долгота для дифференциального вращения Солнца условна и зависит от выбранного периода осевого вращения. Каждая активная долгота определяется в календаре своего периода и исчезает (смещается) в другом. Поиски

активных долгот в календаре Кэррингтона дают в действительности лишь моменты суперпозиции на одном меридиане двух или нескольких смещающихся долгот с разными периодами. Отсюда становится ясным, почему положение активных долгот значительно изменяется при изменении промежутка времени, за который определяются активные долготы. Доказательством существования нескольких устойчивых активных долгот с разными периодами вращения являются результаты спектрального анализа, проведенного Фрайзером—Смитом, В. Ф. Логиновым и другими.

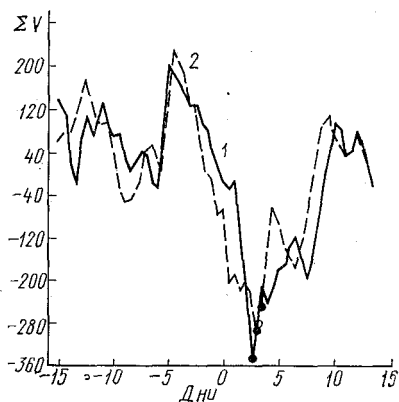


Рис. 5.6. Ход индекса завихренности атмосферы при использовании различных периодов вращения Солнца для восходящих ветвей 11-летнего цикла:
1 — 26,995 сут.; 2 — 26,99 сут.

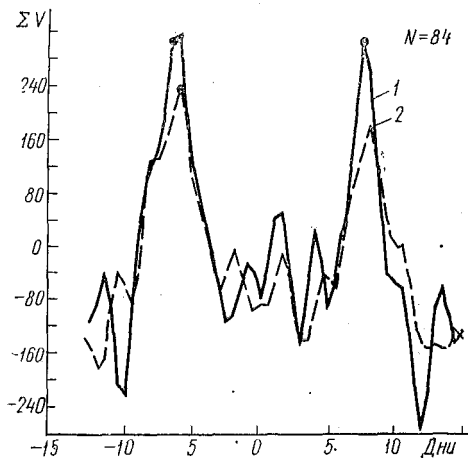


Рис. 5.7. Ход индекса завихренности атмосферы при использовании различных периодов вращения Солнца для нисходящих ветвей 11-летнего цикла:
1 — 27,01 сут.; 2 — 27,005 сут.

Кроме того, имеются медленные изменения периодов вращения активных долгот. Вблизи минимума векового цикла солнечной активности скорость вращения активных долгот наибольшая. В XVIII столетии, когда наблюдалась очень низкая активность, солнечные пятна вращались в низких широтах быстрее на 3—4%.

Существуют и другие сложности исследования влияния добавочного излучения солнечных активных долгот на Землю. Так, через определенные моменты Солнце прекращает испускание газа из активной области, либо Земля в своем орбитальном движении выходит за пределы активной области, в которую попадал поток. Расположение и протяженность этой области в определенной мере зависят и от асимметрии активности полушарий Солнца. Последняя зависимость может быть проиллюстрирована рис. 5.8, на котором показаны изменения коэффициента корреляции (r) между

геомагнитной активностью и повторяемостью формы C_W для 27-дневных циклов и показатель асимметрии активности полушарий Солнца за тот же период.

Из рис. 5.8 (кривая 1) видно, что наблюдаются как положительные, так и отрицательные значимые коэффициенты корреляции индекса A_p и C_W . Сопоставление последних с ходом асимметрии запятненности полушарий Солнца показывает, что изменение знака и тесноты связи повторяемости формы C_W циркуляции с геомагнитной активностью находится в обратной зависимости от показателя асимметрии активности Солнца (A). Коэффициент корреляции между значениями r и A оказался равным $-0,54$ ($P_{сл} < 1\%$). Следовательно, асимметрия активности полушарий Солнца должна учитываться при интерпретации солнечно-атмосферных связей.

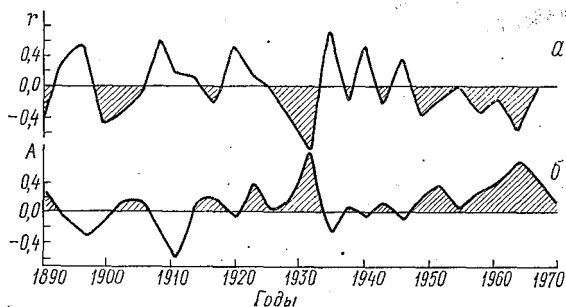


Рис. 5.8. Коэффициент корреляции (r) между геомагнитной активностью и числом дней западной формы циркуляции по Г. Я. Вангенгейму по дням солнечного оборота для каждого трехлетия с 1891 по 1969 гг. (а); показатель асимметрии активности полушарий Солнца (A) по тем же трехлетиям (б)

Подводя итог современным представлениям о проявлении 27-дневного периода вращения Солнца в нижней атмосфере можно заключить, что на Солнце существуют устойчивые центры активности с периодом вращения от 26,7 до 28,1 суток. В моменты схождения на одном меридиане двух или нескольких таких центров активности их суммарный эффект наблюдается в виде повышенной активности в определенном долготном интервале в течение нескольких лет.

Прохождение геоактивной долготы через центральный солнечный меридиан сопровождается неслучайным знакопеременным эффектом в атмосфере. Знак эффекта зависит от сезона года, района, синоптической ситуации, а также таких внешних факторов, как полярность общего магнитного поля, асимметрия активности полушарий Солнца, тип границ секторов межпланетного магнитного

поля. Влияние геоактивных долгот Солнца на нижнюю атмосферу осуществляется посредством нескольких агентов: электромагнитного и корпускулярного излучения, космических лучей, отличающихся по скорости распространения и характеру взаимодействия с магнитными полями. Все вышеизложенное создает большие трудности на пути использования 27-дневных календарей в практике долгосрочного прогнозирования.

Бóльшие перспективы связаны с использованием 27-дневных интервалов осреднения вместо месячных при климатологической обработке данных. Использование физически обоснованного 27-дневного периода осреднения вместо месячного, как показала работа Б. Г. Щерстюкова, позволило уменьшить шум в рядах температуры на 3—6%.

Таким образом, дифференциальность вращения активных долгот и вариации скорости их вращения в зависимости от активности Солнца не позволяют принять в качестве эталона какой-либо один период вращения для гелиогеофизических исследований и делают выбор между календарями Бартельса, Кэррингтона или какими-либо другими возможными календарями весьма затруднительным. В этой связи только тщательный анализ активных долгот позволяет выбрать генетически однородные периоды в солнечном календаре. Последнее обстоятельство создает серьезные трудности на пути использования солнечных календарей в практике прогнозов погоды. Больше оснований имеет использование солнечных календарей при климатологических (диагностических) исследованиях, так как позволяет выбрать генетически однородные периоды осреднения метеорологических характеристик и отказаться от не имеющих физического обоснования календарных периодов.

5.5. Проявление 11-летнего цикла в нижней атмосфере

Долгое время 11-летний цикл считался основным циклом солнечной активности, и исследователи пытались его найти во всех геофизических процессах. Первые работы были выполнены Ричиолли, Дешалем, Араго, Гершелем и Готье. Они показали, что при разном уровне солнечной активности метеорологические условия различаются и это различие определяется географическим районом и промежутком времени, на которых анализировались метеорологические характеристики.

Подлинно классическое исследование проявления 11-летнего цикла в климате Земли было опубликовано в 1873 г. Кеппенем. Он показал, что наиболее низкая температура в тропиках наблюдается несколько позже максимумов 11-летних солнечных циклов, в то время как наиболее высокая температура немного запаздывает относительно эпох минимумов. Амплитуда 11-летнего цикла в температуре тропической зоны составляет около 0,5°. Однако если для XIX столетия и первых десятилетий XX столетия наблюдалась тенденция к обратной связи солнечной активности и тем-

пературы, то для последующего периода отрицательные коэффициенты корреляции наблюдались при сдвиге температуры относительно солнечной активности на 3—4 года, т. е. обнаруживалась скорее тенденция к прямой связи сопоставляемых величин. Особенно это было заметно для 17-го цикла, когда температура была исключительно высокой на максимуме этого цикла (1937—1938 гг.) и текущем 21-ом цикле, когда температура была также высокой на максимуме (1980—1981 гг.).

Вслед за Кеппенем вопросу влияния 11-летнего цикла солнечной активности на климат было посвящено много работ. Исследователь, впервые познакомившийся с их результатами, первоначально может констатировать, что связи Солнце — климат меняются в пространстве и времени как будто без видимых на то оснований. В настоящее время систематизированы результаты этих многочисленных исследований и показана важность проблемы. Также выявлены многие неясные вопросы, существующие в проблеме Солнце — климат. Одним из таких вопросов является вопрос об акцентации барического поля. Ряд исследователей обратил внимание на то, что интенсивность циркуляции, глубина циклонов и мощность антициклонов возрастают с ростом солнечной активности. Позже было установлено, что с увеличением солнечной активности изменяется и форма циркуляции. В последнее время ряд авторов не соглашается с элементарной формулировкой закона акцентации, либо считает этот закон несостоятельным.

Одна из причин противоречивых результатов связана с использованием материалов за другие периоды времени, для других сезонов и районов. В частности, материалы Х. Векслера, где приводится разность средних значений давления в период максимумов и минимумов солнечной активности, подтверждают наличие закона акцентации в период времени с 60-х годов прошлого столетия до 20-х годов текущего столетия и не подтверждают его для некоторых других периодов. Т. В. Покровской отмечалось, что карты Векслера говорят об увеличении градиента давления между субтропическими и умеренными широтами, только центр циклоничности сдвинут на Датские проливы, а антициклоничности — на Северную Африку. Аналогичный сдвиг полей давления обнаружен и для других центров крупных аномалий. Сравнение карт Федорова и Векслера для июля показывает их сходство для территории Азии и Африки и несходство для Атлантики и Европы. Акцентация значений давления для южного колебания найдена и на картах Векслера. В настоящее время считается, что акцентация проявляется и в том, что вместо усиления стационарных антициклонов усиливаются блокирующие антициклоны, зачастую вдали от расположения стационарных антициклонов. Такому пониманию закона акцентации отвечает и работа известного американского климатолога Виллета. Он проанализировал ежедневные синоптические карты северного полушария за период 1899—1962 гг. Им вычислялись разности значений давления на уровне моря и других показателей

от максимума к минимуму различных солнечных и геомагнитных показателей. Профили давления, представленные Виллетом, позволили судить о перемещении воздушных масс из одних широтных зон в другие в зависимости от фазы солнечной активности. Оказалось, что имеет место перемещение воздушных масс в более высокие широты в фазу максимума 11-летнего цикла. Зоны избытка и дефицита воздушных масс в течение года перемещаются вместе с Солнцем по широте. Зимой зона избытка давления располагается на широте 25—55°, весной — выше 50°. Перемещение воздушных масс в более высокие широты в фазу максимума 11-летнего цикла означает развитие блокирующих ситуаций.

Второй вопрос, который не получил окончательного решения, связан с оценкой вклада 11-летнего цикла солнечной активности в изменчивость метеорологических характеристик в различных районах земного шара в разные временные интервалы. Выполненные к настоящему времени оценки вклада 11-летнего цикла в изменчивость различных метеорологических характеристик не отличаются полнотой и зачастую противоречивы. Причины таких противоречий связаны с нестабильностью связей между существующими индексами солнечной активности и гидрометеорологическими характеристиками. Примерами таких связей можно назвать изменение тесноты и знака связей температуры северного полушария и особенно его тропической зоны с солнечной активностью. Классическим примером может служить изменение связи уровня оз. Виктория (Африка) с солнечной активностью в 20-е годы текущего столетия. Многочисленные примеры нестабильности таких связей приведены в работах Б. И. Сазонова и В. Ф. Логинова.

