

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова

Л. И. Мирошниченко

Физика Солнца и солнечно-земных связей

Под редакцией профессора М. И. Панасюка

Учебное пособие

Москва
Университетская книга
2011

УДК 551.5:539.104(078)

ББК 22.3877

М64

Научный редактор
профессор М. И. Панасюк

На первой странице обложки: логотипы двух российских спутников для исследования Солнца — КОРОНАС-Ф (слева) и КОРОНАС-ФОТОН.

Мирошниченко Л. И.

М64 Физика Солнца и солнечно-земных связей : учебное пособие // Л. И. Мирошниченко; Под ред. М. И. Панасюка. — М. : Университетская книга, 2011. — 174 с. : табл., ил., цв. ил. — ISBN 978-5-91304-191-3.

Книга написана на основе одноименного курса лекций, прочитанных в 2008-2011 гг. для студентов кафедры физики космоса физического факультета МГУ. В ней представлены основные сведения по физике Солнца, солнечной активности, структуре и свойствах межпланетного пространства, об электромагнитных и радиационных условиях в околоземном космическом пространстве. Уделено должное внимание генерации корпускулярного излучения Солнца, включая ускорение солнечных частиц до энергий космических лучей. На современном уровне автор кратко изложил накопленные знания по проблеме воздействия солнечной активности на магнитосферу, ионосферу и нейтральную атмосферу Земли. Вместе с феноменологическим описанием гелиогеофизических явлений изложены методы их наблюдений, анализа, физической интерпретации, моделирования и возможностей прогнозирования. Отмечены важные астрофизические следствия, вытекающие из данных по физике Солнца и солнечно-земной физике. Подчеркиваются фундаментальные и прикладные аспекты проблемы солнечно-земных связей, включая воздействие на биосферу Земли, перспективы космонавтики, их мировоззренческую роль.

Книга представляет собой учебное пособие, предназначенное для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений, специализирующихся в области космических исследований, солнечной физики и геофизики. Она может оказаться полезной и для специалистов смежных областей, а также для инженеров-конструкторов космической промышленности, занятых созданием космических аппаратов и систем, планированием и осуществлением космических полетов.

Учебное пособие создано в рамках реализации национального проекта «Формирование системы инновационного образования МГУ имени М.В. Ломоносова» и в связи с 300-летием со дня рождения великого русского ученого-энциклопедиста, поэта, мыслителя и просветителя.

УДК 551.5:539.104(078)

ББК 22.3877

Учебное издание

Леонтий Иванович Мирошниченко

ФИЗИКА СОЛНЦА И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Научный редактор профессор М. И. Панасюк

Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 80 экз. Заказ № Т-068-11

Отпечатано в типографии КДУ с материалов, предоставленных автором.

Тел./факс: (495)939-44-91, 939-57-32; www.kdu.ru; e-mail: press@kdu.ru

© Научно-исследовательский институт
ядерной физики МГУ, 2011

© Обложка. Издательство «КДУ», 2011

ISBN 978-5-91304-191-3

**300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова
посвящается**



**«Стихотворство — моя утеха,
физика — мое упражнение»**

М.В. Ломоносов

**Не бездарна та природа,
Не погиб ещё тот край,
Что выводит из народа
Столько славных то-и-знай, -
Столько добрых, благородных,
Сильных любящей душой,
Посреди тупых, холодных
И напыщенных собой!**

Н.А. Некрасов («Школьник», 1856)

1. ВВЕДЕНИЕ: ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

**Река истины протекает через каналы заблуждений.
Р. Тагор**

Среди современных направлений космофизики одно из важнейших мест занимает физика Солнца. Прежде всего, нас интересуют характеристики Солнца как звезды (структура, химический состав, источник энергии, строение и динамика его атмосферы, расширение короны и солнечный ветер). Далее, представляют большой интерес ряд энергичных явлений (возмущений) в атмосфере Солнца (солнечная активность): пятна, вспышки, волокна, протуберанцы, корональные выбросы вещества (СМЕ) и потоков ускоренных частиц. Геофизические последствия этих явлений (магнитные бури, полярные сияния, возмущения ионосферы и т.д.) и составляют суть проблемы солнечно-земных связей, или проблемы «Солнце-Земля» (рис.1.1). Вместе с механизмами их воздействия на Землю эти явления представляют предмет изучения солнечно-земной физики.

1.1. Природа гелио-геофизических возмущений

Солнечные возмущения сопровождаются мощным выделением энергии, прежде всего, в форме кинетических движений плазмы (ударные волны, корональные выбросы вещества), а также в виде усиленных потоков электромагнитного излучения, солнечного ветра и ускоренных частиц, на фоне возмущенного межпланетного магнитного поля (ММП). Каждый из этих факторов по-разному воздействует на околоземное пространство (магнитосферу, ионосферу и нейтральную атмосферу). Их геоэффективность зависит не только от флюенса энергии (т.е. ее суммарного потока), но и от скорости ее поступления в окрестности Земли. Иными словами, почти с самого начала в солнечно-земной физике возникла необходимость учитывать не только энергетику возмущений, но и особенности воздействия различных факторов в цепочке «Солнце - межпланетная среда - Земля» на зарождение и развитие геофизических процессов. При этом большую роль могут играть «малые возмущения» извне (триггерный механизм).

С другой стороны, в космических исследованиях в целом мы имеем дело с четырьмя группами фундаментальных физических факторов – полями, частицами, волнами в плазме и электромагнитными излучениями различных частот. Эти факторы являются одновременно и объектами исследования, и носителями информации об изучаемых явлениях. Кратко покажем это на примере солнечных космических лучей (СКЛ). Участвуя в различных процессах в пространстве между Солнцем и Землей, энергичные солнечные частицы вносят значительный информационный вклад во все четыре направления исследований. В частности, СКЛ позволяют зондировать величину, структуру и динамику магнитных полей в атмосфере Солнца и межпланетном пространстве. Многие результаты изучения СКЛ (состав, зарядовое состояние, максимальная энергия и спектр ускоренных частиц) могут быть очень полезными для теории ускорения частиц и астрофизики космических лучей. Наконец, последние достижения в изучении ускорения частиц корональными и межпланетными ударными волнами представляют большой интерес для физики плазмы в астрофизических объектах разного масштаба – от границы гелиосферы до оболочек Сверхновых звезд. Таким образом, физика Солнца и солнечно-земных связей прокладывает для нас плодотворный путь к «большой астрофизике».

Исторические корни инструментальных наблюдений Солнца, солнечной активности, зарождения и становления солнечно-земной физики уходят в весьма отдаленное прошлое. Например, первая (и очень мощная) солнечная вспышка была зарегистрирована 1

сентября 1859 г. На следующий день на Земле над обоими полушариями наблюдались полярные сияния (в частности, даже на широтах Рима, Гаваны и Гавайских островов). В Европе и США 2 сентября временами нарушалась телеграфная связь, что было типичным проявлением геомагнитной бури. Немало подобных событий случилось и в 20-21-ом веках (например, в августе 1972 г., в марте, сентябре и октябре 1989 г., в марте 1991 г., в июле 2000 г., в октябре-ноябре 2003 г., в январе 2005 г.). Эти события давно обросли легендами. Однако ту комбинацию явлений, которые происходили 1-2 сентября 1859 г., можно вполне назвать типичной «космической бурей», которая остается одним из крупнейших возмущений околоземного пространства за всю историю наблюдений. Общая картина крупного гелио-геофизического возмущения представлена на рис.1.2.

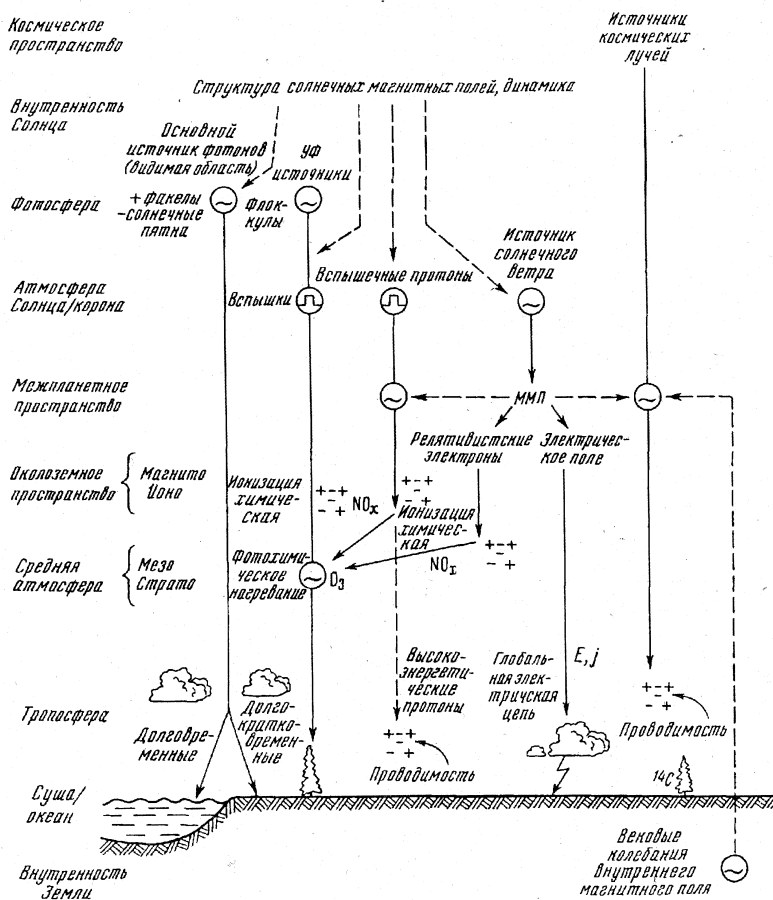


Рис.1.1. Солнце и геосфера: каналы поступления энергии от Солнца к Земле, основные процессы и главные звенья в системе солнечно-земных связей СЗС (Кондратьев и Никольский, 1995). Обозначения: факелы и флоккулы – солнечные фотосферные и хромосферные магнитные структуры; ММП – межпланетное магнитное поле; E, j – напряжённость электрического поля и ток в глобальной цепи атмосферного электричества; NO_x – окислы азота, образующиеся под действием солнечных протонов (СКЛ); O_3 – озон, образующийся под действием солнечного УФ-излучения ($\lambda \leq 242$ нм); ^{14}C – радиоактивный изотоп углерода, образующийся под действием ГКЛ (галактических космических лучей). Волнистыми и ступенчатыми значками в кружочках отмечены непрерывная или спорадическая изменчивость различных параметров.

1.2. Данные наблюдений и основные направления исследований

Наряду с накоплением данных о солнечных пятнах, полярных сияниях и других явлениях, предпринимались попытки объяснить физическую суть происходящих процессов. Так, уже на рубеже 19-го и 20-го столетий появились первые гипотезы о природе полярных сияний и теоретические предпосылки для описания захваченной радиации в магнитосфере Земли (теории радиационных поясов). В 1910-1940 гг. были развиты многие аспекты физики Солнца (состав и внутреннее строение, источники энергии, природа излучения его атмосферы и т.п.). Однако понадобилось несколько десятилетий для формирования основных понятий солнечно-земной физики и создания мировой наблюдательной базы для изучения проблемы «Солнце-Земля». Вершиной этих научных усилий стало проведение Международного Геофизического Года (1957-1958 гг.)

С началом «космической эры» (4 октября 1957 г.) и пилотируемых космических полетов (12 апреля 1961 г.) наступил коренной перелом и в солнечно-земной физике. В течение трех последующих десятилетий была сформирована по существу новая концепция «космической погоды», в основу которой легли новейшие открытия в солнечно-земной физике (в частности, прямые наблюдения солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, выбросов коронального вещества). Благодаря космическим аппаратам (КА) возникли или получили интенсивное развитие такие области гелиофизики, как солнечная гамма-астрономия, гелиосейсмология и др. В научный обиход широко вошли выражения «корональная дыра», «солнечная буря», «геомагнитная буря», «радиационная буря», «хвост магнитосферы» и многие другие. Возникло также понятие «гелиосферы» как особой полости в космическом пространстве, образуемой солнечным ветром при его взаимодействии с межзвездной средой.

Наряду с накоплением данных о солнечных пятнах, полярных сияниях и других явлениях, предпринимались попытки объяснить физическую суть происходящих процессов. Так, уже на рубеже 19-го и 20-го столетий появились первые гипотезы о природе полярных сияний и теоретические предпосылки для описания захваченной радиации в магнитосфере Земли (теории радиационных поясов). В 1910-1940 гг. были развиты многие аспекты физики Солнца (состав и внутреннее строение, источники энергии, природа излучения его атмосферы и т.п.). Однако понадобилось несколько десятилетий для формирования основных понятий солнечно-земной физики и создания мировой наблюдательной базы для изучения проблемы «Солнце-Земля». Вершиной этих научных усилий стало проведение Международного Геофизического Года (1957-1958 гг.)

К настоящему времени солнечно-земная физика включает несколько важных теоретических, наблюдательных и прикладных аспектов. Среди них следует назвать, в первую очередь, генерацию вспышек и СМЕ, ускорение заряженных частиц, их перенос в межпланетной среде, взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли. Далее идут наблюдения и интерпретация различных геофизических эффектов солнечной активности (СА). Большое место занимают вопросы прогнозирования явлений СА, геомагнитных и ионосферных возмущений, потоков энергичных солнечных частиц.

Особый интерес представляют наиболее мощные возмущения электромагнитных условий на самом Солнце (так называемые солнечные экстремальные события, СЭС). Такие события, как правило, сопровождаются сильными изменениями радиационных условий в межпланетной среде (вплоть до орбит Марса и Юпитера) и разнообразными возмущениями околоземного космического пространства (ОКП) и всех оболочек Земли, составляющих внешнюю геосферу (т.е. магнитосферы, ионосферы, озоносферы, стратосферы и тропосферы). Иными словами, воздействие мощной солнечной бури простирается от границы геосферы до поверхности Земли (рис.1.1 и 1.2). Более того, СЭС затрагивает также гидросферу и твердую оболочку Земли (литосферу). Тропосфера, гидросфера и литосфера, в свою очередь, являются естественной средой обитания для

земной биосферы, так что воздействие гелио-геофизических возмущений на биосферу не только ожидается, но и совершенно неизбежно.

В последние десятилетия интенсивно разрабатывается проблема солнечно-тропосферных и солнечно-климатических связей. В этой проблеме, по-видимому, как ни в какой другой области гелио-геофизики, важен учёт взаимодействия между солнечными влияниями и сугубо земными процессами и факторами. Именно здесь может сильно сказываться нелинейный характер таких взаимодействий и, как следствие, неоднозначный характер эффектов, т.е. кажущаяся неустойчивость связей. Особый интерес представляет направление, получившее название «гелиобиология». Эта область исследований проделала длинный и нелёгкий путь – от чисто умозрительных догадок и статистических результатов, подтверждающих влияние солнечной активности на земную биосферу, до постановки серьёзных физических экспериментов.

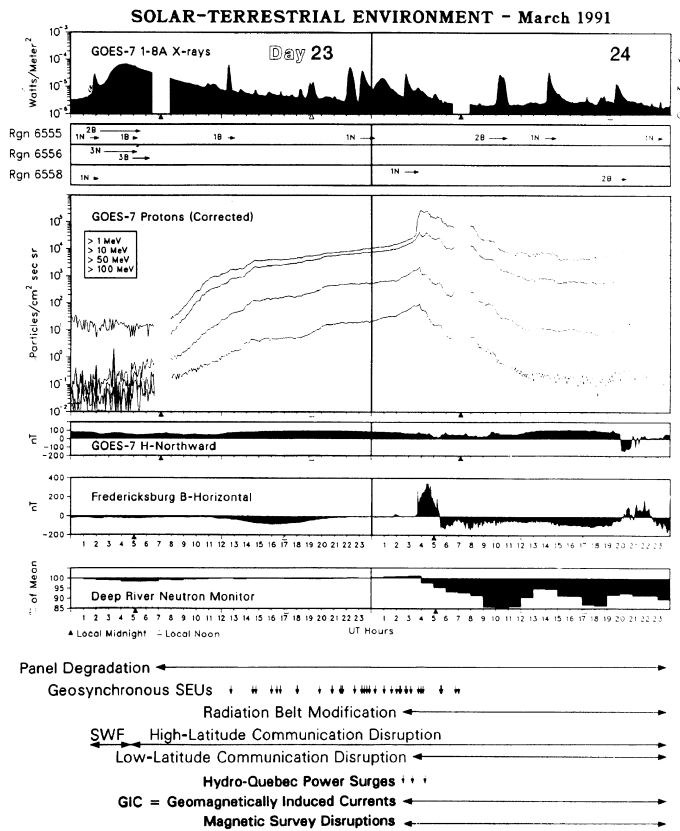


Рис.1.2. Общая картина крупного гелио-геофизического возмущения 23-24 марта 1991 г. (Shea & Smart, 1996). Сверху вниз на графиках последовательно показаны: поток мягкого рентгеновского излучения (признак вспышки) по наблюдениям на КА GOES 7; список вспышек; потоки ускоренных солнечных протонов; данные о северной (GOES 7) и горизонтальной (Фредериксбург, США) компонентах геомагнитного поля; вариации космических лучей на нейтронном мониторе (Дип Ривер, Канада). Внизу дана сводка аномалий в работе солнечных батарей и электроники на некоторых ИСЗ, других эффектов вблизи и на поверхности Земли: модификация радиационных поясов Земли (РПЗ), нарушения радиосвязи на различных частотах, резкие скачки напряжения в энергосистеме провинции Квебек (Канада), теллурические токи и др.

Настоящее издание кратко охватывает весь круг перечисленных вопросов. Многие важные детали, однако, остались за рамками нашего изложения. Этот недостаток читатель может восполнить самостоятельно: список рекомендуемой литературы содержит наиболее современные статьи, обзоры и книги по основным проблемам солнечно-земной физики. Многие вопросы в данной области уже изучены весьма детально, вплоть до точных количественных оценок и/или однозначных данных наблюдений. Вместе с тем, автор не хотел бы создать иллюзию полной ясности и завершенности: ряд проблем все еще ждут окончательного решения, особенно в части разработки физических механизмов солнечно-земных связей. При этом именно нерешенные проблемы служат «точками роста» для новых исследований.



Если заглянуть немного в историю космофизики в России, то ещё М.В. Ломоносов (1711-1765) считал, что на поверхности Солнца происходят непрерывные бурные изменения. Свои представления об этих процессах он изложил в поэтической форме:

...Когда бы смертным толь высоко
Возможно было взлететь,
Чтоб к солнцу бrenно наше око
Могло, приблизившись, воззреть,
Тогда б со всех открылся стран
Горящий вечно Океан.
Там огненны валы стремятся
И не находят берегов;
Там вихри пламенны крутятся,
Борючись множество веков;
Там камни, как вода, кипят,
Горящи там дожди шумят...

«Утреннее размышление о Божием величестве» (1743)

Если перейти на современную научную прозу, то можно утверждать, что Ломоносов правильно представлял себе, по крайней мере, основные свойства солнечной атмосферы – её высокую температуру, динамичность (изменчивость), даже по-своему описал явление турбулентности...

Как известно, Ломоносов интересовался также природой полярных сияний. В «Вечернем размышлении о Божием величестве при случае великого северного сияния» (1743) учёный рассуждает о природе этого поистине поразительного природного явления. Загадка величественного зрелища северного сияния вызывает у физика - поэта вдохновенные строки:

Но где ж, натура, твой закон?
С полнощных стран встаёт заря;
Не солнце ль ставит там свой трон?
Не льдисты ль мечут огонь моря?
Се хладный пламень нас покрыл;
Се в ночь на землю день вступил...

При этом Ломоносов не только созерцает ночное небо, но и стремится познать законы «натуры» и обсуждает различные гипотезы:

Что зыблет ясный ночью луч?
Что тонкий пламень в твердь разит?
Как молния без грозных туч
Стремится от земли в зенит?

М.В. Ломоносов придавал прямое научное значение многим своим стихам. В 1753 году в ученом «Изъяснении», приложенном к его «Слову о явлениях воздушных от электрической силы происходящих», Ломоносов, указывая на отличие своей теории северных сияний от теории Б. Франклина, ссылается на эту оду (1943), которая «...содержит мое давнишнее мнение, что северное сияние движением эфира произведено быть может», и таким образом утверждает свой научный приоритет.

Эти два примера показывают, что Ломоносов-ученый мыслил как поэт, а поэт - как ученый. Это роднит его с великими учеными XVII века Г. Галилеем и И. Кеплером, писавшими о «гармонии мира». При этом ему органически присущи деятельный и жизнеутверждающий оптимизм и вера в человеческий разум.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА

**«Светить – и никаких гвоздей!»
- Вот лозунг мой и Солнца.
В.В. Маяковский**

Солнце - центральное тело нашей Солнечной системы. Оно представляет собой горячий вращающийся газовый шар с радиусом $R_C = 6.96 \times 10^{10}$ см и массой $M_C = 1.99 \times 10^{33}$ г. Солнце в 750 раз превосходит по массе все остальные тела Солнечной системы, вместе взятые, и в 330 тысяч раз массивнее Земли. Средняя плотность солнечного вещества близка к $\rho_C = 1.4$ г/см³ (что составляет около 0,256 от средней плотности Земли, ρ_3), в центре Солнца плотность достигает величины 160 г/см³, т.е. более чем на два порядка превышает среднюю. На солнечном диаметре ($D_C = 1\,390\,600$ км) можно было бы разместить цепочку из 109 таких планет, как наша Земля. Солнце находится на расстоянии 149 680 000 км от Земли (это расстояние называют астрономической единицей, а.е.). В угловых единицах на земном небе Солнце (его диаметр) занимает всего около 0.5 градуса. Для сравнения отметим, что среднее расстояние от Земли до Луны составляет 384 000 км. При диаметре Луны 3 476.4 км ее угловой размер близок к 0.52 градуса, что практически совпадает с угловым размером Солнца. Именно поэтому на поверхности Земли можно наблюдать полные затмения как Солнца, так и Луны.

2.1. Солнце как звезда

Солнце - ближайшая к Земле звезда, его свет доходит до нас за восемь с третьей минут. На земном небосводе Солнце - единственная из звёзд, чей видимый диск различим невооруженным глазом. Все остальные звёзды, удалённые от нас на громадные расстояния, даже при рассмотрении в самые мощные телескопы, не открывают никаких подробностей своих поверхностей. Солнце принадлежит к типу звёзд, называемых жёлтыми карликами. По абсолютной величине звездной светимости Солнце имеет яркость +4.83, спектральный класс G2V. Класс G2 означает, что звезда имеет температуру поверхности $T_C \approx 5780$ К. В звездном семействе наблюдаемой Вселенной, на классической диаграмме Герцшпрунга-Ресселла «температура-светимость» Солнце расположено на главной последовательности. Ближайшая к Солнечной системе звезда – это красный карлик 12-й звездной величины Проксима Центавра (Proxima Centauri). Звезда имеет параллакс 0.762, т.е. расстояние до нее равно 1.31 парсек (4.3 световых года).

Солнце находится вблизи плоскости нашей Галактики, недалеко от границы одного из ее спиральных рукавов. При этом Солнце погружено внутрь частично ионизованного локального межзвездного облака (ЛМО) и движется в межзвездной среде в направлении границы созвездий Лиры и Геркулеса со скоростью около 25 км/с относительно звезд, видимых невооруженным глазом. Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики (нашего «Млечного Пути») составляет около 250 км/с. От центра Галактики Солнце отделяют почти 30 000 световых лет. Примерно такое же расстояние лежит между Солнцем и окраиной Галактики. Период обращения Солнца вокруг центра Галактики (галактический год) составляет ~230 млн. лет. Типичные изображения Солнца при наблюдениях приведены на рис.2.1.