Нестабильность солнечно-атмосферных связей определяется:

- 1) сезоном года;
- 2) районом;
- 3) высотой над уровнем моря;
- 4) начальной синоптической ситуацией;
- 5) изменением степени воздействия других климатообразующих факторов;
- 6) неадекватностью гелиогеофизических индексов (последние не в полной мере отражают воздействие внешних агентов на атмосферу);
- 7) обстановкой в околоземном космосе.

В последнем столетии нарушение связей чаще всего имело место в 20—30-е годы.

В работах И. В. Максимова и Н. П. Смирнова обнаружен, однако, инвариантный характер связи отфильтрованных значений ряда гидрометеорологических характеристик с относительными числами Вольфа. Другие примеры инвариантных связей можно найти в работе Т. В. Покровской, которая установила устойчивую связь давления для районов южного колебания с числами Вольфа за период с 1847 по 1960 гг.

Инвариантный характер связи имеют засухи в некоторых районах. Так, засушливые годы на ЕТС относятся преимущественно к восходящей фазе геомагнитной активности (K_p), засушливые годы для Казахстана — к нисходящей ветви или минимуму.

Районов земного шара, где четко проявляется 11-летний цикл, немного. Неслучайно Е. С. Рубинштейн и Л. Г. Полозова, анализируя температуру в различных районах северного полушария, обнаружили 11-летний цикл только приблизительно в 10% случаев. В этой связи поиски 11-летнего цикла в ряде районов земного шара не привели к положительному результату, что позволило ряду авторов декларировать полную независимость гидрометеорологических характеристик от солнечной активности. Действительно, если не учитывать зависимость характера солнечно-атмосферных связей о перечисленных выше факторов, то можно прийти к концентрации о случайной природе колебаний в атмосфере.

Количественно вклад 11-летнего цикла солнечной активности в изменчивость гидрометеорологических характеристик составляет не более 10% от суммарной дисперсии. Об этом свидетельствуют оценки, полученные в результате разложения по естественным ортогональным функциям среднемесячной температуры северного полушария, а также оценки изменения температуры на различных станциях, полученные с помощью метода максимальной энтропии.

Следует отметить одну особенность проявления 11-летнего цикла в атмосфере, связанную с появлением двух максимумов и двух минимумов в изменчивости гидрометеорологических характеристик в этом цикле. Возможное объяснение природы возникновения при этом 5—6-летнего цикла в метеорологических характеристиках связано с уменьшением метеорологической солнечной постоянной при низком и высоком уровнях солнечной активности. И действительно, в работе О. А. Дроздова на основании нелинейности связи чисел Вольфа и солнечной постоянной восстановлены значения солнечной постоянной за последние 250 лет. Им отмечалось, что шесть особенностей в ходе S_0 находят свое отражение в соответствующих повышениях и понижениях температуры Земли. Наличие воздействия на нижнюю атмосферу электромагнитного и корпускулярного излучения, которые имеют различную фазировку в 11-летнем цикле, также может привести к 5—6-летней цикличности. Имеются и другие возможности появления такой цикличности в метеорологических процессах, связанные, например, с автоколебаниями в системе подстилающая поверхность — атмосфера.

Таким образом, 11-летний цикл, несмотря на его большую мощность (вариация чисел Вольфа от 0 до 200 единиц), проявляется в климатических изменениях очень слабо. Следует также отметить, что слабая 11-летняя вариация обнаружена в параметрах межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра.

5.6. 22-летний цикл в климате Земли

22-летний цикл на Солнце, как уже указывалось, проявляется в смене знака полярности магнитных полей биполярных групп пятен в обоих полушариях Солнца. А. И. Олем и М. Н. Гневшевым обнаружена четкая связь между четными и следующими за ними нечетными циклами. Эта связь отражает магнитные свойства Солнца, свойства межпланетной среды и взаимодействие заряженных частиц с магнитными полями Солнца. Эффекты межпланетной среды в нижней атмосфере подтверждаются результатами А. И. Оля.

В табл. 5.2 показана средняя величина разности среднегодовых температур нескольких пунктов Европы ΔT , между четным и следующим за ним нечетным 11-летними циклами солнечной активности. Обращает на себя внимание полное соответствие в знаках величин изменений ΔT от четного к нечетному циклу. Коэффициент корреляции ΔW (чисел Вольфа) и ΔT более 0,9, но менее 0,1, если разности вычислялись между нечетными и следующими за ними четными циклами.

Таблица 5.2

Цикл СА	2—3	4—5	6—7	8—9	10—11	12—13	14—15	16—17
Де Билт	-0,5	0,4	-0,3	0,5	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3
Англия	-0,2	0,6	-0,4	0,0	-0,1	-0,5	-0,1	-0,3
Берлин	-0,4	0,8	-0,3	0,4	-0,2	-0,5	-0,3	0,1
Базель	-0,2	0,5	-0,5	0,2	0,1	-0,1	-0,3	-0,2
Женева	-0,2	0,4	-0,2	0,3	-0,1	0,0	-0,2	0,1
ΔT	-0,3	0,5	-0,3	0,3	-0,1	-0,25	-0,2	-0,15
ΔW	-13	33	-16	16	-2	-1	-8	-14

Подтверждением тому, что 22-летний цикл более четко проявляется в нижней атмосфере, чем 11-летний, могут служить многочисленные доказательства его наличия в циркуляционных показателях Западной Европы, Америки и Атлантики. В Западной Европе и прилегающих районах Атлантики отмечаются приблизительно 22-летние волны в числе наблюдаемых циклонов и антициклонов.

Показано, что в высоких широтах колебания барического поля складываются из семилетних волн стоячего типа, строго фиксированных относительно реперных фаз четного и нечетного 11-летних

циклов солнечной активности. Минимуму четного 11-летнего цикла отвечает максимум 11-летнего цикла в колебаниях атмосферного давления; максимуму 11-летнего цикла — минимум 7-летнего цикла атмосферного давления, через 4-5 лет после максимума четного 11-летнего цикла наступает максимум 7-летнего цикла атмосферного давления. В нечетном цикле 7-летние вариации атмосферного давления совершаются строго в противофазе по отношению к нечетному 11-летнему циклу. Четко указанные особенности изменения давления отмечаются в околополюсной зоне. К югу от узловой линии (субтропические и умеренные широты) колебания атмосферного давления протекают в противофазе по отношению к давлению высоких широт.

В работах Б. М. Рубашева зависящими от фазы 22-летнего цикла принимались 7—8 и 14-летние циклы. В работе Н. П. Смирнова и Э. И. Саруханяна причиной 14-летнего цикла считались биения, связанные с нутационными явлениями (7-летний цикл) и солнечной активностью (11-летний цикл).

Широкое исследование 22-летнего цикла провел Виллет. Он установил, что на ветви роста нечетных циклов зимой в высоких широтах преобладают полярные континентальные антициклоны, а в глубине континентов наблюдается теплое сухое лето. На ветви роста четных циклонов наступает усиление зональной циркуляции в низких широтах; пути циклонов в средних широтах смещаются к югу и в низких широтах наблюдается сырое холодное лето. Особенно четко отмечены закономерности над Северной Америкой и Атлантико-Европейским сектором. Картирование отклонений давления по восьми отдельным фазам 22-летнего цикла не дало статистически четкой картины, что связано, вероятно, с различной локализацией антициклонов от года к году.

Особенно четко 22-летняя цикличность обнаружена в осадках зернового пояса США. Сперва Боллинжер, а спустя 15 лет Томпсон установили отчетливый 22-летний цикл в осадках штатов Оклахома, Канзас и других. Засушливые годы в этих районах формируются вблизи минимумов 11-летних циклов при переходе от четных к нечетным циклам солнечной активности. Этот вывод был подкреплен анализом косвенных (дендрохронологических) данных о климате указанного района за последние три столетия (рис. 5.9).

Оценки вклада 22-летних циклов в изменчивость метеорологических характеристик весьма противоречивы. Максимальные значения достигают 50—80% от реально наблюдаемых многолетних колебаний приземного давления. Реалистическая средняя оценка вклада 22-летних циклов в изменчивость метеорологических характеристик вероятно не превышает 10% общей дисперсии. Причем оценка и характер связей будут существенно меняться в зависимости от различных факторов. Так, например, установлено более частое смещение Исландского минимума к Скандинавии в четном

цикле, чем в нечетном. Однако в течение 1923—1943 гг. 22-летнего долготного смещения Исландского минимума временно не наблюдалось. Таких примеров, когда происходили нарушения связей, можно привести много. Их причины рассмотрены выше.

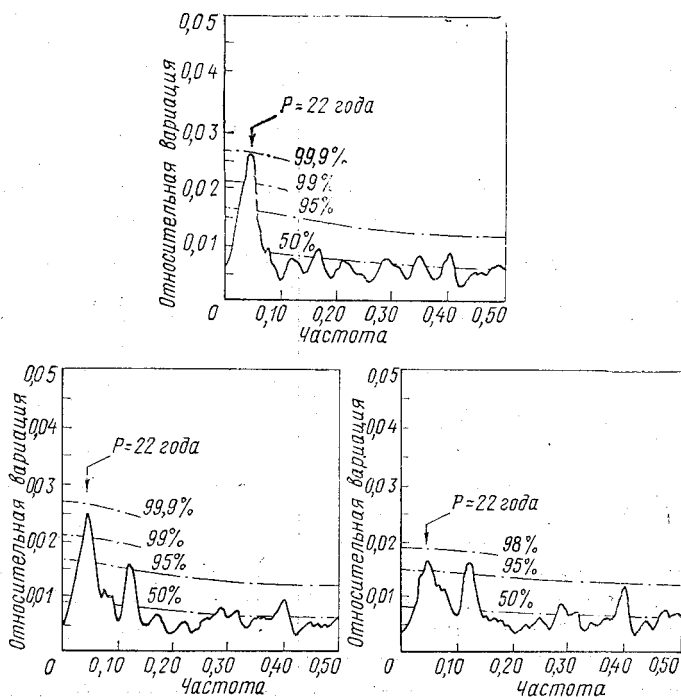


Рис. 5.9. Энергетические спектры индекса засушливости Пальмера для западной части США (район западнее р. Миссисипи)

5.7. Проявление вековых и сверхвековых циклов солнечной активности

Вековой (80—90-летний) цикл солнечной активности был открыт Вольфом во второй половине XIX столетия. Позже в работах Ю. И. Витинского, М. Копецкого и других показано, что этот цикл отличается от 11-летнего цикла в качественном отношении, так как он образуется долгосуществующими группами солнечных пятен.

Первые работы по выявлению этого цикла в гидрометеорологических процессах были выполнены И. В. Максимовым. Несколько позже Виллет установил, что в течение первой части векового

цикла солнечной активности развивается зональная циркуляция, в последней четверти развиваются блокирующие циклоны. Впоследствии им получен вывод о большом вкладе инсоляции в возрастание температуры низких широт от второй к третьей четверти 80—90-летнего цикла.