2.2. Строение Солнца

Согласно так называемой стандартной солнечной модели (ССМ), Солнце состоит из трёх зон (рис.2.2), отличающихся составом, температурой, плотностью и процессом

передачи энергии. Центральная зона, или ядро (в пределах не более $0.25R_c$, где R_c – радиус Солнца), примерно на 35% состоит из водорода, на 64% – из гелия, на долю других элементов (в частности, ядер углерода C, азота N и кислорода O) приходится не более 1% (по массе). Это наиболее плотная часть звезды, где вещество находится при чрезвычайно высоком давлении и температуре.

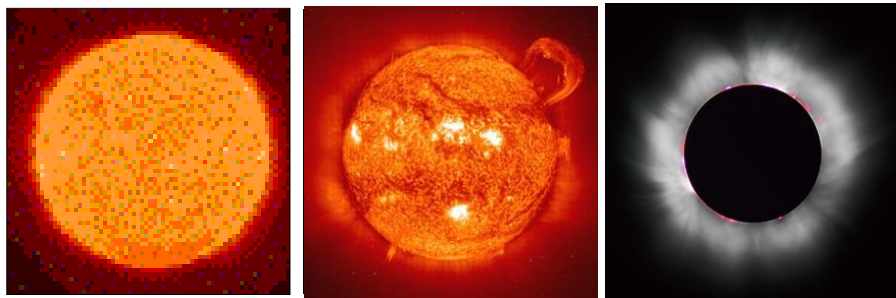


Рис.2.1. Типичные изображения при наблюдениях спокойного Солнца (слева), во время активных процессов в его атмосфере (в центре) и в период солнечного затмения (справа). На левом снимке хорошо видны солнечные гранулы, на среднем – отчетливо проявились неоднородная структура и активные процессы в атмосфере Солнца (вспышки, протуберанцы и т.п.). На правом снимке отчетливо видна корона Солнца.

Ядро звезды (**core**) занимает всего 2% объема Солнца, но содержит почти половину его массы. В центре звезды плотность вещества достигает $150\text{--}160\text{ г/см}^3$ (что примерно в 15 раз больше плотности свинца), а его максимальная температура может превышать 15 млн. градусов ($\geq 1.5 \times 10^7\text{ K}$). При такой температуре происходит термоядерная реакция синтеза (слияния), в которой основную роль играет водородный (p - p) цикл: ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$; ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$; ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$. Таким образом, 4 ядра водорода образуют ядро гелия с выделением большого количества энергии (подробнее см. раздел 2.4). При горении водорода освобождаются гамма-лучи γ (фотоны высокой энергии) и нейтрино ν (частицы, лишенные заряда и имеющие очень незначительную массу). Выделение энергии при этом в миллионы раз больше (на единицу массы), чем в химических реакциях горения нефти и газа.

Ядро Солнца окружено зоной излучения (или радиационной зоной, **radiative zone**), из которой излучение путем медленной диффузии выходит наружу в сторону поверхности Солнца. Тепло передаётся за счёт процесса многократного поглощения и излучения атомами квантов электромагнитного излучения. Выделенное тепло проходит через всю звезду и излучается в виде светового потока. Температура постепенно убывает по радиусу. В результате уже в следующей, статической радиационной зоне, температура падает от $1.5 \times 10^7\text{ K}$ до $1.0 \times 10^6\text{ K}$, что недостаточно для ядерного синтеза. Происходит медленная диффузия теплового потока, пока он не дойдёт до границы радиационной зоны на расстоянии $\sim 0.75R_c$. В целом фотонам нужны миллионы лет, чтобы пройти через радиационную зону при их постепенном распространении наружу. На границе зоны механизм передачи тепла излучением меняется на более эффективный конвективный перенос. Внешняя конвективная зона (**convective zone**) наполнена турбулентной горячей плазмой, вырывающейся на фотосферу Солнца.

В центре Солнца рождаются гамма-кванты. Их энергия в миллионы раз больше, чем энергия квантов видимого света, а длина волны очень мала. По пути к поверхности Солнца кванты претерпевают удивительные превращения. Отдельный квант сначала поглощается каким-нибудь атомом, но тут же снова переизлучается. Чаще всего при этом возникает не один прежний квант, а два или даже несколько. По закону сохранения

энергии их общая энергия сохраняется, а потому энергия каждого из них уменьшается. Так возникают кванты все меньших и меньших энергий. Мощные гамма-кванты как бы дробятся на менее энергичные кванты электромагнитного диапазона – сначала рентгеновские лучи (X), потом ультрафиолетовое (УФ), видимое (или оптическое, O) и, наконец, инфракрасное (ИК) излучение. В итоге наибольшее количество энергии Солнце излучает в видимом свете (оптический диапазон), и не случайно наши глаза чувствительны именно к нему.

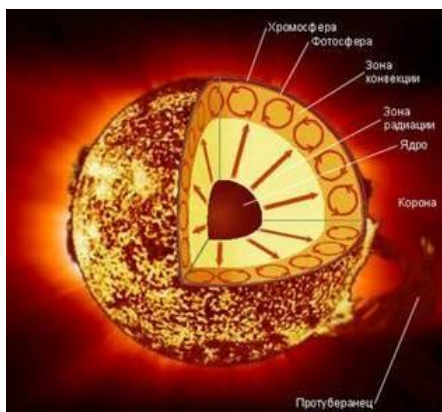


Рис.2.2. Внутреннее строение Солнца и структура его атмосферы

На своем пути через внутренние слои Солнца поток энергии встречает такую область, где непрозрачность газа сильно возрастает. Это конвективная зона Солнца. Здесь энергия передается уже не излучением, а конвекцией. Суть конвекции состоит в том, что потоки горячей плазмы поднимаются вверх, где отдают свое тепло окружающей среде, а охлажденный солнечный газ опускается вниз. Похоже, что солнечное вещество кипит и перемешивается, как «вязкая рисовая каша» на огне. Конвективная зона начинается примерно на расстоянии 0.75 радиуса от центра и простирается практически до самой видимой поверхности Солнца (фотосферы). Здесь массовая плотность вещества и его температура падают до значений $\rho \approx 10^{-7} \text{ г/см}^3$ и $T = 6 \times 10^3 \text{ К}$, соответственно, а перенос основного потока энергии вновь становится лучистым. Однако по инерции сюда все же проникают горячие потоки из более глубоких конвективных слоев. Хорошо известная наблюдателям картина грануляции на поверхности Солнца (рис.2.1, слева) является видимым проявлением конвекции.

Как мы уже говорили, кванту требуется очень много времени, чтобы просочиться через плотное солнечное вещество наружу. Так что если бы "печка" внутри Солнца вдруг погасла, то мы узнали бы об этом только миллионы лет спустя...

2.3. Возраст, химический состав, температура и плотность

Среди астрономов-специалистов по планетной космогонии пока нет единого мнения по проблемам, связанным с происхождением Солнечной системы. Первым и самым естественным этапом в этом процессе считается формирование протопланетного диска Солнца из вещества первичного газопылевого облака (туманности). Однако дальнейший «сценарий» и физические механизмы образования Солнца и планет до сих пор остаются предметом споров и исследований. Изначально гипотезы образования Солнца и Солнечной системы можно разделить на две группы. Гипотезы первой группы базируются на предположении о совместном образовании Солнца и его планетной системы из единой

протосолнечной туманности. Вторая группа гипотез исходит из раздельного образования Солнца и его протопланетного диска. В обоих случаях, однако, образование самого протопланетного диска было непосредственно связано с формированием важнейших характеристик Солнца как звезды (возраст, химический состав и др.).

Датировка возраста метеоритов и лунного вещества радиохимическим методом (по радиоактивным «часам») позволяет определить абсолютный возраст Солнечной системы вместе с ограничениями на масштаб времени некоторых этапов формирования планет. Так, время формирования крупных тел в поясе астероидов оказывается меньше 5 млн. лет, а время окончательного формирования (затвердевания) Земли составляет около 100 млн. лет. При применении радиохимического датирования к скальным породам на поверхности Земли, самые старые скалы показывают возраст 3.8 млрд. лет, а в случае метеоритов старейшие из них имеют возраст 4.57 млрд. лет. Это значение является «типичной» оценкой возраста Солнечной системы, основанной на наблюдениях.

В соответствии с теорией звездной эволюции, Солнце является относительно молодой звездой так называемого третьего поколения с высоким содержанием металлов. Оно образовалось из останков звёзд первого и второго поколений, во время эволюции которых как раз и происходило образование тяжелых элементов. Текущий возраст Солнца (точнее - время его существования на главной последовательности, t_S) можно оценить с помощью компьютерных моделей звёздной эволюции. Одна из недавних оценок такого рода дала значение $t_S \approx 4.57$ млрд. лет. Последние данные космохронологии (науки о временных веках нашего мира), позволяют считать, что полный возраст Солнечной системы (включая Солнце) составляет $t_S = 4,7 \pm 0.1$ млрд. лет. Возраст же самой Вселенной, оцененный совсем недавно по данным наблюдений реликтового микроволнового фона Галактики на КА WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), оказался равным $t_G = 13.73$ млрд. лет с точностью около ± 0.12 млрд... Более ранняя оценка возраста Галактики – около 15 млрд. лет – была получена радиохимическим методом при ряде модельных предположений. Из сравнения t_S и t_G видно, что к моменту рождения Солнца наш Млечный Путь уже существовал около 9 млрд. лет, - достаточный срок для эволюции и взрыва массивных звезд, которые насытили межзвездный газ обилием химических элементов. Звезда такой массы, как Солнце, должна существовать на главной последовательности в общей сложности около 10 миллиардов лет. Таким образом, сейчас Солнце находится примерно в середине своего жизненного цикла.

Внешние слои Солнца состоят в основном из водорода ($\leq 72\%$) и гелия ($\leq 27\%$). Имеется также незначительное количество ($\leq 1\%$) других элементов (например, ядер C, N, O, Ne, Si, S), включая металлы Fe, Ni, Mg, Ca и Cr, образованные из водорода в реакциях ядерного синтеза. Эти соотношения меняются со временем (очень медленно) в ходе ядерных реакций, по мере превращения небольших, легких атомов в более массивные. В целом, состав Солнца определяется методами спектроскопии при изучении спектра его видимого света. Элемент гелий был назван в честь Солнца ("Helios" по-гречески), так как он впервые был открыт на Солнце. Гелия очень много на Солнце, но мало на Земле. Этот элемент был открыт 150 лет назад, во время полного солнечного затмения 1868 г. Его содержание в солнечной атмосфере представляет большой интерес не только для физики Солнца, но и для понимания химической эволюции нашей Галактики (см. раздел 6.3).

Температура Солнца на различных глубинах определяется путем теоретических расчетов, основанных на моделях его внутреннего строения. Во внешних слоях температуру обычно определяют по измерениям энергии излучения Солнца в форме тепла и света. Температура в недрах Солнца, по различным теоретическим оценкам, может находиться в пределах от 10 до 22.5 млн. градусов ($^{\circ}\text{K}$). Недавние эксперименты по регистрации солнечных термоядерных нейтрино в целом подтвердили правильность стандартной солнечной модели (ССМ), в которой наиболее вероятной для центра Солнца, считается температура T_C около 15 млн. градусов ($\geq 1.5 \times 10^7 \text{ K}$). Температура фотосферы («поверхности» Солнца) составляет около 5 800 К. Внешняя атмосфера Солнца (корона),

обычно наблюдаемая во время солнечного затмения, снова становится раскаленной до 1.5-2 млн. градусов. В центре больших пятен температура сравнительно низка - около 4300 К.

2.4. Источник энергии

Для не очень массивных звезд типа Солнца (с массой $M \leq 1.2M_{\odot}$) основным источником энергии считается так называемый *водородный цикл* (протон-протонный или *pp-цикл*) – последовательность (цепь) термоядерных реакций, приводящая к превращению водорода в гелий без участия катализаторов. Для звезд массивнее Солнца основным источником энергии служит так называемый *углеродный цикл* (или *CNO-цикл*), который также приводит к образованию гелия из водорода, но уже с участием углерода С, азота N, кислорода О и фтора F в качестве катализаторов. В центре таких звезд (при $M \geq 1.2M_{\odot}$) температура достаточно высока для того, чтобы CNO-цикл был эффективнее водородного цикла. Вклад CNO-цикла в полную светимость Солнца составляет всего ~1.5%, в стандартной солнечной модели. Другие ядерные реакции в солнечных условиях также несущественны.

Водородный цикл начинается реакцией столкновения двух протонов p с образованием ядра дейтерия 2D , позитрона e^+ и электронного нейтрино ν_e :



Эта реакция – самая медленная, так как она идет по каналу слабого взаимодействия, характерное время ее протекания составляет $\sim 10^{10}$ лет. По существу, именно эта реакция определяет темп энерговыделения (в расчете на 1 г вещества) и время жизни звезды на главной последовательности. Образовавшееся нейтрино почти беспрепятственно покидает Солнца и безвозвратно уносит энергию до 0.42 МэВ. С вероятностью <1% возможен и другой канал для рождения нейтрино и дейтерия:



причем энергия нейтрино будет даже больше (1.442 МэВ). Однако решающее значение для генерации энергии Солнца имеют следующие две реакции:



Реакция (2) начинается почти сразу вслед за рождением дейтрона (1), причем ее характерное время составляет всего ~1.5 сек. Она сопровождается образованием ядра 3He и генерацией гамма-кванта, при полном энерговыделении около 5.5 МэВ. Далее с вероятностью 65% происходит слияние двух ядер 3He в одно ядро 4He (которое обычно называют α -частицей), при этом высвобождаются также два протона. Реакция (3) протекает с характерным временем $\sim 10^6$ лет, а ее полное энерговыделение составляет ~12.8 МэВ. Выпишем оставшиеся реакции *pp*-цикла, которые отличаются своими вероятностями, временными масштабами и полным энерговыделением:



Общее превращение, происходящее в результате реакций (1)-(10), можно символически представить уравнением



т.е. четыре протона сливаются, образуя α -частицу, два позитрона и два нейтрино электронного типа. Позитроны аннигилируют со свободными электронами, добавляя энергию $2m_e c^2 = 1.02$ МэВ (m_e – масса электрона, c – скорость света) к ядерной и кинетической энергиям синтеза частиц. Полная энергия, высвобождаемая в процессе синтеза (11), составляет ≈ 26.731 МэВ, лишь малая доля ее (около 0.6 МэВ) уносится нейтрино.

Нетрудно подсчитать, что при сгорании 1 г водорода в недрах Солнца выделяется энергия $\sim 6.3 \times 10^{18}$ эрг = 6.3×10^{11} Дж. Хотя эти оценки не вполне однозначны, подсчитано, что за 1 с в термоядерной топке Солнца сгорают около 6×10^8 т ядер водорода. При таком темпе горения Солнце, согласно стандартной солнечной модели, израсходует все свое горючее через 5 млрд. лет (рис.2.3). После того, как Солнце пройдет фазу красного гиганта, термические пульсации приведут к тому, что Солнце взорвется, т.е. его внешняя оболочка будет сорвана. Из неё образуется планетарная туманность - гигантская оболочка, которая разрушит все планеты Солнечной системы. В центре туманности останется сформированная из очень горячего ядра Солнца звезда типа «белый карлик», которая в течение многих миллиардов лет будет постепенно остывать и угасать...

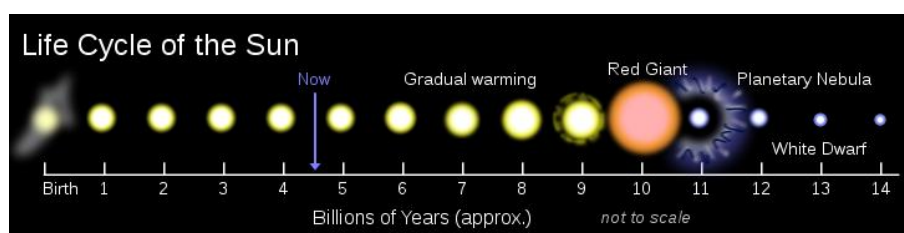


Рис.2.3. Жизненный цикл Солнца (Sun Life ru.jpg, Википедия — свободная энциклопедия): От протосолнечной туманности через стадию желтого карлика (в настоящее время), стадию нагрева и расширения до красного гиганта, взрыва и превращения в планетарную туманность со звездой типа «белый карлик» в центре бывшей Солнечной системы. . .

2.5. Понятие о гелиосфере

В последние десятилетия, после начала спутниковой эры и открытия солнечного ветра, к описанным выше общим характеристикам Солнца как звезды добавилось понятие гелио-магнитосферы (или, более упрощенно, гелиосферы). В настоящее время с помощью космических аппаратов (КА) *Voyager 1* и *Voyager 2* уже ведутся прямые исследования взаимодействия солнечного ветра с межзвездным окружением Солнца. По современным представлениям, это окружение представляет собой частично ионизованное локальное межзвездное облако (ЛМО), состоящее из газа и пыли. Это облако движется относительно Солнца со скоростью ~ 26 км/с, имеет температуру $\sim 10^4$ К и концентрацию частиц $\sim 0.2-0.3$ см $^{-3}$. Поскольку физические характеристики межпланетной среды вблизи Солнца (до расстояний ~ 1 а.е.) и вдали от него сильно различаются, то область внутри земной орбиты часто называют внутренней гелиосферой (**inner heliosphere**). Её свойства к настоящему времени наиболее хорошо изучены, и именно здесь формируются основные явления «космической погоды» (см. главу 9).

Область взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой принято называть гелиосферным интерфейсом. Его внутренней границей является терминальная ударная волна (**termination shock**). Согласно принятым ранее представлениям (по крайней мере, до 2005 г.), эту область считали источником наблюдаемой у Земли аномальной компоненты космических лучей, или аномальных космических лучей (АКЛ). Последние образуются за счет диффузионного ускорения на фронте гелиосферной ударной волны (механизм такого ускорения детально рассматривается в разделе 5.6). Фактически

ускорению подвергаются тяжелые частицы межзвездной среды (гелий, углерод, азот, кислород и других элементы), которые испытали ионизацию за счёт обмена зарядами с протонами солнечного ветра, фотоионизации или столкновений с электронами. В свете современных данных КА *Voyager 1* и *Voyager 2*, однако, эта красивая гипотеза уже не может считаться абсолютно неуязвимой (см. подробнее раздел 2.6).

Предполагаемая структура и физическое окружение гелиосферы изображены на схематическом рис.2.4: Солнце находится в центре светлого кружка, орбиты планет не показаны, положения КА *Pioneer 10* (P10), *Voyager 1* (V1) и *Voyager 2* (V2) относительно Солнца показаны условно, так как они все время находятся в движении. Космический зонд *Pioneer 10* был запущен в марте 1972 г. в направлении звезды Aldebaran (созвездие Taurus). К декабрю 2008 г. *Pioneer 10* пролетел более 100 а.е. Однако уже с 2003 г. связь с ним была потеряна (из-за израсходования ресурса бортового источника питания). Два одинаковых аппарата *Voyager 1* (V1) и *Voyager 2* (V2) были запущены в 1977 г. с небольшим интервалом, но в различных направлениях. В августе 2009 г. они находились на расстояниях 109.7 а.е. и 89.7 а.е., соответственно. Оба они постепенно удаляются от Солнца со скоростью примерно 3 а.е./год, и по оценкам специалистов NASA, их активное существование может продлиться до 2020 г.

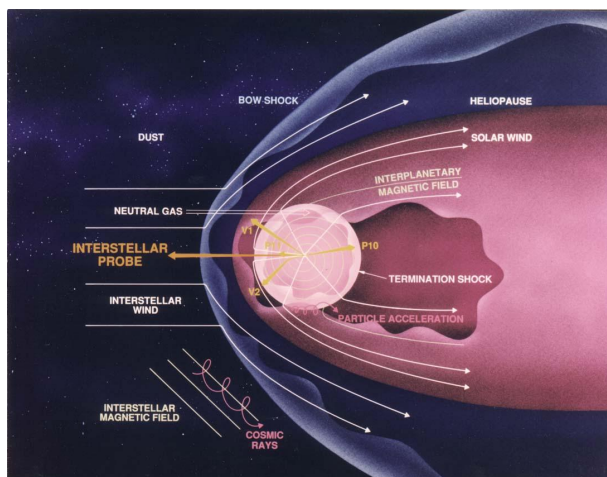


Рис.2.4. Схематическая картина гелиосферы (<http://interstellar.jpl.nasa.gov/>). Условно показаны положения КА *Pioneer 10* (P10), *Voyager 1* (V1) и *Voyager 2* (V2), основные компоненты межзвёздной среды (межзвёздный ветер, пыль, магнитное поле, космические лучи) и структурные особенности гелиосферы (головная ударная волна, гелиопауза, гелиошит, солнечный ветер и межпланетное магнитное поле).

Гелиосфера – это полость, образованная в межзвездной среде за счет движения (давления) солнечного ветра. По форме и структуре она напоминает магнитосферу Земли, сжатую в направлении движения и сильно вытянутую в виде хвоста в противоположном направлении. На границе и внутри гелиосферы происходит тесное взаимодействие частиц межзвездного газа и пыли, проникающих из Галактики, с плазмой солнечного ветра. До расстояния ~ 60 а.е. солнечный ветер распространяется со сверхзвуковой скоростью свыше 10^6 км/час. По мере того, как ветер начинает сталкиваться с межзвездным веществом, его движение замедляется до дозвуковых скоростей. Там, где солнечный ветер становится дозвуковым, образуется терминальная ударная волна (ТУВ, termination shock).

При этом область, где достигается баланс между давлениями межзвездной среды и солнечного ветра, называют гелиопаузой (**heliopause**).

С другой стороны, межзвездная среда, двигаясь в противоположном направлении (навстречу Солнцу) со сверхзвуковой скоростью, постепенно замедляется по мере взаимодействия с гелиосферой. В области, где межзвездная среда становится дозвуковой, образуется головная ударная волна (**bow shock**). Область гелиосферы за пределами терминальной ударной волны называют гелиошитом (**heliosheath**). Здесь солнечный ветер замедляется, сжимается и становится турбулентным благодаря его взаимодействию с межзвездной средой. Расстояние гелиошита от Солнца в лобовой точке достигает 80-100 а.е., а толщина этой оболочки, по разным оценкам, составляет ~10-100 а.е. В целом гелиошит по форме похож на хвост кометы, который может простирается в направлении от Солнца до расстояний, в несколько раз больших, чем в лобовой точке. Полеты космических зондов *Voyager 1* и *Voyager 2* включают изучение гелиошита.

Подобие между формой магнитосферы Земли и формой гелио-магнитосферы представляется вполне закономерным, так как и Земля, и Солнце обладают собственными магнитосферами, которые находятся в плазменном окружении, соответственно, в виде солнечного ветра (Земля) и межзвездного ветра (Солнце). Как будет видно из следующих глав, строение и динамика гелиосферы отражают физическую иерархию объектов и процессов в космосе. При этом физика гелиосферы выступает как связующее звено между (фундаментальной) физикой плазмы и (большой) вне-гелиосферной астрофизикой...

2.6. Методы изучения Солнца и гелиосферы

До середины 20-го века астрономы изучали Солнце в основном оптическими методами с применением специальных инструментов в наземных обсерваториях. Впоследствии к наблюдениям в оптическом диапазоне добавились наблюдения радиоизлучения Солнца. Очень полезными оказались также косвенные методы - по эффектам воздействия солнечных излучений на ионосферу и магнитосферу Земли, по вариациям космических лучей и т.д. По совокупности этих данных ученые анализируют, как и почему количество световой энергии от Солнца меняется во времени, исследуют воздействие солнечного излучения на климат Земли. Гелиофизики изучают спектральные линии, магнитное поле Солнца, солнечные вспышки, выбросы коронального вещества (СМЕ), солнечные космические лучи, солнечный ветер и много других солнечных явлений. Внешние области Солнца (корона) исследуются во время солнечных затмений методами спектроскопии.