Ареалы вековой цикличности в различных районах земного шара установлены О. А. Дроздовым и Л. Г. Полозовой. В Евразии амплитуда векового цикла и его длительность увеличивается с юга на север, а в Америке наибольшая амплитуда и длительность цикла отмечается в южной половине континента. В Евразии и Северной Америке вековой цикл обнаруживается в районах, связанных с Северной Атлантикой. Мощный вековой цикл найден в Гонолулу в холодное время года.

Рассмотрение изменений температуры по девяти городам Северной Европы за 1775—1955 гг. показало, что для периодов низкой солнечной активности в вековом цикле температура оказалась равной $-0,15 \pm 0,07^\circ$, а для периодов высокой солнечной активности $+0,23 \pm 0,09^\circ$. Общая разница температуры Европы для различных фаз векового цикла составляет $0,38 \pm 0,08^\circ$.

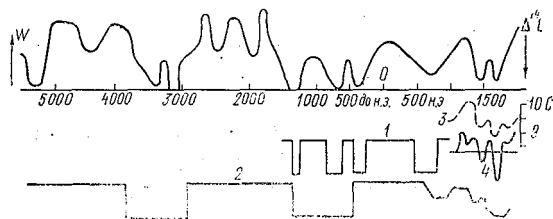


Рис. 5.10. Изменение климата и содержания радиоуглерода за последние 8000 лет:

1 — динамика ледников в Альпах по Ладури, 2 — динамика ледников на земном шаре; 3 — январская температура в Англии; 4 — суровость зим в Западной Европе.

Верхняя кривая демонстрирует изменение радиоуглерода $\Delta^{14}\text{C}$ и относительных чисел Вольфа

Поскольку данные инструментальных наблюдений, как правило, редко превышают 100 лет, то для выявления вековой и сверхвековой цикличности используются косвенные показатели климата (керна льда, дендрохронологические данные, отложение ила и т. д.). Анализируя керны гренландского льда, получена запись климата с 1240 по 1930 гг. и установлен 80-летний цикл в климате этого района. Показано наличие связи изменчивости ширины годовых колец пихты и ели за 550 лет в районе Шумавы (ЧССР) с вековым циклом солнечной активности. Годичные кольца были тоньше во время вековых максимумов солнечной активности. Выполнено сопоставление флуктуаций радиоуглерода (радиоактивный изотоп C^{14}) с изменениями климата Земли. На рис. 5.10 верх-

няя кривая воспроизводит кратковременные изменения концентрации радиоуглерода, полученные по древесным кольцам за последние 8000 лет. В течение первых 6000 лет происходило устойчивое понижение концентрации радиоуглерода. В последующие 2000 лет концентрация радиоуглерода нарастала до тех пор, пока этот процесс не был нарушен антропогенными факторами. Общее изменение радиоуглерода за 8000 лет хорошо отражает изменение магнитного момента Земли. За 5000 лет до нашей эры, когда напряженность магнитного поля Земли была минимальна, изотропный поток космических лучей, приходящих в атмосферу Земли, был усилен и концентрация радиоактивного углерода была почти в два раза выше, чем в начале нашей эры. Если исключить вариации радиоуглерода, обусловленные медленными изменениями магнитного поля Земли, то останутся вторичные кратковременные вариации. Последние хорошо связаны с запятненностью Солнца. Имеются обширные и разнообразные доказательства, что в 1120—1280 гг. наблюдался средневековой максимум солнечных пятен, а в 1400—1510 и 1640—1715 гг. соответственно Шпереровский и Маундеровский минимумы солнечных пятен и, наконец, с 1800-х гг. начался общий рост солнечной активности. Используя связь C^{14} с изменениями солнечной активности, Эдди восстановил ход солнечной активности с 5000 г. до нашей эры. Таким образом, верхняя кривая может являться одновременно и показателем изменения радиоуглерода и показателем изменений солнечной активности за последние 7000 лет. Ниже приводятся кривые движения ледников в Альпах по Ладуре (1), движения ледников на земном шаре по Дентону (2), январская температура в Англии (3), суровость зим в Западной Европе (4). Приведенные данные показывают хорошее согласие хода солнечной активности с характеристиками климата Земли. До Эдди аналогичные исследования провел Брей, из которых следует, что при большом масштабе осреднения можно получить тесную связь между запятненностью Солнца и температурой Земли. Это говорит о том, что поиски климатических следствий солнечной активности (особенно для больших масштабов времени) имеют больше оснований, чем в элементах погоды.

Большая эффективность вековых и особенно сверхвековых циклов солнечной активности в климате обусловлена их длительностью. Если фактор времени представить в качестве сомножителя, то он вошел бы в степени выше первой. Вторым аргументом является большая мощность явлений на Солнце, ответственных за существование векового цикла.

Синхронные изменения климата с большим периодом, как правило, охватывают большие площади земного шара, а в случае короткопериодных климатических изменений происходит перераспределение воздушных масс по земному шару и, как следствие, — асинхронное развитие атмосферных процессов в различных районах Земли.

В заключение назовем циклы в климате Земли, продолжительность которых составляет 180, 300, 400, 500—700 лет и более. Имеются предположения о их космическом происхождении, однако предстоит еще большая работа по обоснованию причин указанных циклов.

5.8. Изменение орбитальных параметров и климат Земли

В связи с изменением расстояния между Землей и Солнцем количество радиации, падающей на внешнюю границу атмосферы, изменяется в течение года на 7%. Земля вращается вокруг Солнца по своей орбите так, что ось вращения образует с плоскостью орбиты угол около $66,5^\circ$. Наклон оси вращения обуславливает смену времени года, а также продолжительность дня на заданной широте. При среднем расстоянии от Земли до Солнца полный поток лучистой энергии Солнца I_0 на перпендикулярную к лучам единичную площадку всей атмосферы составляет $1360 \pm 20 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Поскольку, как правило, лучи падают наклонно, то больший интерес представляет величина притока тепла на горизонтальную площадку, т. е. инсоляция. Инсоляция на верхней границе атмосферы является функцией широты и времени года.

Из-за разницы расстояния Земли от Солнца имеет место асимметрия в сезонной инсоляции северного и южного полушарий; однако в целом за год на одинаковых широтах северного и южного полушарий инсоляция одинакова.

Сезонность солнечного климата характеризуется разностью сумм инсоляции за летний (весна — лето) и зимний (осень — зима) сезоны:

$$W_S - W_W = I_0 T_0 \frac{\sin \varphi \sin \varepsilon}{\pi \sqrt{1 - e^2}}. \quad (5.12)$$

Эта разность зависит от светимости Солнца и широты места, периода обращения Земли вокруг Солнца (T_0), наклона экватора к эклиптике (ε) и эксцентриситета (e).

М. Миланкович впервые почти полвека тому назад рассмотрел вариации орбитальных параметров как климатообразующий фактор. Он ввел понятие калорического полугодия как полугодия одинаковой продолжительности $T_0/2$, когда на данной широте любое значение суточной инсоляции в летнее полугодие больше любого значения суточной инсоляции в зимнее полугодие.

Суммы тепла за калорические полугодия зависят на данной широте от наклона оси вращения Земли и элементов орбиты:

$$\begin{aligned} Q_S &= \frac{I_0 T_0}{2\pi} \left(S(\varphi, \varepsilon) + \sin \varphi \sin \varepsilon - \frac{4}{\pi} e \sin \Pi \cos \varphi \right), \\ Q_W &= \frac{I_0 T_0}{2\pi} \left(S(\varphi, \varepsilon) - \sin \varphi \sin \varepsilon + \frac{4}{\pi} e \sin \Pi \cos \varphi \right), \end{aligned} \quad (5.13)$$

где Π — долгота перигелия.

Изменения ϵ и $e \sin P$ происходят под влиянием действия на Землю сил притяжения других планет. Для каждой широты планетные возмущения не меняют в целом годичной суммы солнечного тепла, но приводят к изменениям распределения тепла по широтам и по сезонам года.

Миланкович выделил четыре цикла в изменении орбиты Земли: длительностью 23 тыс. лет, приводящих к изменениям времени наибольшего сближения Земли и Солнца (в настоящее время Земля и Солнце максимально сближены в январе, а через 10 тыс. лет это будет в июле); длительностью 41 тыс. лет, за которые наклон оси Земли относительно плоскости орбиты меняется от $21^{\circ},8$ до $24^{\circ},4$, что приводит к изменению контрастности между временами года; циклы продолжительностью 93 и 413 тыс. лет, за которые орбита из почти правильной окружности превращается в эллиптическую, что приводит к изменениям в расстояниях между Солнцем и Землей, влияющим на времена года.

Исходя из этих соображений, Миланкович объяснил изменение климата в плейстоцене. Последующие работы других авторов показали, что циклы изменения орбитальных параметров Земли отмечаются в характеристиках климата плейстоцена.

Серьезным возражением против астрономической теории может являться то, что колебания наклона ϵ и параметра земной орбиты $e \sin P$ имели место во все астрономические времена, а ледниковые эпохи занимали лишь относительно непродолжительные периоды времени, разделенные интервалами в сотни миллионов лет. В этой связи Бачак предположил, что относительно сильные колебания ϵ и $e \sin P$ возникают лишь тогда, когда восходящие узлы орбит всех семи главных планет находятся на эклиптике близко друг от друга. Однако это предложение Бачака позволяет понять изменения климата в неогене и четвертичном периоде, в которых по расчетам Шараф и Будниковой колебания ϵ , $e \sin P$ и инсоляции все время имели один и тот же характер, тогда как оледенения возникли только в плейстоцене. Существует иное предположение, согласно которому пока температура высока, климат изменяется аperiodически, мало реагируя на колебания инсоляции; при низких температурах он сильно реагирует на эти воздействия, приходя в режим вынужденных колебаний. Это предположение подтверждают некоторые геологические и гляциологические исследования, приведенные в работе Сергиных. Кроме того, ее авторы построили модель колебаний климата, в которой при высоких температурах имеется только одно инерциональное звено — океан, что удерживает ее в аperiodическом режиме, а при низких температурах включается и второе инерциональное звено — оледенение, что переводит модель в колебательный режим. Что же касается плавных изменений температуры за время порядка 10^7 лет, то объяснение им нужно искать отдельно.

Согласно одной из моделей, продвижение ледового покрова может достигать 50° с. ш., если инсоляция летом выше этой ши-

роты падает на 2% по сравнению с современным значением. Кроме того, на основе этой модели показано, что температура поверхности Земли наиболее подвержена влиянию сезонных вариаций инсоляции во внутренних районах Северной Америки и Евразии и что самая высокая чувствительность к изменениям инсоляции наблюдается осенью.

Наряду с возмущениями $\approx 10^4 - 10^5$ лет параметры земной орбиты и наклон земной оси вращения испытывают также короткопериодические возмущения с периодами порядка десятков лет. Однако амплитуды этих колебаний чрезвычайно малы. При рассмотрении связи таких колебаний с изменением климата Земли следует выделить изменения угла θ наклона плоскости земного экватора к фиксированной эклиптике. Расчеты показывают, что доминирующий вклад в изменение угла θ вносит Луна. Основной эффект создает вращение линии узлов лунной орбиты, обратное движению Луны по орбите и имеющее период приблизительно 18,6 лет (оно создается возмущающим действием Солнца на движение Луны). Расчеты и подтверждающие их астрономические наблюдения дают для амплитуды колебаний угла θ значение $9''$, 210 ; точнее, движение полюса мира на небесной сфере происходит по испытываемому равномерное вращение вокруг полюса эклиптики маленькому эллипсу с направленной на полюс эклиптики большой полуосью в $9''$, 210 и малой полуосью в $6''$, 86 . Такое движение полюса мира по эллипсу называется нутацией (в это понятие часто включают и другие периодические колебания земной оси).