Наряду с наземными наблюдениями, уже несколько десятилетий для изучения Солнца широко используются измерения солнечных излучений и частиц с борта космических аппаратов (космических зондов). При этом, однако, приходится учитывать тот факт, что плоскость земной орбиты (плоскость эклиптики) всего на 7.25 градусов отличается от плоскости солнечного экватора. Поэтому все ИСЗ позволяют наблюдать Солнце лишь в плоскости эклиптики (точнее, в области малых гелиоширот $\pm 7.25^\circ$), так что до запуска *Ulysses* в 1990 г. по существу ни один КА не «видел» Солнца «сверху». Даже космические аппараты, предназначенные для орбитального движения вокруг Солнца, двигались в плоскостях, близких к плоскости эклиптики, так как прямой запуск КА на орбиту с высоким наклоном потребовал бы недопустимо большой пусковой ракеты. В этих условиях уже несколько десятилетий назад возникла идея использовать гравитационные силы планет для изменения орбит КА внутри Солнечной системы. Приведем несколько характерных примеров.

Уже в 1970-ые годы несколько КА (*Mariner 10* и *Pioneer 11*, а также *Voyager 1* и *Voyager 2*) осуществили вспомогательные гравитационные маневры. Однако их целью было достичь других планет, которые тоже вращаются вокруг Солнца вблизи плоскости эклиптики, так что эти маневры приводили в основном к изменениям орбит КА в той же плоскости. Однако подобные маневры возможны и в других плоскостях. Например,

подходящий пролёт вблизи Юпитера может в принципе изменить орбиту КА весьма радикальным образом. В октябре 1990 г. для исследования высокоширотных областей Солнца, а именно – его магнитных полей, протуберанцев и выбросов коронального вещества – с борта «космического челнока» был запущен КА *Ulysses*, совместный проект European Space Agency (ESA) и National Aeronautics and Space Administration (NASA). За счет орбитального гравитационного маневра в поле тяжести Юпитера космический зонд вышел на полярную орбиту вокруг Солнца. В 1994 г. он прошел над северным полюсом Солнца, а в 1995 г. – над его южным полюсом. Второй оборот вокруг Солнца КА *Ulysses* завершил в декабре 2001 г. С помощью этого КА впервые удалось «увидеть» полярные области Солнца, недоступные для наблюдений с Земли. При этом была получена уникальная «попутная» информация о солнечном ветре, энергичных частицах в межпланетной среде и т.д.

Добавим, что с середины 70-ых годов прошлого столетия вблизи Солнца в течение нескольких лет работали два КА *Helios* (<http://www.deutsches-museum.de/>), причем они приближались к Солнцу в плоскости эклиптики на расстояние около 0.3 а.е. Зонд *Ulysses* впервые вышел далеко из плоскости эклиптики, пролетел над полярными областями Солнца на расстоянии 2 а.е. (<http://ulysses.jpl.nasa.gov/>) и в 2008 г. завершил свою миссию. В настоящее время в стадии подготовки находятся другие космические эксперименты, в которых Солнце будут наблюдать как минимум из трех точек в гелиосфере вблизи Солнца (например международный проект *ПЭП* – Полярно-Экваториальный Патруль). В этом проекте в процессе вывода космических аппаратов на расчётные орбиты при выполнении нужных маневров будет несколько раз использоваться гравитационное поле Венеры. Наблюдения с различных гелиоширот («снизу» и «сверху» относительно плоскости эклиптики) крайне важны, в частности, для слежения за «космической погодой» (см. раздел 8.2) в связи с подготовкой к пилотируемым полетам к Луне и Марсу. При этом будут постоянно контролироваться линия «Земля-Солнце» и проводиться непрерывные измерения потоков солнечных космических лучей и других солнечных излучений.

Физические исследования Солнца с борта космических аппаратов также представляют громадный интерес. Так, на российском КА *CORONAS-F*, работавшем на околоземной орбите в 2001-2005 гг., удалось получить уникальные данные по сейсмологии Солнца. Их интерпретация позволяет исследовать структуру и динамику глубинных слоев Солнца, лучше понять механизм солнечного динамо, устойчивость солнечных пятен, образование магнитных жгутов и петель и т.д. Еще один наглядный пример эффективности таких наблюдений приведен на рис.2.5, где показана поверхность Солнца, запечатленная солнечным оптическим телескопом на КА *Hinode* 12 января 2007 г.

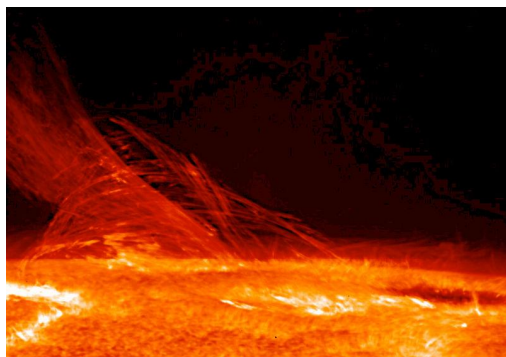


Рис.2.5. Поверхность Солнца по наблюдениям солнечным оптическим телескопом на КА *Hinode* 12 января 2007 г. Хорошо видны СМЕ (слева) и солнечное пятно (справа).

На рис.2.5 хорошо видны огромный выброс плазмы с поверхности Солнца (слева) и солнечное пятно (справа). Космический зонд *Hinode* (Solar-B или “Sunrise” – «Восход Солнца») – это совместный проект Японии, США и Великобритании. Спутник был запущен в Японии 22 сентября 2006 г. как продолжение миссии КА *Yohkoh* (“Solar-A”, или “Sunbeam” – «Солнечный луч»). Начальная орбита имела параметры: высота перигея 280 км, высота апогея 686 км, наклонение орбиты 98.3°. Затем спутник был переведен на почти круговую гелио-синхронную орбиту над линией терминатора день/ночь. Это позволяет наблюдать Солнце почти непрерывно. В настоящее время «на ближних подступах» к Солнцу, кроме *Hinode*, работают еще четыре КА: *SOHO*, *RHESSI*, *TRACE* и *STEREO*.

С выходом за пределы ионосферы и магнитосферы Земли солнечная астрономия стала всеволновой – от ядерного гамма-излучения (длина волны ~ 0.1 Å) и рентгеновских лучей (≥ 1 Å) до радиоволн километрового диапазона. Если же говорить об исследовании глобальных характеристик Солнца как звезды, то надо снова вернуться к двум космическим зондам *Voyager 1* и *Voyager 2*. Космофизиков давно интересовал вопрос о границах влияния Солнца на окружающее пространство. Однако до последнего времени основную информацию о структуре и свойствах гелиосферы на больших расстояниях удавалось получать только косвенными методами - по вариациям галактических космических лучей (ГКЛ) и их аномальной компоненты, по измерениям рассеянного солнечного излучения в линии *La*, по другим астрофизическим данным. В частности, при изучении 11-летней вариации ГКЛ выяснилось, что их интенсивность по-разному меняется на фазах спада и подъёма 11-летнего цикла СА, т.е. космические лучи хорошо «чувствуют» изменения «космической погоды» даже на далёких расстояниях. Этот эффект получил название «гистерезиса космических лучей», по аналогии с известным явлением из области магнетизма. Как раз по размаху кривой гистерезиса (по наземным данным) и был впервые оценен «радиус» гелиосферы (≤ 100 а.е.). Это случилось около 50 лет назад...

Интересные данные были получены в «ближней зоне» гелиосферы с помощью ряда КА, которые зондировали солнечный ветер вплоть до орбит Юпитера и Сатурна. Но наиболее ценная информация пришла с борта двух самых дальних космических зондов. В декабре 2004 г. КА *Voyager 1* (V1) пересек терминальную ударную волну (ТУВ) на расстоянии 94 а.е. от Солнца, а другой космический зонд, *Voyager 2* (V2), пересек ее в августе 2007 г. на расстоянии 84 а.е. Разница в расстояниях (примерно на 10 а.е.) может свидетельствовать об асимметрии гелиосферы, даже в её «лобовой» части (см. рис.2.4). В августе 2009 г. *Voyager 1* находился уже на расстоянии 109.7 а.е., откуда радиосигнал идёт до Земли более 15 часов.

Как известно, в начале 1970-х гг. изучение ГКЛ малых энергий, проводимое с помощью КА, привело к открытию аномальной компоненты КЛ (АКЛ). Её составляют не полностью ионизованные атомы He, C, N, O, Ne и Ar. Распространённость элементов АКЛ значительно отличается от соответствующих величин в ГКЛ. Кроме того, в области энергий от нескольких единиц до нескольких десятков МэВ/нуклон спектр частиц АКЛ существенно отличается от спектра ГКЛ: наблюдается возрастание потока частиц, связанное, как полагали до недавнего времени (раздел 2.5), с ускорением ионов в ударной волне на границе гелиомагнитосферы и последующей диффузией ускоренных частиц внутрь гелиосферы. Однако в последние годы, после получения данных КА *Voyager 1* и *Voyager 2* с расстояний ~ 90 -110 а.е. (рис.2.6), картина этого явления значительно усложнилась.

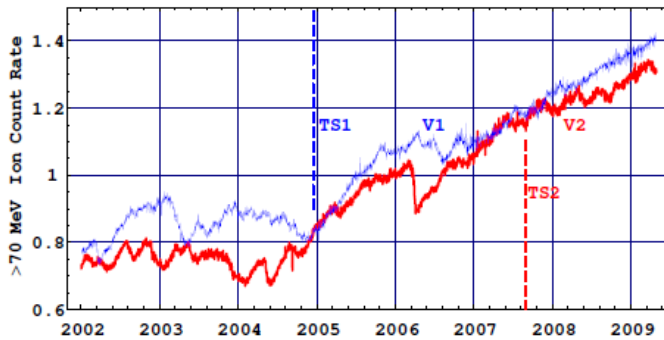


Рис.2.6. Вариации потоков ионов с энергией >70 МэВ на границе гелиосферы по измерениям на космических зондах *Voyager 1* и *Voyager 2* (Kiraly, 2009).

На рис.2.6 показаны вариации ГКЛ до и после пересечения терминальной ударной волны обеими аппаратами (TS1 и TS2). Видно, что, начиная с конца 2004 г. поток ГКЛ с энергией ионов >70 МэВ на обоих КА в среднем растёт. Иными словами, поток космических лучей постоянно растёт по мере удаления КА от Солнечной системы и гелиосферы в целом. Эти первые сведения о ГКЛ непосредственно *из межзвёздной среды* поднимают новые вопросы об источниках и природе (механизмах генерации) аномальной компоненты космических лучей.

3. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

**Мы живём в солнечной короне.
- Sydney Chapman (1957).**

Прежде чем переходить к описанию явлений солнечной активности, необходимо хотя бы вкратце познакомиться со строением и физическими свойствами самых внешних слоев Солнца. Именно там и происходят основные события - рождаются и распадаются пятна и факелы, образуются гранулы, волокна и протуберанцы, возникают солнечные вспышки, происходят выбросы коронального вещества, формируется солнечный ветер, образуются магнитные облака, ударные волны и т.д. В качестве характеристики уровня СА обычно используют данные о числе пятен на фотосфере. Пятна содержат необходимый запас магнитной энергии, а ее изменения со временем и порождают основные явления СА. Не все эти активные образования и явления описываются ниже с одинаковой полнотой. Некоторые дополнительные детали будут приведены в последующих главах.

3.1. Строение солнечной атмосферы

Источник энергии и основные физические механизмы для развития явлений солнечной активности фактически остаются невидимыми, так как они находятся под поверхностью Солнца – в его так называемой конвективной зоне (см. рис.1.2). Согласно стандартной солнечной модели (ССМ), ближе к поверхности Солнца возникает вихревое перемешивание плазмы, и перенос энергии наружу совершается преимущественно движениями самого вещества. Такой способ передачи энергии называется конвекцией, а подповерхностный слой Солнца, где она происходит, - конвективной зоной (**convective zone**). Ее толщина составляет примерно 200 000 км, а температура падает с высотой от $\sim 10^6$ до $\sim 6\,000$ К. По современным данным, роль конвективной зоны в физике солнечных процессов огромна, так как именно в ней зарождаются разнообразные движения солнечного вещества и магнитные поля. В частности, исключительно велика роль конвективной зоны в поддержании гидростатического и термодинамического равновесия Солнца. Тепловое равновесие означает, что процессы выделения энергии в недрах Солнца, ее теплоотвода (теплопередачи) к поверхности и излучения с поверхности должны быть сбалансированы. Теория эволюции звезд показывает, что светимость слабо зависит от скорости выделения энергии в ядре Солнца и определяется в основном законом (механизмом) теплоотвода. В этом заключается один из парадоксов гидростатического равновесия звезд, этим же объясняется и относительно низкая температура фотосферы Солнца. Необходимость поддержания теплового баланса приводит к тому, что звезда оказывается устойчивой саморегулирующейся системой.

Наблюдаемое излучение Солнца возникает в его тонком внешнем слое, который называется **фотосферой (photosphere)**. Собственно атмосфера Солнца как раз и начинается с фотосферы, нижнюю границу которой можно условно считать поверхностью Солнца. Видимая поверхность Солнца определяется той глубиной в атмосфере, ниже которой она практически непрозрачна. За эту поверхность условно принимают уровень, на котором при наблюдении сверху так называемая оптическая толщина на длине волны $\lambda = 500$ нм (5000 Å) достигает единицы. Он не отсчитывают высоту h в атмосфере.

Солнце – газовый шар, не имеющий четких границ. Однако мы видим его резко очерченный край (лимб) как раз потому, что практически все излучение Солнца исходит из фотосферы. Фотосфера – это нижняя часть атмосферы Солнца, видимой в оптическом диапазоне длин волн. Ее толщина составляет ≤ 500 км, температура – около 5 800 К (\approx

6 000 °C). Массовая плотность вещества на нижней границе фотосферы $\rho \approx 5 \times 10^{-7}$ г/см³, что соответствует концентрации частиц плазмы $N \sim 3 \times 10^{17}$ см⁻³; на верхней границе она в тысячу раз меньше.

На поверхности Солнца можно разглядеть ячеистую структуру, состоящую из ярких **гранул (granule)** на фоне более темного межгранулярного пространства (см., например, рис.2.1, слева). Размеры гранул невелики, 1000–2000 км (около 1" дуги), расстояние между ними – 300–600 км. На Солнце наблюдается одновременно около миллиона гранул (рис.3.1). Каждая гранула существует несколько минут. Гранулы окружены темными промежутками («сотами»). В гранулах вещество поднимается, а вокруг них – опускается. Грануляция – проявление конвекции в более глубоких слоях Солнца. Гранулы создают общий фон, на котором можно наблюдать несравненно более масштабные образования – **активные области (active regions)**. Последние включают совокупность изменяющихся структур (пятна, факелы, вспышки, протуберанцы и др.) в некоторой ограниченной области солнечной атмосферы. Активные области (АО) связаны с усилением в них магнитного поля от значений ~ 10 –20 Гс до $\sim (4\text{--}5) \times 10^3$ Гс.

Самое заметное образование на фотосфере – это солнечные пятна, области округлой или овальной формы, обычно размером 10–20 тысяч км и с яркостью всего 1–15 % от яркости окружающей фотосферы. На рис.3.1 приведена типичная фотография солнечного пятна, видны некоторые детали его структуры. Вокруг самой темной части, тени пятна, имеется более светлая широкая кайма – полутень, состоящая из вытянутых примерно по радиусу от центра пятна темных и светлых волокон полутени. Размеры самых крупных пятен могут достигать 100 тысяч км. Время жизни пятна зависит от его размеров и меняется от нескольких часов или суток для мелких пятен (пор) до нескольких месяцев – для самых крупных пятен. Температура в тени на 2000 К ниже, чем в спокойной фотосфере, поэтому пятно и кажется темным. Понижение температуры обычно объясняется подавлением конвекции сильным магнитным полем, которое имеется в пятне. Индукция магнитного поля так же тем больше, чем крупнее пятно. В порах она составляет около 1000 Гс, в больших пятнах до 4000 Гс.

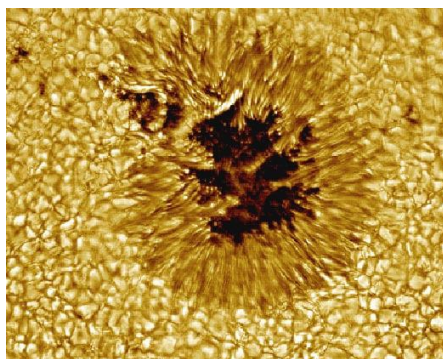


Рис. 3.1. Солнечное пятно и фотосферная грануляция по наблюдениям 5 октября 1998 г. Снимок получен на башенном вакуумном телескопе Национальной обсерватории (Kitt Peak National Observatory), США (<http://www.phy.mtu.edu/apod/ap981005.html>).

За фотосферой далее по высоте следует **хромосфера (chromosphere)** – красноватый слой с температурой от $\sim 6\,000$ °C (в нижней части) до $\sim 50\,000$ °C (на больших высотах) и толщиной до 7 000 км. Ее цвет определяется свечением возбужденных атомов водорода в красной области спектра (в основном в линии 656.3 нм = 6563 Å). Хромосфера Солнца хорошо видна только в моменты полных солнечных затмений (см. рис.1.1, справа). Луна

полностью закрывает фотосферу, и хромосфера вспыхивает, как небольшое кольцо ярко-красного цвета, окруженное жемчужно-белой короной (**corona**). Промежуточная область между фотосферой и хромосферой (на высоте $h \approx 500$ км) известна под названием **области температурного минимума**. Далее температура в хромосфере быстро растет, достигая в самых верхних ее слоях значений $\sim 3 \times 10^4$ К и выше, вплоть до температуры солнечной короны $\sim 10^6$ К. Эти области относятся уже к так называемому **переходному слою** (transition layer) между хромосферой и короной.

Корона (corona) – это самая внешняя, самая разреженная и самая горячая часть солнечной атмосферы, с температурой до $\sim 2 \times 10^6$ К и с концентрацией частиц плазмы от 10^9 см⁻³ внизу до 10^4 см⁻³ на расстоянии $10 R_{\odot}$. В целом корона прослеживается от солнечного лимба до расстояний в десятки солнечных радиусов (т.е. она вытянута на несколько миллионов километров). Яркость короны в миллионы раз меньше, чем фотосферы, поэтому корону можно видеть только во время полного солнечного затмения, либо с помощью внезатменных коронографов, устанавливаемых высоко в горах или на борту КА.

Важной особенностью короны является ее лучистая структура. Корональные лучи имеют самую разнообразную форму. С 11-летним циклом Солнца меняется общий вид солнечной короны. В эпоху минимума основное свечение исходит из экваториальных областей; в эпоху максимума форма короны становится близкой к сферической. Наблюдения короны с борта КА в рентгеновском диапазоне позволили обнаружить еще одну структурную (и физическую) особенность – так называемые «**корональные дыры**» (**coronal hole**). Они представляют собой области с относительно низкой температурой (около $0,8 \times 10^6$ К), пониженной плотностью плазмы (примерно 0.25 плотности спокойных областей короны) и радиальным по отношению к Солнцу магнитным полем, причем его силовые линии лишены арочных магнито-плазменных структур (**корональных дуг**) (**coronal arch**) и свободно уходят в межпланетное пространство.

Как следует из сказанного выше, корона Солнца примерно в 300 раз горячее, чем его видимая поверхность (фотосфера). Уже более 70 лет ученые ищут загадочный источник энергии, разогревающий газ корональных дуг до миллионов градусов (рис.3.2). Дуги – это потоки газа, которые поднимаются на сотни тысяч километров над поверхностью Солнца, прежде чем упасть обратно в солнечную фотосферу с большой скоростью. Миллионы корональных дуг различных размеров составляют корону Солнца.



Рис.3.2. Ультрафиолетовое изображение корональной дуги, полученное с борта КА TRACE (Credit: LMSAL/NASA/JAXA/NAOJ). Для сравнения в центре фотографии показан размер Земли (темный шарик).

Теоретически нетрудно показать, что прямого потока тепла из фотосферы недостаточно для того, чтобы привести к такой высокой температуре короны. Поэтому в целом предполагается, что энергия для нагрева короны поставляется турбулентными движениями из-под фотосферы (из конвективной зоны). Для переноса этой энергии в корону предложено два механизма. Во-первых, это нагрев за счет звуковых и магнитогидродинамических (МГД) волн, которые генерируются в конвективной зоне. Они

распространяются в корону и там рассеиваются, при этом их энергия переходит в тепловую энергию корональной плазмы. Второй, альтернативный механизм – это магнитное нагревание, при котором магнитная энергия, непрерывно генерируемая фотосферными движениями, высвобождается путём пересоединения магнитного поля в форме больших солнечных вспышек или же большого количества мелких вспышек (так называемых «**нано-вспышек**» - **nanoflares**).

Снимки, сделанные более 10 лет назад на КА *SOHO*, показали, что энергия выделяется при взаимодействии петель (арок) - магнитоплазменных образований, вытянутых вдоль магнитных силовых линий. Через петли текут чрезвычайно сильные электрические токи, при взаимодействии петель эти токи и магнитные поля перезамыкаются. Возникающие электрические разряды нагревают корону. При этом энергии, выделяемой при взаимодействии петель, оказывается вполне достаточно для нагрева короны до температур свыше 10^6 K (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>).

С другой стороны, наблюдения на борту КА *TRACE* в 1998-2000 гг. позволили существенно уточнить картину. Ранее считали, что нагрев осуществляется более или менее равномерно по всей толще короны и наивысшая температура достигается в самой высокой точке петли, где низкая плотность газа уменьшает эффективность излучения. Однако данные приборов *TRACE* показали, что температура газа мало изменяется с высотой и, следовательно, нагрев происходит лишь в самой нижней ее части. Оказалось, что источник энергии, разогревающий корону, находится в пределах 16 000 км от видимой поверхности Солнца. Петли газа нагреваются и поднимаются вдоль линий магнитного поля Солнца на высоту до 480 000 км, затем охлаждаются и падают на его поверхность со скоростью более 100 км/с. Однако конкретные явления, приводящие к разогреву короны, по-прежнему остаются загадочными.

Еще в начале 80-ых годов прошлого столетия было показано, что все волны, кроме МГД-волн Альфвена, рассеиваются или отражаются до того, как достигнут короны, диссипация же альфвеновских волн в короне затруднена. Поэтому многие исследователи не исключают альтернативного, магнитного механизма нагревания, упомянутого выше, хотя окончательная ясность в этом вопросе ещё не достигнута.

В конце 2006 г. начали поступать данные с борта новой космической обсерватории – международного КА *Hinode*. Благодаря значительному улучшению пространственно-временного разрешения аппаратуры для наблюдений, уже в начале 2007 г. были получены сведения о присутствии альфвеновских волн, по крайней мере, на уровне хромосферы. Более того, было показано, что их энергии более чем достаточно, чтобы поддерживать температуру короны и обеспечить энергетику солнечного ветра. Компьютерное моделирование подтвердило возможное присутствие альфвеновских волн в хромосфере. Однако ученые пока воздерживаются от окончательных выводов, так как одни только хромосферные данные еще не доказывают, что альфвеновские волны достигают больших высот и разогревают атмосферу Солнца в целом.

3.2. Солнечный ветер

Кроме высокой температуры, корона Солнца отличается и другим замечательным свойством: она непрерывно расширяется в межпланетное пространство, унося солнечное вещество (плазму) вместе с вмороженными в нее магнитными полями (т.е. солнечную магнитоплазму) на огромные расстояния от Солнца. Физическая причина расширения вполне понятна: температура короны настолько высока, что гравитационное притяжение Солнца не может удерживать плазму. Иными словами, при температуре около 2×10^6 K корона не может находиться в условиях гидростатического равновесия, и это расширение при имеющихся граничных условиях должно приводить к разгону коронального вещества до сверхзвуковых скоростей. В итоге уже на расстояниях $r \sim (3-4)R_c$ в расширяющейся короне формируется непрерывный и (в среднем) довольно устойчивый поток частиц,

навсегда покидающих Солнце (**солнечный ветер**, **solar wind**). Основы теории и первые модели солнечного ветра были предложены ещё в 50-ых годах прошлого века, но до сих пор не утихают дискуссии по отдельным аспектам этого фундаментального астрофизического явления. В становлении и развитии проблемы солнечно-земных связей очень плодотворной оказалась радикальная идея выдающегося британского математика и геофизика С. Чепмена (1957): «межпланетный газ – это просто продолжение солнечной короны».