Изучение многолетних изменений некоторых характеристик гидросферы и атмосферы, выполненное рядом ученых, показало, что в их изменениях существует некоторая квазигармоническая составляющая, характеризующаяся периодами 17—22 года. Такие 19-летние вариации могут являться результатом существования в Мировом океане 19-летнего лунного прилива. Изучение колебаний уровня приливов за последние 60 лет показало, что их величина весьма значительна. Так, разность уровней на широтах 45° и 75° колебалась от -65 мм до $+65$ мм.

Во всех указанных выше работах принималось, что солнечная постоянная неизменна. В настоящее время имеются некоторые основания выразить сомнение относительно стабильности солнечной постоянной в геологическом и историческом прошлом, что позволит в будущем рассмотреть этот вопрос с учетом новых представлений.

Следует также отметить, что похолодание климата и наступление ледников совпадают по времени не только с максимальным эксцентриситетом земной орбиты, но и с изменением характеристик геомагнетизма. Отсюда делается вывод, что параметры циклов Миланковича, определяющие периоды оледенений, связаны как с условиями инсоляции, так и с геомагнитными эффектами. А это значит, что инсоляционная гипотеза Миланковича о причинах возникновения оледенений является лишь частным решением проб-

лемы. Обнаруженная периодичность изменений магнитного накло-
нения может быть косвенным свидетельством связи между коле-
банием эксцентриситета Земной орбиты и изменениями внутри
Земли.

Следовательно, такой физический процесс, как изменение инсо-
ляции, не может быть признан единственной внешней причиной
колебаний климата. Это особенно справедливо, если рассматрива-
ются причины колебаний климата в других временных масштабах.

5.9. Некоторые предпосылки учета солнечной активности в прогнозах погоды и теории климата

Подбор лет-аналогов по фазам солнечной активности, экстра-
поляция ранее выявленных закономерностей связи Солнце — ниж-
няя атмосфера, учет влияния солнечной активности на устойчи-
вость внутриатмосферных связей, а также на оправдываемость
прогнозов погоды, составленных различными методами, — далеко
не полный перечень приемов и методов, которые были использо-
ваны в практике. И все же в настоящее время можно говорить
лишь об ориентирующей, а не определяющей роли солнечной ак-
тивности в прогнозах погоды, поскольку обеспеченность исполь-
зуемых связей невелика.

Рассмотрим результаты, методы и приемы учета солнечной ак-
тивности при прогнозировании погоды и изменении климата.

Большое число работ выполнено по подбору фазовых аналогов
солнечной активности. Рассмотрены аномалии различных гидро-
метеорологических характеристик по фазам 11-летнего, 22-летнего
и векового циклов солнечной активности и подобраны годы-ана-
логи по солнечной активности, которые использовались при прог-
нозировании изменений климата.

В ряде работ Т. В. Покровской и других авторов выбор прог-
ностических связей показателей атмосферной циркуляции с харак-
теристиками экстремальных явлений осуществляется для отдель-
ных фаз 11-летних циклов солнечной активности.

Как уже указывалось, характер связей Солнце — атмосфера
отличается нестабильностью, что приводит к тому, что прогнозы,
основанные на учете воздействия солнечной активности, зачастую
оказываются неудовлетворительными. Однако отмечаются и инва-
риантные связи. Примером таких связей может служить установ-
ленное Т. В. Покровской наступление сильных засух на ЕТС на
восходящей ветви или максимуме K_p , а в Казахстане — на нисхо-
дящей ветви или минимуме. Приуроченность засух в Казахстане
и Западной Сибири к годам минимума 11-летнего цикла солнечных
пятен — хорошо установленный факт. Вероятность случайности та-
кого распределения засух в 11-летнем цикле менее 5%. Указанные
связи широко использовались Т. В. Покровской и М. Х. Байдалом
при прогнозировании засух. Однако обеспеченность указанных свя-

зей менее 35%, что явно недостаточно для составления прогнозов, базируясь только на солнечно-атмосферных связях.

Одна из ярких закономерностей, заслуживающая внимания при составлении прогнозов экстремальных явлений, обнаружена в работах Пальмера, Томсона, Митчела и многих других. Это 20—22-летняя цикличность в повторяемости засух в зерновом поясе США за большой период времени. Засухи в этом районе отмечаются в промежуток времени между максимумами четного и нечетного циклов.

Особенно много попыток прогноза с учетом солнечной активности было сделано при выделении структурных элементов (циклов) и экстраполяции этих составляющих. При этом успешность снижается по мере увеличения периода экстраполяции, поскольку со временем связи прошлого с будущим постепенно размываются за счет включения новых факторов или изменения характера их действия.

При таких подходах к прогнозированию используются различные методы выделения скрытых периодичностей (периодограмм-анализ, гармонический анализ, спектральный анализ). Выделенные солнечнообусловленные составляющие и составляющие другой природы экстраполируются на будущее. Эти методы были названы в работах И. В. Максимова и его учеников генетическими. Принцип генетических методов состоит в предвычислении или прогнозе индекса возмущающей силы и последующем переходе к прогнозу гидromетеорологических процессов. Предпосылкой этого метода является представление об однозначной причинности в природе (одинаковые причины при одинаковых обстоятельствах должны приводить к одинаковым результатам), т. е. детерминированности природных процессов.

Ю. М. Алехин развивает другие подходы, где предлагает отказаться от учета каких-либо причин и перейти к представлению о таком происхождении гидromетеорологических процессов, когда любое явление может быть представлено суммой очень большого числа элементов случайности. Таким образом, Ю. М. Алехин считает, что все множество внешних причин во всем многообразии их случайных сочетаний запечатлено в самих процессах, поэтому они должны являться основными объектами исследования.

При современном уровне знаний оба подхода имеют право на развитие. Однако в будущем генетические подходы к прогнозированию погоды должны доминировать.

Несколько иные идеи развивает И. П. Дружинин. Он предложил качественную схему прогноза с заблаговременностью в один год. При этом он использовал свойство последовательного повышения и понижения интенсивности природных процессов и показал, что в каждом следующем году может быть три возможности: сохранение существующей тенденции, сохранение прежних показателей, перелом тенденции. Для практического использования такого подхода по многолетним рядам определяются безусловные

вероятности появления различных серий. Автор с целью повышения надежности прогноза привлек информацию о резких изменениях солнечной активности, которые совпадали с переломами гидрометеорологических процессов.

Другой аспект рассматриваемого вопроса представляет собой учет влияния солнечной активности на оправдываемость прогнозов погоды, составленных другими методами. Динис привел данные по оправдываемости месячных аномалий температуры и осадков в ФРГ в связи с изменчивостью относительных чисел Вольфа. Оправдываемость прогнозов была максимальной в годы высокой солнечной активности. Т. В. Покровская проанализировала данные по оправдываемости прогнозов знаков аномалий температуры на ЕТС и подтвердила это правило (рис. 5.11). Зависимость оправдываемости прогнозов от фазы 27-дневного цикла установлена в работе Б. М. Рубашева.

По данным В. Ф. Логинова неудачные прогнозы увлажненности в бассейнах рек Рейн, Дунай, Днепр и Дон, составленные с учетом сохранения структурных элементов-циклов чаще приходилось на минимум и первый год после минимума, а также на первый год после максимума 11-летнего цикла, т. е. переломные годы 11-летнего цикла.

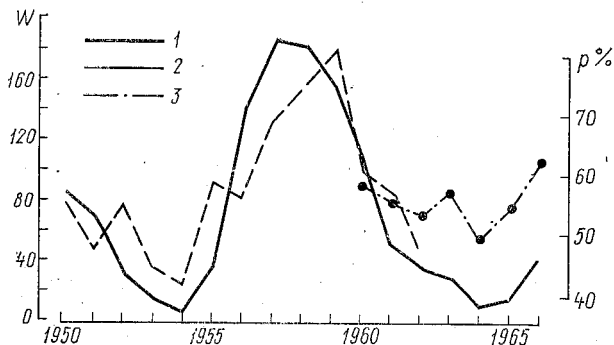


Рис. 5.11. Ход относительных чисел Вольфа W (1) и оправдываемости прогнозов температуры, составленных Э. Динисом (2) и Т. В. Покровской (3)

Попытки учета солнечной активности в численных моделях общей циркуляции атмосферы и климата были сделаны сравнительно недавно. Некоторые примеры учета солнечной активности в моделях общей циркуляции атмосферы и климата приведены в следующей главе.

Глава 6. ВОЗМОЖНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПОГОДУ И КЛИМАТ

К настоящему времени предложен ряд возможных механизмов воздействия космических факторов на нижние слои атмосферы.

1. Механизмы, основанные на представлении об изменении солнечной постоянной и инфракрасного излучения, которое увеличивается во время геомагнитных бурь.

2. Механизм, связанный с воздействием солнечной активности на параметры атмосферного электричества.

3. Конденсационный механизм.

4. Озонный механизм.

5. Механизмы, предполагающие гидродинамическое взаимодействие верхних и нижних слоев и поглощение возмущающих агентов в мезосфере и выше.

6.1. Механизмы, связанные с изменением солнечной постоянной

Наиболее просто можно понять механизм, основанный на изменении солнечной постоянной. Зависимость между изменениями глобальной поверхностной температуры ΔT и солнечной постоянной ΔS_0 можно записать в следующей форме:

$$\Delta T = \beta_{S_0} \cdot \Delta S_0,$$

где β_{S_0} — коэффициент чувствительности климатической системы. Известно, что чувствительность (β_{S_0}) глобальной поверхностной температуры к изменению общего солнечного излучения в зависимости от типа и полноты моделей, степени учета обратных связей меняется на порядок

$$0,03 \text{ град} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \leq \beta_{S_0} \leq 0,3 \text{ град} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$$

Если исходить из нижнего предела, то вариации солнечной постоянной на 2% ($\sim 27 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) необходимы для объяснения изменения глобальной температуры на 1°. Если же верхний предел ближе к реальности, то изменения S_0 на 0,2% в течение нескольких лет могут объяснить такие флуктуации климата. Таким образом, в связи с инерционностью земной климатической системы изменения солнечной постоянной на величину порядка 0,1% могут быть существенными для климата Земли.

Для временных интервалов от месяца до года климатически значимые изменения солнечной постоянной составляют десятые доли процента, а для промежутка несколько дней — около 1% и более. Следовательно, роль притоков тепла от внешних источников становится доминирующим фактором изменения климата. Как показано ранее, изменение солнечной постоянной приблизительно на 0,1% имеет место, что позволяет рассматривать этот механизм как физически обоснованный.

В работе М. Н. Маркова и других авторов в качестве агента принималось инфракрасное излучение ионосферы ($\lambda = 1 - 10$ мкм). Это излучение генерируется на высотах более 120 км в основном возбужденными молекулами NO и ионами NO⁺. Инфракрасное излучение поглощается в тропосфере, что приводит к неравномерному нагреванию нижней атмосферы. Привлекательность гипотезы о взаимодействии ИК излучения на погоду и климат связана с тем обстоятельством, что в этом случае не требуется учитывать малоэффективных термодинамических механизмов передачи возмущения сверху вниз.

Особенно трудно понять с позиций современной метеорологии короткопериодные изменения в атмосфере, связанные с приходом электромагнитного излучения и заряженных частиц.