На планетах Солнечной системы, обладающих магнитным полем (Земля, Юпитер, Сатурн и др.), солнечный ветер порождает такие явления, как, например, магнитные бури и полярные сияния; при взаимодействии их магнитосфер с солнечным ветром образуются радиационные пояса планет. Влиянием солнечного ветра объясняется также различная форма кометных хвостов, всегда направленных от Солнца. Область пространства, занятого солнечным ветром, простирается до расстояний ≥ 100 а.е. В конечном счете, солнечный ветер образует гелиосферу (**гелиомагнитосферу**), которая препятствует проникновению межзвёздного газа в Солнечную систему (рис.2.4).

Солнечный ветер представляет собой гелиево–водородную плазму, которая состоит в основном из электронов, протонов и ядер гелия (альфа-частиц); ядра других элементов и неионизированных (электрически нейтральных) частиц содержатся в очень небольшом количестве. Из-за солнечного ветра Солнце теряет каждую секунду около одного миллиона тонн вещества. Хотя солнечный ветер исходит из внешнего слоя Солнца, он не отражает реального состава элементов в этом слое: из-за процессов дифференциации содержание одних элементов увеличивается, а других — уменьшается. Это происходит из-за FIP-эффекта, т.е. влияния энергии однократной ионизации атома ("первого ионизационного потенциала", или FIP по-английски) на состав элементов.

Интенсивность солнечного ветра зависит от изменений солнечной активности и его источников. В зависимости от скорости u потоки солнечного ветра у орбиты Земли условно делятся на два класса: **медленные** ($u \approx 300\text{--}400$ км/с) и **быстрые** ($u \approx 600\text{--}700$ км/с). Медленный солнечный ветер порождается «спокойной» частью солнечной короны при её газодинамическом расширении. Потоки рекуррентного быстрого солнечного ветра испускаются Солнцем в течение нескольких месяцев и имеют период повторяемости при наблюдениях с Земли в 27 суток (период вращения Солнца). Эти потоки связывают с корональными дырами.

Из-за сильной изменчивости (динамичности) межпланетной среды на космических аппаратах обычно измеряются среднечасовые значения ее параметров. В Таблице 3.1 приведены типичные значения различных параметров солнечного ветра по наблюдениям на орбите Земли.

Таблица 3.1. Параметры солнечного ветра

Параметр	Средняя величина	Медленный солнечный ветер	Быстрый солнечный ветер
Плотность n , см ⁻³	8,7	11,9	3,9
Скорость u , км/с	468	327	702
Поток nu , см ⁻² с ⁻¹	$3,8 \cdot 10^8$	$3,9 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^8$
Протоны, T_p , К	$7 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^5$
Электроны, T_e , К	$1,4 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$
Отношение T_e/T_p	1,9	4,4	0,45

К важнейшим параметрам межпланетной среды, несомненно, следует отнести также среднее значение модуля B межпланетного магнитного поля (ММП). Вблизи орбиты Земли, т.е. на расстоянии 1 а.е. от Солнца, эта величина близка к 5×10^{-5} Гс = 5 нТ (подробнее см. раздел 4.3).

Существуют и кратковременные спорадические **высокоскоростные** ($u \geq 1200$ км/с) потоки. Спорадические потоки при движении в пространстве, заполненном плазмой медленного солнечного ветра, уплотняют плазму перед своим фронтом, образуя движущуюся вместе с ним ударную волну (УВ). Ранее предполагалось, что такие явления вызываются мощными солнечными вспышками. Однако в настоящее время преобладает мнение, что спорадические потоки обусловлены выбросами коронального вещества (ВКВ, или CME – Coronal Mass Ejection). Вместе с тем следует отметить, что и солнечные вспышки, и ВКВ (CME) связаны с одними и теми же активными областями на Солнце и между ними существует *статистическая* зависимость и несомненная *физическая* связь. Ясно одно: солнечная **вспышка (solar flare)** – это часть большого и весьма мощного нестационарного процесса, связанного с выбросом CME.

Важную роль для динамики плазмы солнечного ветра играют соотношения между плотностями энергий направленного движения плазмы w_u , хаотического (теплого) движения w_T и межпланетного магнитного поля w_B . При $n_p = 5$ см⁻³ и $u = 400$ км/с имеем $w_u = n_p m_p u^2 / 2 = 7 \times 10^{-9}$ эрг/см³. В то же время плотность энергии хаотических движений $w_T = n_e T_e + n_p T_p \approx 2 \times 10^{-10}$ эрг/см³, если принять $T_e = 1.5 \times 10^5$ К, $T_p = 5 \times 10^4$ К и считать температуры изотропными (энергия 1 эВ соответствует 1.6×10^{-12} эрг/см³ или температуре 7.733×10^3 °К). Плотность энергии магнитного поля $w_B = B^2 / 8\pi = 10^{-10}$ эрг/см³ при $B = 5$ нТл. Таким образом, кинетическая энергия потока «спокойного» солнечного ветра у орбиты Земли в несколько десятков раз превосходит тепловую энергию плазмы и энергию магнитного поля, тогда как магнитная и тепловая энергия сравнимы. В случае сильных возмущений межпланетной среды во время крупных вспышек, выбросов коронального вещества (CME, см. раздел 3.4) и генерации связанных с ними ударных волн соотношения между w_u , w_T и w_B существенно меняются (см. раздел 7.3).

Полное число частиц, покидающих атмосферу Солнца в виде солнечного ветра, составляет около 1.3×10^{36} за 1 сек. Отсюда легко оценить, что полная потеря вещества за 1 год близка к $(2 \div 3) \times 10^{-14}$ массы Солнца, или 6.7 миллиарда тонн в час. Это эквивалентно потере массы, равной массе Земли, за каждые 150 миллионов лет. Тем не менее, до сих пор за счёт солнечного ветра Солнце потеряло всего около 0.01% своей полной массы. У других звёзд наблюдаются более мощные звёздные ветры, что приводит к значительно большим потерям их вещества.

3.3. Солнечные вспышки

Солнечные вспышки – это чрезвычайно мощные взрывы в солнечной атмосфере. Они происходят вблизи солнечных пятен, обычно вдоль линии раздела (нейтральной линии) между областями с противоположно направленными магнитными полями. Физически вспышка является откликом солнечной атмосферы на внезапный быстрый процесс выделения энергии, по всей вероятности, магнитного происхождения. Отклик затрагивает, в основном, хромосферу и корону. Выделение энергии приводит, прежде всего, к локализованному временному нагреву (тепловая вспышка), а также к ускорению частиц (электронов, протонов и более тяжелых ионов). При этом температура в хромосфере составляет $\sim 10^4$ К (хромосферная, или низкотемпературная, вспышка), а в короне достигает $\sim 10^7$ К (высокотемпературная вспышка). Энергии ускоренных частиц, регистрируемых на орбите Земли, составляют от ~ 20 кэВ (для электронов) до ≥ 10 ГэВ (для протонов). Полная энергия, выделяющаяся во время наиболее сильных вспышек, равна $\sim 10^{25}$ Дж = 10^{32} эрг.

Вспышка генерирует кратковременное электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн (рис.3.3) - от жесткого рентгеновского излучения (длина волны $\lambda \sim 10^{-9}$ см) до километровых радиоволн ($\lambda \sim 10^6$ см). По своей природе излучение вспышки является преимущественно тепловым. На очень коротких волнах (жесткое рентгеновское, $\lambda < 1$ Å, и гамма-излучение, $\lambda < 0.01$ Å) наблюдаются нетепловые импульсные всплески

излучения, генерированные в атмосфере Солнца ускоренными частицами - нетепловое тормозное и синхротронное излучение электронов, гамма-излучение от взаимодействия ускоренных ионов с окружающими ядрами атмосферы и т.д. В диапазоне очень длинных волн (радиоизлучение) подобные всплески порождаются ударными волнами в плазме короны и солнечного ветра.

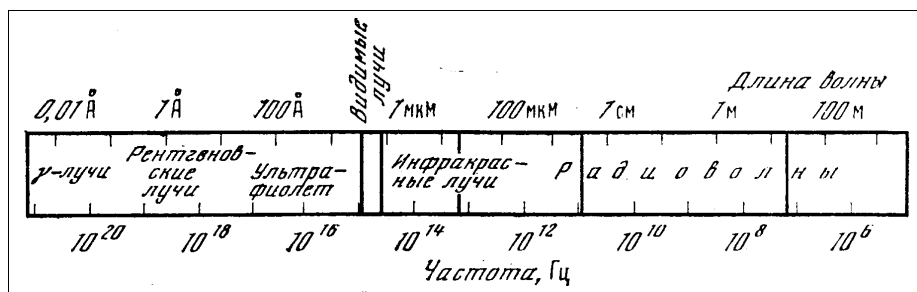


Рис.3.3. Шкала электромагнитных волн, излучаемых Солнцем.

Тепловая вспышка лучше всего видна и наиболее хорошо изучена по наземным оптическим наблюдениям в красной водородной линии $H\alpha$ ($\lambda = 6563 \text{ \AA} = 656.3 \text{ нм}$). В последние годы вспышки регулярно регистрируются также на космических аппаратах в мягком рентгеновском диапазоне с длиной волны $\lambda = 1-8 \text{ \AA} = 0.1-0.8 \text{ нм}$, что примерно соответствует энергиям квантов в интервале $\sim 2-10 \text{ кэВ}$. Мягкое рентгеновское излучение ($\lambda = 0.1-10 \text{ нм}$) - это тепловая эмиссия плазмы при температуре $T = 10^7 \text{ К}$. Вспышки в линии водорода $H\alpha$ (рис.3.4) и рентгеновские вспышки представляют собой результат соответственно низко- и высокотемпературных солнечных вспышек. Они имеют целый ряд общих характеристик, так что термин «вспышка в $H\alpha$ » можно использовать для обозначения тепловой или оптической вспышки вообще.

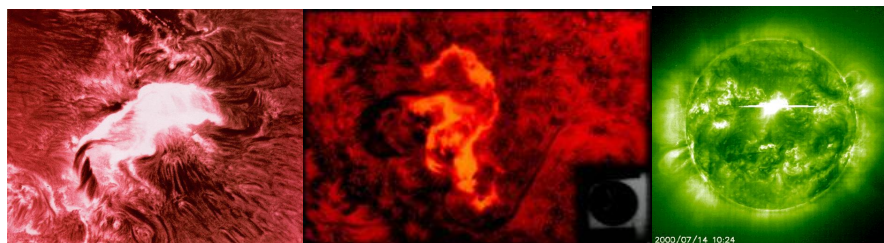


Рис.3.4. Типичная солнечная вспышка (слева) в водородной линии $H\alpha$ (фото из архива солнечной обсерватории Big Bear, США, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/flares.shtml>). В центре показан аналогичный снимок мощной вспышки 7 августа 1972 г. (3B/X4). Справа - изображение Солнца с яркой вспышкой близи центра диска (3B/X5.7) по наблюдениям с помощью ультрафиолетового телескопа ЕИТ (линия иона железа $\text{Fe XII } 195 \text{ \AA}$) на борту КА *SOHO* 14 июля 2000 г. (http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2000_07_14/).