В этой связи при разработке механизмов влияния космических агентов на нижнюю атмосферу для объяснения короткопериодных вариаций речь должна идти только о преобразовании энергии, накопленной атмосферой. Принимая малость влияния магнитосферных процессов на нижнюю атмосферу, таких как: взаимодействие солнечной плазмы с геомагнитным полем, геомагнитные бури; магнитосферная конвекция, вторжение частиц в полярный овал, вторжение магнитосферной плазмы через магнитосферную щель, бомбардировка солнечными протонами полярных шапок и понимая сложность передачи возмущения из верхних слоев (термосферы) в нижние, можно допустить возможность влияния магнитосферных процессов на нижнюю атмосферу через различного рода триггерные механизмы. Более обоснованными при этом представляются механизмы, связанные с агентами, которые поглощаются в стратосфере. Такими агентами являются коротковолновая радиация Солнца и радиация, возникающая во время полярных сияний при высыпании энергичных электронов в высокие широты, а также космические лучи солнечного и галактического происхождения.

Энергия, приносимая частицами высоких энергий, примерно на 6—10 порядков меньше энергии, приносимой корпускулярными потоками. Однако частицы низких энергий влияют, в основном, на ионизацию и нагревание термосферы и отдают свою энергию в высоких широтах, тогда как частицы высоких энергий вторгаются в нижнюю атмосферу любых широт. Естественно, что частицы высоких энергий в силу малой вносимой в атмосферу энергии не способны приводить к ощутимому нагреванию стратосферы и верхней тропосферы. Однако имеются некоторые заслуживающие внимания механизмы внешних влияний, которые связаны с космическими лучами.

6.2. Механизм, связанный с воздействием солнечной активности на параметры атмосферного электричества

К объяснению короткопериодной изменчивости в нижней атмосфере может быть привлечен механизм, связанный с изменением

электрических параметров нижней атмосферы. Причинами, по которым этот механизм способен вызывать короткопериодные изменения, могут быть следующие.

1. Реакция электрических характеристик на проявления солнечной активности оказывается практически немедленной.

2. Нет необходимости в притоке больших количеств энергии в нижнюю атмосферу, поскольку источником энергии является скрытое тепло конденсации, которое выделяется на таком уровне в тропосфере, где погодообразующие процессы оказываются подверженными непосредственному воздействию электрического поля.

3. Вариации электрического поля проявляются во всей толще атмосферы.

4. Ионизация является единственным процессом, непосредственно контролируемым солнечной активностью.

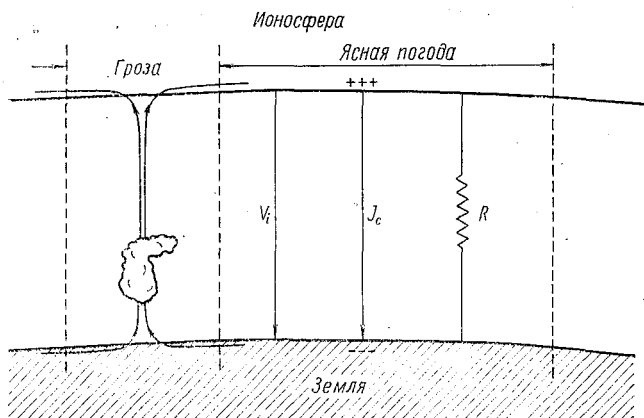


Рис. 6.1. Качественная модель глобальной электрической цепи при образовании грозы:

V_i — потенциал ионосферы; J_c — плотность тока атмосферы — Земля; R — полное сопротивление атмосферы

Поскольку ионосфера и поверхность Земли являются значительно лучшими проводниками, чем нижняя атмосфера, то их можно рассматривать как области однородного электрического потенциала. Эти области образуют обкладки сферического конденсатора, внутри которого расположена атмосфера, имеющая плохую проводимость. Качественная модель глобальной электрической цепи при образовании грозы, представлена на рис. 6.1.

Градиент потенциала (E), называемый атмосферным электрическим полем в среднем в областях хорошей погоды равен $130 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ на уровне моря. Градиент потенциала изменяется обратно пропорционально уровню проводимости воздуха, а сама проводимость (σ) растет с увеличением высоты. На высоте 50 км градиент по-

тенциала уже практически равен нулю. Градиент потенциала, а также плотность тока атмосфера — Земля пропорциональны числу гроз на планете. Обычно грозу рассматривают в качестве генератора, поддерживающего зарядку сферического конденсатора атмосфера — Земля.

Малые ионы, имеющиеся в атмосфере, обуславливают слабую проводимость воздуха. Она обеспечивается естественной радиоактивностью почвы и космическими лучами.

Основная взаимосвязь между проводимостью, градиентом потенциала и плотностью тока атмосфера — Земля выражается законом Ома

$$j_c = \sigma E. \quad (6.1)$$

Поскольку σ и E противоположным образом зависят от высоты, то плотность тока почти не зависит от высоты.

Плотность тока атмосфера — Земля (ток проводимости) можно представить в виде

$$j_c = V_i/R_H, \quad (6.2)$$

где R_H — сопротивление столба атмосферы ($\text{Ом} \cdot \text{м}^{-2}$) от Земли до электросферы. Оно определяется как

$$R_H = \int_0^H \left(\frac{1}{\sigma_h} \right) dh. \quad (6.3)$$

Влияние солнечной активности на проводимость можно показать следующим образом. Напишем выражение для проводимости

$$\sigma = \sum_j n_j e \mu_j, \quad (6.4)$$

где n_j и μ_j — плотность и подвижность каждого сорта (j) носителей заряда соответственно; e — заряд носителя.

$$\mu_j = e/m_j \nu_{ij}, \quad (6.5)$$

где m_j — масса j -го носителя; ν_{ij} — частота столкновения одного носителя заряда с остальными (i).

В условиях квазиравновесия и зарядовой нейтральности плотность ионов какого-либо знака связана со скоростью образования пар ионов

$$n_j = (Q_j/\alpha_j)^{1/2},$$

где α_j — эффективная скорость рекомбинации между j -м ионом и всеми другими ионами противоположного знака. Тогда проводимость можно получить из соотношения

$$\sigma = \sum_i \sum_j \frac{e^2}{m_j \nu_{ij}} \left(\frac{Q_j}{\alpha_j} \right)^{1/2}. \quad (6.6)$$

Приближенные расчеты можно выполнить опустив символы сумм и индексы. Следует отметить, что проводимость растет как корень квадратный из скорости ионообразования (Q). Поскольку Q изменяется с уровнем солнечной активности, определяемой действием космических лучей, выпадающих электронов и связанных с ними рентгеновских лучей, то на этом основании можно считать, что солнечная активность влияет на проводимость σ . Как уже указывалось, экспериментальные данные свидетельствуют о влиянии солнечной активности на электрическое поле. После солнечных вспышек плотность тока атмосфера — Земля увеличивается на 12—50%. Это происходит практически одновременно с увеличением напряженности электрического тока на высоте 3 км на 30—60%. Увеличение плотности тока следует из уравнения (6.2), поскольку возрастание потенциала ионосферы на 50% после вспышки приводит к увеличению плотности тока при условии, что сопротивление столба атмосферы остается постоянным. Однако во время крупной вспышки происходит уменьшение сопротивления на 1—2%, что приводит к еще большему увеличению плотности тока.

Для того чтобы объяснить связи возмущений на Солнце и грозовой активности, необходимо прежде всего выявить процесс, с помощью которого слабая электризация облаков вызывает осаждение водяных капель. Принято считать, что у вершины грозового облака существует избыток положительных зарядов, а вблизи его основания — избыток отрицательных. Между этими областями располагается область перемешивания зарядов. Эта классическая модель дополнена отрицательно заряженными экранирующим слоем над вершиной облака и слоем положительных зарядов ниже области отрицательных ионов. Имеется много теорий электризации, однако до сих пор нет объяснения причин начала процесса электризации. Одной из причин может быть изменение атмосферного электричества, связанное с воздействием космических лучей. При этом подразумевается, что метеорологические условия, необходимые для образования грозы, имеются, а увеличение напряженности электрического поля, модулируемое внешними факторами, увеличивает вероятность возникновения грозы. Так, усиленное электрическое поле способствует слиянию очень малых капель воды, увеличивая частоту их соударений, а также приводит к уменьшению времени, необходимого для достижения полем значения, характерного для грозовых разрядов.

Приведем некоторые другие примеры воздействия внешних факторов на электрические параметры атмосферы.

Экспериментальные исследования показали, что на высоте 30 км вклад ионосферных и магнитосферных процессов в изменчивость электрических полей соизмерим с вкладом грозовой активности. Доказано существование связи между возмущениями атмосферного электричества в высоких широтах и геомагнитными бурями. Эта связь может объясняться непосредственным проникновением в нижнюю атмосферу ионосферных электрических полей,

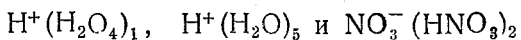
а также колебаниями проводимости атмосферы и высоты электросферы. В работе американского исследователя Парка приведены первые прямые доказательства влияния протонных вспышек на атмосферное электрическое поле и дана модель влияния солнечных протонов на вертикальное электрическое поле. Показано, что вариации вертикального электрического поля на высоте 30 км находятся в обратной зависимости от интенсивности солнечных протонов. Полученный эффект связан с возрастанием электрической проводимости в результате ионизации солнечными протонами. В течение солнечной вспышки высокоширотные районы будут иметь меньшее общее сопротивление между Землей и ионосферой, чем в низкоширотных районах. Это может привести к увеличению на несколько процентов в электрическом поле облаков. В частности, обнаружено статистически значимое увеличение индекса грозовой активности на станциях США через три дня после месячного максимума интенсивности галактических космических лучей и через два-три дня после месячного минимума K_p .

Квазистатистическая модель глобального атмосферного электричества предложена в работе Робла и Ханса. Рассматривается математическая процедура связывания электрического потенциала (Ψ) хорошей погоды, обусловленного глобальным грозовым генератором, с электрическим потенциалом $\Delta\Psi$, создаваемым верхнеатмосферными генераторами. Представлен метод расчета последствия возмущений Ψ для нижней атмосферы. Воздействие $\Delta\Psi$ отчетливо проявляется в высоких широтах. В этих широтах часть градиента потенциала V' электрического поля атмосферы у поверхности Земли и плотности вертикального электрического тока, обусловленная действием верхнеатмосферных генераторов, может достигать $\pm 20\%$ от V' и j_c , обусловленных глобальным грозовым генератором. При магнитных возмущениях эта часть возрастает и воздействие верхнеатмосферных генераторов простирается по направлению к экватору. Эта модель, таким образом, объясняет приведенные ранее экспериментальные данные о связи параметров атмосферного электричества с интенсивностью высокоэнергичных протонов и протонов геомагнитных бурь.

Имеется определенная связь рассмотренного механизма с конденсационным механизмом.

Для конденсации на ионах, как известно, не требуется больших перенасыщений атмосферы водяным паром. Особую роль при этом играют кластерные ионы. Кластеризация, как указывает Ф. Арнольд, способствует стабилизации ионов, препятствующей нейтрализации, а следовательно, формированию устойчивых пар ионов. Первые одновременные измерения состава положительных и отрицательных ионов в стратосфере (на высоте около 36 км) обнаружили присутствие компонентов, которые более устойчивы, чем предсказанные теоретически. Это привело к необходимости изучения роли пар ионов в образовании аэрозоля. Устойчивые пары ионов образуются в случае рекомбинации более сложных кластер-

ных ионов. Благодаря большому дипольному моменту такого рода пар может возникнуть процесс последовательного присоединения к ним свободных ионов и образования многоионных комплексов, сходных по своей природе с ионными кристаллами или частицами солей



Альтернативным механизмом роста многоионных комплексов (МИК) является взаимное слияние. Следует учесть также возможность коагуляции МИК с частицами аэрозоля. Таким образом, формирование и рост МИК представляет собой вероятный механизм трансформации газа в частицы, который не требует конденсации и, следовательно, не связан с необходимостью наличия пересыщенных газовых компонентов. Если, однако, такие компоненты (например, пары серной кислоты) существуют, МИК, достигающие достаточно больших размеров, могут выполнять функцию ядер конденсации. Если роль МИК в образовании стратосферного аэрозоля окажется существенной, это будет иметь важное значение для механизма влияния солнечной активности на атмосферу. Приведем ряд других аргументов в пользу существования этого механизма.

Известно, что уровень ионизации нижней стратосферы меняется на 60—70% при переходе от максимума к минимуму солнечной активности и связан с изменением режима облучения атмосферы космическими лучами. Атмосферные ионы могут служить ядрами конденсации для облаков верхнего яруса, так как на ионах конденсация осуществляется при меньших перенасыщениях воздуха водяным паром. Известна способность космических лучей превращать переохлажденную воду в лед. Наличие существенной концентрации ионов в области образования стратосферных облаков обнаружено при ракетных запусках. Об этом же свидетельствует большая напряженность электрического поля в нижней и средней стратосфере, источник которой связан либо с магнитосферой, либо с космическими лучами.

Этот механизм реален для формирования мезосферных стратосферных облаков и облаков верхнего яруса в тропосфере. Появление перистой облачности, как показывают работы Е. П. Борисенкова, приводит к появлению больших изменений термодинамического режима тропосферы (изменение вертикальных движений, давления и т. д.). Облачность модулирует интенсивность солнечного излучения в видимом диапазоне.

Согласно Олсону и Робертсу слой перистых облаков может вызвать нагревание воздуха со скоростью 1°C в сутки в верхней тропосфере на высоких широтах. Тепловая энергия, излученная земной поверхностью, будет экранироваться облачным слоем, что и приведет к нагреванию тропосферы.

Влияние заряженных частиц на формирование стратосферных облаков иллюстрируется рис. 6.2.

На рис. 6.3, *а* показан ход индекса C_9 до и после реперной даты, на рис. 6.3, *б* ход индекса A_p , а на рис. 6.3, *в* средняя кривая нормированных значений индексов C_9 и A_p . Прямые линии показывают среднюю квадратическую ошибку средних значений геомагнитных индексов. Как видно из рис. 6.3, стратосферные облака появляются после низкой геомагнитной активности, когда приток космических лучей увеличивается в область высоты образования стратосферных облаков.

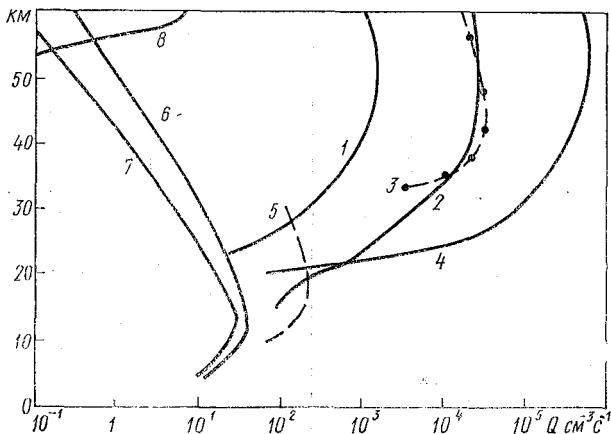


Рис. 6.2. Скорость ионообразования (Q) солнечными протонами (1—5), галактическими космическими лучами (6, 7) в минимуме (6) и максимуме (7) солнечной активности, а также выпадающими электронами (8): 1—2 ноября 1969 г.; 2—4 августа 1972 г. в 15—16 ч по Гринвичу, 3—4 августа 1972 г. в 15 ч 08 м; 4—4 августа 1972 г. в 22 ч; 5—29 сентября 1961 г.

А. А. Дмитриев показал, что колебания рентгеновского излучения Солнца приводят к изменению облачности. Максимум в изменении глобальных полей облачности в апреле—сентябре 1968 г. отмечался на следующий день после вспышки. Проведенное А. А. Дмитриевым в лабораторных условиях облучение ультрафиолетовой радиацией водяного пара привело к формированию тумана в камере. Еще раньше он обратил внимание на то, что с увеличением солнечной активности увеличивается количество осадков в тех районах, где преобладает влажно-устойчивое состояние. Такое поведение осадков указывает на то, что с усилением солнечной активности увеличивается коэффициент вертикального перемешивания.

Кроме ядер конденсации, создаваемых в результате воздействия ионизирующих космических излучений, их источником могут быть метеоры и космическая пыль. Боуэн, Оливер, А. А. Дмитриев установили зависимость выпадения осадков от крупных метеорных потоков. Запаздывание различных индексов, характеризующих частоту выпадения осадков либо площадь, на которой выпадают осадки безотносительно их интенсивности, в среднем составляет около 30—35 суток, что соответствует скорости осаждения космических частиц из термосферы в тропосферу. Таким образом, конденсационный механизм является одним из реальных механизмов солнечно-атмосферных связей.

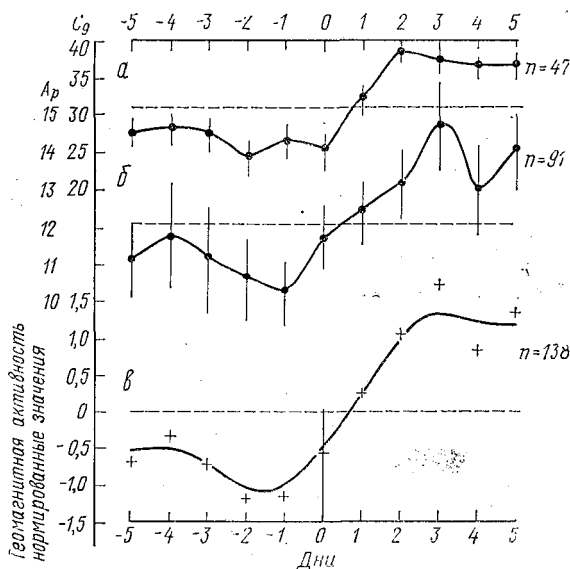


Рис. 6.3. Изменение индексов геомагнитной активности C_9 (а), A_p (б) и нормированных значений C_9 и A_p (в) до и после появления стратосферных облаков

6.3. Озонный механизм воздействия космических факторов на нижнюю атмосферу

Концентрация озона в стратосфере зависит от интенсивности вариаций ультрафиолетового излучения в различных длинах волн. Если ультрафиолетовое излучение с $\lambda < 230$ нм приводит к диссоциации кислорода и возрастанию содержания озона, то возрастание излучения в области больших длин волн (полосы Хартли и Хюггенса) приводит к повышению температуры и разрушению озона.

Ультрафиолетовая радиация (УФР) с длиной волны $\lambda < 400$ нм очень сильно поглощается озоном. До поверхности Земли проникает лишь УФР с $\lambda > 280$ нм. Озон поглощает также излучение с длиной волны до 1140 нм, но со значительно меньшей интенсивностью.

Отправным пунктом физики озона является теория фотохимического равновесия, которая была создана Чемпеном и усовершенствована Дютшем, Крутценом, Хантом и другими. Озон образуется при тройном столкновении



где M — любая частица, которая может воспринимать при столкновении кинетическую энергию.

В последнее время фотохимическая теория была усовершенствована посредством учета реакции кислорода и озона с водяным паром. В реальной азотно-кислородно-водородной стратосфере учитывается несколько десятков реакций, описывающих изменения концентрации O_3 . Относительный вклад различных фотохимических реакций зависит от концентрации NO_x , H и HO_x , которые еще недостаточно известны. Окислы азота активно разрушают озон в нижней стратосфере, а окислы водорода — в верхней. Увеличение HO_x за счет повышения влажности уменьшает плотность O_3 и увеличивает концентрацию HNO_3 , а следовательно, уменьшает скорость разрушения озона. Следует отметить, что недостаточное значение констант реакций, протекающих в атмосфере Земли, а также изменений радиации в различных диапазонах длин волн затрудняют дальнейшее усовершенствование фотохимической теории озона.

Из других проблем в физике озоносферы следует отметить проблему корпускулярного источника озона. Известны работы, где показано, что при вторжении жестких электронов с начальной энергией $E_0 = 1$ МэВ имеет место максимум диссоциации на высоте около 60 км, а при $E_0 = 100$ МэВ — на высоте около 20 км. Вторжение потока жестких электронов с энергией 1 МэВ увеличивает концентрацию O_3 на высотах более 60 км, причем возрастание концентрации O_3 будет наибольшим на высотах 60—70 км. Такой корпускулярный слой озона будет образовываться только в зоне полярных сияний. В последние годы Р. Гольдберг и другие показали, что рентгеновское излучение, возникающее во время полярных сияний, приводит к изменению содержания озона в мезосфере. Недавние результаты Торна свидетельствуют в пользу сильного влияния релятивистских электронов: происходит образование молекул O_x и OH , которое обуславливает каталитическое разрушение озона. Экспериментально установлено, что электроны наиболее высоких энергий и тормозное рентгеновское излучение могут проникать на высоты до 30 км. Таким образом, в мезосфере и верхней стратосфере высоких широт влияние этих источников на кон-

центрацию озона в холодное время года может быть определяющим.

В последнее время широко обсуждается вопрос изменения содержания озона в связи с интенсивностью космических лучей галактического происхождения, которые имеют наибольшую интенсивность в минимуме 11-летнего цикла солнечной активности. Показано, что они приводят к образованию дополнительного количества молекул NO, а реакция NO с O₃, в свою очередь, приводит к уменьшению содержания озона.

Однако солнечные космические лучи, имеющие большую по сравнению с галактическими космическими лучами концентрацию, и циркуляционные процессы могут сильно затушевывать эту форму изменчивости O₃ в 11-летнем цикле.

Идея о влиянии внешних факторов на содержание озона была высказана Добсоном и другими в 1927 г. Обнаружено возрастание общего содержания озона в течение магнитовозмущенных периодов. В последующие годы было доказано наличие определенных связей между общим содержанием озона и различными индексами солнечной, геомагнитной активности (K_p) и поглощением радиоволн в слое D, которое связано также с геомагнитной активностью. В частности, было установлено, что в годы минимума солнечных пятен парциальное давление озона на уровне его максимального содержания равно примерно 120—130 нб, а в годы максимума — 180 нб. Эту зависимость не удалось объяснить изменением температуры воздуха, а следовательно, можно полагать, что увеличение ультрафиолетового излучения при высоком уровне солнечной активности приводит к увеличению содержания озона. Виллет обнаружил отрицательную (со сдвигом в два года) связь общего содержания озона с 11-летним солнечным циклом. В дальнейшем его результаты пересматривались несколько раз. Последние работы, выполненные более аккуратно, говорят о том, что между солнечной активностью и озоном существует положительная связь с запаздыванием изменения общего содержания озона относительно хода чисел Вольфа на несколько лет (2—4 года). В годы, начиная с 1958, когда информация об озоне стала более надежной, отмечается, что солнечный максимум и озонный максимум совпадают в Европейской части СССР, Западной Европе и Северной Америке.

Бревер и Вилсон сравнили общее содержание озона в 1964 г. (солнечный минимум) и в 1970 г. (солнечный максимум) и обнаружили увеличение озона на 4,4% от минимума к максимуму. Данные Хита, полученные на «Нимбусе-4», указывают на 5%-ное уменьшение озона от апреля 1970 к апрелю 1971 г., когда солнечная активность, если судить по числам Вольфа, уменьшалась от 110 до 71 единиц.

Таким образом, данные о влиянии гелиогеофизических факторов на общее содержание озона в какой-то степени противоречивы. Эти противоречия связаны, в первую очередь, с использованными материалами и методами анализа. Подтверждением этому

могут быть результаты последней работы Грасника и Энтциана, где показано, что связь между солнечной активностью и общим содержанием озона определяется прямым воздействием ультрафиолетовой радиации либо на образование озона, либо на скорость меридионального переноса озона. В первом случае изменения содержания озона будут подобными в разных широтных зонах, а во втором — знаки изменения озона в областях источников и стоков озона будут противоположными. Обнаруженная тесная связь озона на среднеширотных станциях в зимний сезон с солнечной активностью свидетельствует в пользу влияния солнечной активности на меридиональный перенос озона. Содержание озона на экваториальных станциях положительно коррелирует с солнечной активностью летом и имеет тенденцию к отрицательной корреляции зимой. Такой характер связи может быть объяснен совместным действием двух факторов: усилением образования озона с ростом солнечной активности и влиянием солнечной активности на меридиональную циркуляцию. Кроме того, различие знаков корреляции в средних и низких широтах можно объяснить только влиянием меридионального переноса, так как оно не может быть следствием прямого воздействия на образование озона.

Более глубокая причина противоречий связана с тем, что, как известно, основная часть O_3 консервативна и при переходе к полной толще изменения общего содержания озона маскируются вариациями концентрации озона в нижней стратосфере. Последние составляют 44% от общего изменения озона. Эти вариации в нижних слоях озоносферы связаны с циркуляцией, которая может сильно затушевывать солнечно-обусловленные вариации общего содержания озона.

Выше 25 км, где быстро устанавливается фотохимическое равновесие, эффект гелиогеофизических факторов более заметен. Так, на высотах, превышающих 35 км, количество O_3 уменьшалось с 1959 по 1962 гг. Показано, что вариации озона на верхних уровнях более четко связаны с гелиогеофизическими параметрами.

Прямые эксперименты с облучением ультрафиолетовой радиацией влажного воздуха в камере сопровождались появлением озона.

Рассмотрим влияние космических факторов на разрушение озона. После испытаний водородных бомб в 1961—1962 гг. в результате облучения стратосферных слоев протонами высоких энергий в них было обнаружено возрастание числа молекул NO , NO_2 , что повлияло на прозрачность верхней стратосферы и мезосферы и снизило у земной поверхности напряженность солнечной радиации на 2—3%. К. Я. Кондратьев и Г. А. Никольский исследовали этот эффект и показали, что изменение химического состава атмосферы является тем ключевым процессом, благодаря которому можно оценить воздействие космических и антропогенных факторов на климат Земли.

Схема влияния космических лучей может быть представлена так. Вторжение протонов высокой энергии вызывает появление многочисленных вторичных электронов высокой (10—100 эВ) энергии в атмосфере, которые расщепляют молекулу N_2 на два атома азота. Атомарный азот легко вступает в соединение с молекулярным кислородом и образует NO . На важность этих реакций для фотохимии стратосферы и радиационного баланса нижних слоев атмосферы обратили внимание П. Варнек, П. Крутцен, Г. Брассар, М. Николе, М. Рудерман и другие авторы. Столь пристальное внимание к такого рода реакциям в стратосфере стимулировалось задачей оценки возможного влияния на климат полетов сверхзвуковой авиации в стратосфере.

Источниками молекул NO , как отмечалось выше, могут быть галактические и солнечные космические лучи, солнечные электроны, захваченные радиационными поясами Земли и содержащиеся в хвосте магнитосферы, а также метеориты и грозы. Непрерывный поток энергичных протонов галактического происхождения вызывает постоянную ионизацию и образование NO , главным образом, в нижней стратосфере; другие факторы эпизодически воздействуют на концентрацию NO в стратосфере, мезосфере и термосфере. Это подтверждается наличием 11-летней вариации в интенсивности образования молекул под влиянием галактических космических лучей. Глобальная оценка образованных в атмосфере Земли молекул NO за год колеблется от $1,2 \cdot 10^{33}$ (в максимуме солнечной активности) до $1,8 \cdot 10^{33}$ (в минимуме солнечной активности). На рис. 6.4 приведены кривые интенсивности образования молекул NO в средней и верхней атмосфере галактическими космическими лучами в максимуме (1) и минимуме (2) солнечной активности, а также во время вторжений солнечных космических лучей в земную атмосферу (3) и выбросов энергичных электронов из магнитосферы (4).

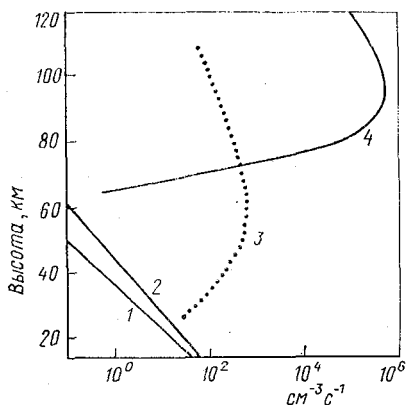
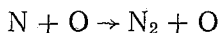
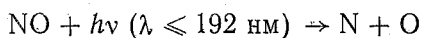


Рис. 6.4. Кривые интенсивности образования молекул NO под действием галактических космических лучей (1 и 2), под действием солнечных космических лучей (3) и высокоэнергичных электронов (4)

Так как средняя энергия солнечных космических лучей ниже, чем галактических, то образование молекул NO под их воздействием будет происходить на высотах > 30 км. Анализ трех сильных протонных вспышек привел к таким результатам: количество молекул NO , образованных в стратосфере, составило $2 \cdot 10^{33}$ (ноябрь 1960 г.), $6 \cdot 10^{32}$ (сентябрь 1966 г.), $6 \cdot 10^{33}$ (август 1972 г.).

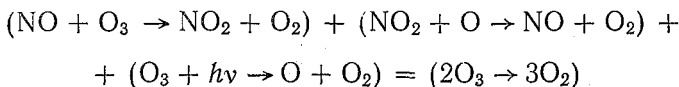
Как видно из этих расчетов, годовая продукция NO под действием галактических космических лучей меньше продукции NO во время мощных протонных вспышек.

Как уже отмечалось, большое количество молекул NO образуется в мезосфере и термосфере под действием рентгеновского излучения, возникающего во время полярных сияний при высыпании энергичных электронов. Значительная часть молекул NO, образовавшихся при этом, не достигает нижней атмосферы из-за процесса фотодиссоциации и последующего образования молекулярного азота:



Эксперимент, недавно проведенный американским ученым, показал, что релятивистские электроны проникали в более низкие слои, чем предполагалось ранее. Большой приток электронов был измерен на высоте 50 км.

Образование значительных количеств молекул NO и других окислов азота в стратосфере имеет большое значение для фотохимических реакций, приводящих к разрушению озона:



Уменьшение содержания озона, благодаря реакции с продуктами диссоциации окислов азота NO, может привести к уменьшению температуры стратосферы, поскольку озон сильно поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца в области 200—300 нм, нагревающее стратосферу в слое 20—60 км. Понижение содержания озона приведет к некоторому нагреванию земной поверхности из-за увеличения потока солнечной радиации, но в то же время охлаждение средней и нижней стратосферы вызовет уменьшение направленного к Земле потока инфракрасной радиации, и, следовательно, охлаждение земной поверхности.

Экспериментальные данные показывают, что изложенная выше схема влияния космических агентов на озон представляется реальной. По данным спутника «Нимбус-4» грандиозная вспышка 4 августа 1972 г., сопровождавшаяся сильным всплеском интенсивности солнечных космических лучей, привела к снижению концентрации озона на высоте 20—50 км на 20%. Волновое излучение вспышки, опередившее на одни-два суток поток солнечных протонов, не дало заметного эффекта в концентрации озона.

Первое количественное обоснование озонного механизма влияния солнечной активности на гидротермодинамический режим атмосферы было дано Л. Р. Ракиповой в 1972 г. Внешними факторами, приводящими его в действие, являются ультрафиолетовая и корпускулярная радиация Солнца. В основе механизма лежит

представление о том, что солнечная активность может изменять вертикальное распределение озона и его общее содержание. А это, как показали модельные расчеты, должно приводить к климатически значимым изменениям температуры и циркуляции атмосферы. Характерная особенность механизма состоит в том, что он действует по принципу «спускового крючка», так как в нем очень малые в энергетическом отношении изменения потоков солнечной радиации приводят к заметным климатическим эффектам. Например, вариации ультрафиолетовой радиации в полосах Шумана — Рунге на десятки процентов изменяют интегральную солнечную постоянную только на сотые доли процента, а дополнительная энергия, вносимая непосредственно протонной вспышкой в атмосферу, составляет относительно солнечной постоянной еще меньшую величину.

В пользу указанного механизма говорят следующие закономерности. От минимума к максимуму 11-летнего цикла солнечной активности в средней стратосфере летом скорости восточного переноса, восходящих движений, меридионального переноса от летнего периода к зимнему увеличиваются на 10—40%.

Протонная вспышка уменьшает составляющие скорости ветра верхней стратосферы в высоких широтах на 20—25%, температуру на 8%.

Средняя глобальная приземная температура в годы максимума солнечного цикла понижается на 0,25 К, в годы минимума повышается на 0,2—0,4 К.

Учет изменений малых составляющих в атмосфере, связанных с космическими факторами, неоднократно проводился в моделях различной сложности.

При использовании одномерной фотохимической модели было показано, что при переходе от минимума к максимуму долгопериодного цикла усиление ультрафиолетовой радиации приводит к увеличению общего содержания озона на 17,5%, в ходе 11-летнего цикла содержание озона варьирует в пределах 7%. Минимум ультрафиолетовой радиации, поглощенной стратосферой, совпадает с похолоданием стратосферы и потеплением тропосферы.

С целью исследования реакции полусферной модели общей циркуляции атмосферы на локальный дефицит озона в высоких широтах были проведены эксперименты с дефицитом озона на 6% для различных синоптических ситуаций. Сравнение результатов с контрольным экспериментом и с известным уровнем собственных шумов модели обнаружило триггерный эффект увеличения средней зональной скорости ветра в средних широтах над тропосферой, который проявился спустя 20—24 дня после того, как дефицит озона был введен в модель. Наибольшее действие дефицит озона оказал на районы волнового переноса энергии из районов умеренных широт тропосферы в высокие широты стратосферы. Аналогичный эффект обнаружен в численном эксперименте, в котором дефицит озона локализован на 45° с. ш.

В работе Сомервилля производилась оценка эффектов увеличения общего содержания озона на нижнюю атмосферу. На основании полученных результатов делается вывод о том, что возможная зависимость погоды от солнечной активности для временных масштабов порядка двух недель и менее может осуществляться за счет механизмов, не связанных с озоном, и кратковременные воздействия солнечной активности на атмосферу, вероятно, не могут осуществляться через изменение радиационного и теплового режима состояния атмосферы. Влияние вариаций озона на поле температуры оказалось существенным лишь в средней и верхней стратосфере.

Экспериментальные данные указывают на усиление восточного переноса в верхней стратосфере и нижней мезосфере летом при усилении солнечной активности. Зимой в максимуме 11-летнего цикла наблюдалось уменьшение западного ветра на $20\text{--}30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, что также не противоречило теоретическим оценкам Л. Р. Ракиповой.

Особенно отчетливо 11-летнее колебание в изменении скорости западного ветра обнаружено в верхней стратосфере и нижней мезосфере, где связь озона с солнечной активностью убедительно показана: максимальные концентрации озона на 50 км наблюдаются в годы повышенной, а минимальные в период низкой солнечной активности. Это может объясняться тем, что в максимуме солнечной активности озоном поглощается большое количество ультрафиолетовой радиации Солнца, что приводит к большему нагреванию стратосферы и мезосферы.

Большие широтные контрасты в поглощаемой энергии на стратосферных и мезосферных уровнях зимой должны приводить к усилению макротурбулентного воздухообмена между экватором и полюсом и, как следствие, к нагреванию высоких широт, уменьшению градиента экватор — полюс и ослаблению скорости западного ветра в субтропиках, что действительно установлено при анализе экспериментального материала.

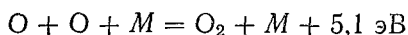
Обусловленное озоном возмущение термодинамических параметров, возникшее в нижней мезосфере и в верхней стратосфере, может быть передано вниз, в том числе и в тропосферу посредством ряда механизмов. Кратко остановимся на некоторых из них.

Известно, что положение тропопаузы почти не влияет на распределение ветра. Ньюэлл показал, что большая часть обмена массой между стратосферой и тропосферой происходит при почти горизонтальном переносе вблизи бароклинических зон, струйных течений и разрывов тропопаузы. Другие авторы представляли движения как адиабатические, следующие вдоль наклонных изэнтропических поверхностей $\theta = \text{const}$ (θ — потенциальная температура), либо как неадиабатические движения воздуха, в котором происходит радиационный теплообмен.

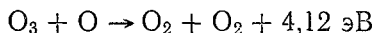
Рейтер обнаружил зоны, где наблюдается интенсивное вторжение стратосферного воздуха в тропосферу. Одна из зон совпадает с зоной нисходящих движений в субтропических антициклонах. Вторая зона ($\varphi = 40-45^\circ$) связана с осью субтропических струйных течений; здесь тропопауза разрывается и тем самым облегчается обмен между полярной стратосферой и тропической тропосферой. Обмен здесь может происходить вдоль претерпевших деформацию изэнтропических поверхностей. Рейтер отмечает, что когда вблизи струйного течения умеренных широт возникает циклон, то один такой циклогенетический процесс вовлекает около $6 \cdot 10^{11}$ т стратосферного воздуха в тропосферу, в целом около $8 \cdot 10^{13}$ т на земном шаре за год.

Третья зона, вероятно, находится на широте 60° . Средняя меридиональная циркуляция сквозь тропопаузу в нижнюю стратосферу играет господствующую роль в обмене между тропосферой и стратосферой и эта меридиональная циркуляция неотделима от движений синоптического масштаба. Она также связана с развитием планетарных волн с волновыми числами 1, 2, 3.

Таким образом, идея о влиянии стратосферы на тропосферу имеет под собой твердую основу и озонный механизм солнечно-атмосферных связей может рассматриваться как один из наиболее реальных механизмов такого влияния. Другим примером взаимодействия динамических и химических процессов можно считать выделение тепла при изотермической рекомбинации атомарного кислорода в реакциях тройного соударения



Рекомбинационный приток тепла становится эффективным при наличии нисходящих движений воздуха, которые переносят атомарный кислород из нижней термосферы в более плотные слои, где возрастает вероятность тройного соударения, а следовательно, величина рекомбинационного притока тепла. Чем больше атомов O в слое 110—120 км, тем интенсивнее будет приток тепла в мезосферу. Рассматривая эту гипотезу, Юнг рассчитал распределение атомов O по высоте и учел другие возможные стоки атомарного кислорода:



Л. Р. Ракипова предложила химический механизм воздействия солнечной активности на температуру и циркуляцию мезосферы, в основе которого лежит предложение о том, что образование атомарного кислорода в полярной ионосфере может быть связано с процессами, вызывающими полярные сияния, интенсивность которых в свою очередь, зависит от уровня солнечной активности.

Результаты численного моделирования зависимости от солнечной активности циркуляции и широтного хода температуры показав-

ли, что по крайней мере для зимних условий нижняя граница непосредственного воздействия солнечной активности на атмосферу находится на высоте около 60 км.

Увеличение в нижней мезосфере концентрации атомарного кислорода $n(O)$ приводит к увеличению интенсивности общей циркуляции в мезосфере. Механизм, связанный с приращением температуры за счет химических притоков тепла, эффективен в высоких широтах зимой. Летом изменения температуры и циркуляции могут быть связаны с солнечной активностью через изменение концентрации озона, а не атомарного кислорода.

Рассмотренный механизм допускает любой сдвиг по времени между увеличением солнечной активности и изменениями циркуляции, поскольку химический разогрев мезосферы и циркуляционные изменения, связанные с ним, происходят только при наличии нисходящих движений в высоких широтах мезосферы в зимние месяцы.

6.4. Гидродинамические механизмы взаимодействия верхних и нижних слоев атмосферы

Теоретически и экспериментально доказано (см. гл. 5), что солнечная активность воздействует на термосферу, откуда это воздействие посредством внутриатмосферных механизмов может передаваться в тропосферу.

Возможны следующие динамические механизмы взаимодействия между слоями атмосферы.

1. Волновой — распространение волновых возмущений давления, ветра и температуры осуществляется в вертикальном направлении.

2. Компенсационный — основан на взаимодействии между слоями посредством чередующихся циклонических и антициклонических образований.

Волновой механизм. Хайнс предложил механизм, суть которого состоит в том, что орография и неадиабатические процессы возбуждают в нижних слоях атмосферы волны (планетарные, гравитационные), распространяющиеся вверх.

Стратосферные и мезосферные ветры играют определяющую роль в формировании условий отражения и пропускания этих волн. Изменение воздушных течений в средней атмосфере обуславливает изменение амплитуд и фаз волн, распространяющихся до этого уровня. Энергетика этих изменений такова, что сравнительно слабые возмущения приводят к сильным эффектам в верхних слоях, которые, в свою очередь, модулируют фиксированные источники энергии в тропосфере. На основе квазигеострофической модели стационарных планетарных волн найдено, что изменение на 20% среднего зонального течения вблизи уровня 35 км (экспериментальные данные свидетельствуют о близких по значению вариациях скорости ветра в верхней стратосфере) вызывает в поле тропосферных планетарных волн изменения того же порядка ве-

личины, что и их междугодовая изменчивость в средних и высоких широтах.

Л. Р. Ракипова исследовала влияние на амплитуды планетарных волн внешних факторов — солнечной активности и антропогенных изменений содержания углекислого газа в атмосфере. Ею показано, что влияние солнечной активности на стратосферные волны больше, чем на тропосферные. Эффекты солнечной активности в тропосферной и стратосферной зональной циркуляции оказывают противоположное влияние на амплитуды планетарных волн в тропосфере. Знак и величина этих эффектов в вертикальной структуре планетарных волн зависят от длины волны и высоты. Это означает, что влияние солнечной активности на незональную циркуляцию имеет сложный характер и может быть знакопеременным как в пространстве, так и во времени. С этим могут быть связаны часто получаемые в статистических исследованиях выводы о пространственной и временной неоднозначности проявлений солнечной активности в термодинамическом состоянии атмосферы.

Компенсационный механизм. В основе компенсационного механизма, предложенного Л. Р. Ракиповой, лежит идея о компенсационных связях параметров атмосферы по вертикали. На основе полученных экспериментальных фактов ею разработана схема расположения друг над другом чередующихся циклонических и антициклонических циркуляций. Определяющую роль в развитии вихревых процессов в верхних слоях играют циклоны и антициклоны нижних слоев. Однако возможно и воздействие верхних слоев на нижние. Вследствие выполнения уравнения неразрывности конвергенция и восходящие течения в каждом из слоев, например, в термосфере, должны сопровождаться дивергенцией и нисходящими движениями в нижнем. В свою очередь, дивергенция вызовет восходящие течения в нижележащем слое.

Первый уровень обращения совпадает с максимумом скорости ветра на 10 км, а второй — с минимумом скорости ветра на 20 км. Другие уровни обращения совпадают с инверсиями температуры.

Указанная схема компенсационных связей получила теоретическое и экспериментальное подтверждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1974, Ч. 1 — 382 с., Ч. 2 — 508 с.
2. Вительс Л. А. Синоптическая метеорология и гелиофизика. Избранные труды. — М.: Гидрометеоздат, 1977. — 252 с.
3. Витинский Ю. И., Оль А. И., Сазонов Б. И. Солнце и атмосфера Земли. — М.: Гидрометеоздат, 1976. — 350 с.
4. Витинский Ю. И. Цикличность и прогноз солнечной активности. — М.: Наука, 1973. — 257 с.
5. Герман Дж. Р., Голдберг Р. А. Солнце, погода и климат. — М.: Гидрометеоздат, 1981. — 319 с.
6. Гибсон Э. Спокойное Солнце (Пер. с английского). — М.: Мир, 1977. — 408 с.
7. Дроздов О. А., Покровская Т. В. Анализ статистических гелиоклиматических связей. — В сб.: Труды Всесоюзного научного метеорологического совещания, т. IV. Л., Гидрометеоздат, 1962, с. 259—270.
8. Дружинин И. П., Сазонов Б. И., Ягодинский В. Н. Космос—Земля. Прогнозы. — М.: Мысль, 1974. — 288 с.
9. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 190 с.
10. Кондратьев К. Я. Радиационные факторы современного изменения глобального климата. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 279 с.
11. Кондратьев К. Я. Современные изменения климата и определяющие их факторы. — В кн.: Итоги науки и техники. Метеорология и климатология, т. 4, М., 1977. — 202 с.
12. Кондратьев К. Я., Никольский Г. А. Солнечная постоянная. Обзор. — Обнинск: ВНИИГМИ—МЦД, 1980. — 53 с.
13. Логинов В. Ф. — Солнечная активность и динамика климата. Обзор. Обнинск: ИЦ, 1975. — 46 с.
14. Логинов В. Ф., Ракипова Л. Р., Сухомазова Г. И. Эффекты солнечной активности в стратосфере. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 80 с.
15. Логинов В. Ф. — Характер солнечно-атмосферных связей. — Л.: Гидрометеоздат, 1973. — 86 с.
16. Максимов И. В. Геофизические силы и воды океана. — Л.: Гидрометеоздат, 1970. — 447 с.
17. Монин А. С. Солнечный цикл. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 68 с.
18. Покровская Т. В. Синоптико-климатические и гелиофизические долгосрочные прогнозы погоды. — Л.: Гидрометеоздат, 1969. — 250 с.
19. Рубашев Б. М. Проблемы солнечной активности. — М.—Л.: Наука, 1964. — 360 с.
20. Солнечная и солнечно-земная физика (иллюстрированный словарь терминов). — М.: Мир, 1980. — 254 с.
21. Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды. — Труды I Всесоюзного совещания. Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 483 с.
22. Физика магнитосферы. — М.: Наука, 1972. — 317 с.