Особенности самих вспышек и разнообразие методов наблюдения породили их специфическую классификацию по мощности и длительности. До 1 января 1966 г. яркость вспышек в линии $H\alpha$ характеризовали по 4-балльной шкале: 1- (или субвспышка), 1, 2 и 3; наиболее крупным вспышкам приписывали балл 3+. Затем была предложена 5-балльная шкала: S (субвспышка), 1, 2, 3 и 4; при этом вспышки балла ≥ 2 считались уже сильными. С началом внеатмосферных (спутниковых) наблюдений вспышкам начали приписывать также рентгеновский балл (класс) C, M, или X. Наиболее мощные вспышки принадлежат к

классу X, их яркость в диапазоне 1-8 Å составляет $\geq 10^{-1}$ эрг/(см² с). Вспышка класса M в 10 раз, а класса C – в 100 раз слабее, чем вспышка класса X. Для указания точного значения интенсивности всплеска используются, например, следующие обозначения: C7, M8, X5. Вспышка класса X5 соответствует интенсивности всплеска 5×10^{-1} эрг/(см² с) в диапазоне 0.1-0.8 нм (мягкое рентгеновское излучение).

С 1977 г. солнечные вспышки принято делить на импульсные и постепенные в зависимости от длительности всплеска мягкого рентгеновского излучения (< 1 или >1 часа, соответственно). Современная классификация вспышек приведена в Таблице 3.2. Видно, что она имеет под собой серьёзное наблюдательное обоснование.

Таблица 3.2. Классификация солнечных вспышек (Kallenrode, 2001)

Параметр	Импульсные	Постепенные
Длительность мягкого (SHR) рентгеновского всплеска	<1 час	>1 час
Постоянная спада SHR	< 10 минут	>10 минут
Высота над фотосферой	$\leq 10^4$ км	$\sim 5 \times 10^4$ км
Объём (см ³)	$10^{26} - 10^{27}$	$10^{28} - 10^{29}$
Плотность энергии	Высокая	Низкая
Размер области H α	Малый	Большой
Длительность жёсткого (HXR) рентгеновского всплеска	< 10 мин.	>10 мин.
Длительность микроволнового радиовсплеска	<5 минут	>5 минут
Тип метрового радиовсплеска	(II), III	II, (III), IV
Наличие CME	Редко	Всегда

Непрерывный мониторинг рентгеновских вспышек в настоящее время осуществляется системой спутников серии *GOES* (NOAA). Характерные примеры вспышек показаны на рис.3.4. По своим очертаниям вспышка 7 августа 1972 г. напоминает морского конька. Она является примером так называемой «двухленточной вспышки», когда область свечения выглядит как две яркие линии (ленты), пронизывающие область между пятнами в группе солнечных пятен. Эта вспышка по уровню радиации могла бы представлять опасность для астронавтов, если бы в то время осуществлялся полет к Луне. Другая вспышка (14 июля 2000 г.), случившаяся в день национального праздника Франции (Bastille Day Event, BDE), оказалась интересной по сходной причине: она, в частности, породила стремительный поток энергичных солнечных частиц, которые достигли земной орбиты спустя примерно полчаса после вспышки. Такая «радиационная буря» вызвала «снег» на изображениях, полученных на борту КА *SOHO* камерой телескопа EIT, из-за бомбардировки электронных детекторов камеры частицами высокой энергии (см. также главы 8-9). Вспышка сопровождалась также мощным CME, выбросившим в межпланетное пространство миллиарды тонн солнечной плазмы. Выброс двигался к Земле со скоростью почти 1800 км/с, т.е. в 2 раза быстрее, чем обычно.

Продолжительность вспышки в оптической области спектра может составлять от нескольких минут до нескольких часов. Период быстрого уярчения и роста площади вспышки до максимума называют флэш-фазой вспышки. Обычно этот период занимает до 15 мин. Во флэш-фазе часто наблюдается взрывная, или импульсная фаза, т.е., внезапное быстрое возрастание яркости (в течение ~ 1 мин.) на небольшом участке вспышки (импульсная вспышка). С импульсной фазой обычно совпадают импульсные всплески микроволнового радиоизлучения и жесткого рентгеновского излучения. Микроволны с частотой в диапазоне ГГц – это синхротронное излучение электронов (10-100 кэВ) в

магнитном поле (20-100 Гс), а жесткое рентгеновское излучение ($E \geq 20$ кэВ) есть результат тормозного излучения ускоренных электронов.

Во время флэш-фазы иногда около 10 минут можно наблюдать небольшие участки вспышки в белом свете («белые вспышки»). Максимальная яркость такой вспышки примерно на 50% выше яркости фотосферы. По историческим данным, усиление яркости фотосферы в белом свете («белая вспышка») впервые наблюдалось 1 сентября 1859 г. Вспышка сопровождалась сильной геомагнитной бурей, полярными сияниями вплоть до геомагнитных широт $\pm 23^\circ$, высокими потоками энергичных (ускоренных) солнечных частиц, нарушениями (искрением) в работе телеграфных аппаратов и другими явными признаками возмущений «космической погоды».

Частицы, ускоренные на Солнце или вблизи него представляют интерес по многим причинам. В настоящее время ускоренные солнечные частицы с энергиями ~ 10 -100 МэВ называют обычно «solar energetic particles» (SEPs), но в релятивистском диапазоне ($E_p \geq 500$ МэВ для протонов) широко применяется и традиционное (историческое) название «солнечные космические лучи» (СКЛ). Кроме электронов с энергией до 10 МэВ и протонов до десятков ГэВ и выше, на Солнце генерируются нейтроны с энергией до 400 МэВ, а также вспыхивают нейтрино. Движение ускоренных электронов в магнитных полях атмосферы Солнца сопровождается генерацией микроволнового радиоизлучения, а взаимодействие ускоренных ионов с веществом - приводит к возбуждению ядер C, N, O, Fe и др., генерации гамма-излучения в линиях, образованию и распаду пионов и другим ядерным процессам (см. раздел 5.6).

Здесь нет возможности сколько-нибудь подробно освещать другие аспекты физики солнечных вспышек. Хотя вспышки на Солнце, несомненно, представляют одно из самых замечательных явлений в астрофизике, они отнюдь не уникальны. Вспышки на других звездах, по крайней мере, на переменных [звездах-карликах типа UV Кита (UV Ceti) – довольно частое явление. Они широко изучаются, а физическая природа активности таких звезд тождественна природе солнечной активности. От ближайшей к нам звезды Proxima Centauri, например, была зафиксирована вспышка, эквивалентная солнечной вспышке балла 2X. А совсем недавно, 25 апреля 2008 г., на маленькой тусклой звезде EV Ящерицы, удаленной от нас на 16 световых лет, произошла самая яркая вспышка, когда-либо наблюдавшаяся на обычной звезде, за исключением Солнца (рис.3.5).



Рис.3.5. Вспышка на звезде EV Ящерицы (EV Lacertae) 25 апреля 2008 г. по наблюдениям на борту спутника *Swift* (NASA).

Первым вспышку зафиксировал детектор российского производства «Конус» на американском спутнике *Wind*. Через две минуты излучение от вспышки уловил рентгеновский телескоп спутника *Swift* (NASA). В рентгеновском диапазоне звезда оставалась яркой в течение восьми часов. Если бы звезда была расположена удачней, вспышку в созвездии Ящерицы было бы видно невооруженным глазом. Небывалая мощность вспышки объясняется, скорее всего, молодостью звезды. Эта звезда - обычный

красный карлик, масса ее в 3 раза меньше массы Солнца. Она в 15 раз моложе Солнца и вращается примерно в семь раз быстрее (один оборот за 4 дня). Быстрое вращение создает более сильные магнитные поля, которые и отвечают за возникновение вспышек.

3.4. Корональные выбросы вещества

Во время вспышки ее вещество может быть разогрето до температур $\sim 10^7$ К. Такой нагрев приводит к испусканию больших потоков ультрафиолетового и рентгеновского излучения, а также видимого света. Кроме того, вспышки стремятся выбрасывать наружу большое количество плазмы со скоростью порядка 1000 км/с или выше (иногда выше 3000 км/с). Эти события получили названия **выбросов коронального вещества (ВКВ)**, или **выбросов корональной массы (ВКМ)**. Последнее название, действительно, ближе к английскому термину **coronal mass ejections (CME)**, и именно оно чаще всего используется даже в русскоязычной литературе. Некоторые исследователи считают, что СМЭ следует называть **корональными выбросами вещества (КВВ)**. Как это часто бывает, за этой терминологической дискуссией скрывается спор о физической сущности СМЭ. Дело в том, что масса СМЭ (см. ниже), согласно современным оценкам, может составлять заметную долю полной массы короны.

Это означает, что СМЭ – далеко не только корональное явление, но может затрагивать и другие слои атмосферы Солнца. Как бы то ни было, корональные выбросы – это, прежде всего, крупномасштабные возмущения в короне (рис.3.6), в результате которых большая масса солнечного вещества выбрасывается в межпланетное пространство. Они вызывают сильные возмущения в солнечном ветре, которыми во многом определяется «космическая погода» в Солнечной системе. В наземных условиях из-за рассеяния в атмосфере яркого излучения фотосферы наблюдать корону практически невозможно, кроме редких моментов полных солнечных затмений. Следить за состоянием короны стало возможным благодаря специальным телескопам-коронографам, установленным на борту космических обсерваторий типа европейского спутника *SOHO* и российского *CORONAS*.

Впервые СМЭ был обнаружен 14 декабря 1971 г. в наблюдениях на борту КА *OSO-7* (7th Orbiting Solar Observatory). Запущенный в декабре 1995 г., КА Solar Heliophysical Observatory (*SOHO*) включает два основных инструмента: Large Angle Spectrometric Coronagraph Experiment (*LASCO*), который даёт изображения короны Солнца в белом свете вплоть до 30 солнечных радиусов, а также Extreme Ultraviolet Imaging Telescope (*EIT*), который получает изображения солнечного диска и нижней короны над лимбом в ультрафиолетовом свете.

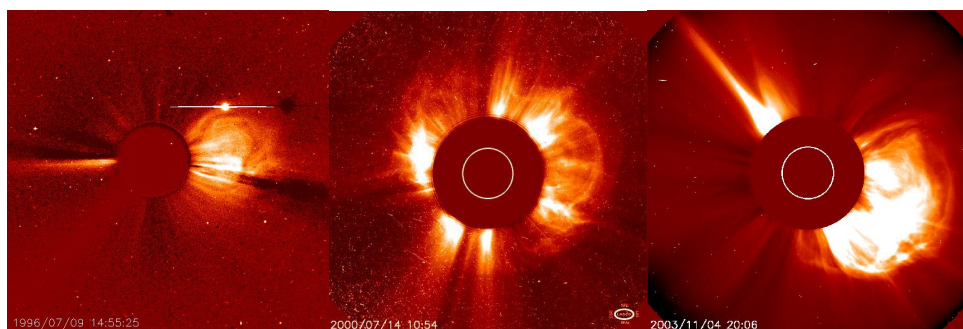


Рис.3.6. Выбросы коронального вещества во время сильных возмущений солнечной атмосферы 9 июля 1996 г. (слева), 14 июля 2000 г. (в центре) и 4 ноября 2003 г. (справа) по наблюдениям с борта КА *SOHO*.

Каждый выброс уносит $\sim 2 \times 10^{14} \div 4 \times 10^{16}$ г солнечного вещества. По максимальным оценкам, масса СМЕ может достигать величины 2.0×10^{17} г (событие 28 октября 2003 г.). Согласно современным полуэмпирическим моделям короны, в пределах до $10R_s$ она содержит $10^{18} - 10^{19}$ г вещества. Таким образом, масса СМЕ может достигать $\sim 1-10\%$ от массы всей короны, причём подавляющая часть этой массы обычно черпается из нижней короны или даже с более низких уровней (Hudson *et al.*, 2006). Скорость движения СМЕ быть различной, обычно в пределах от 50 до 2000 км/с. В исключительных случаях наблюдаются и гораздо большие скорости СМЕ: например, 2 ноября 2003 г. скорость СМЕ достигла величины почти 3000 км/с, а 20 января 2005 г. превысила и это значение (см. также раздел 4.5). В некоторых случаях передний фронт возмущения движется с ускорением или замедлением до 250 м/с, хотя типичные значения 20-30 м/с. Нередко скорость СМЕ остаётся практически постоянной. Полная энергия СМЕ, затраченная на преодоление гравитационного притяжения и приданию соответствующей скорости выбросу, составляет $\sim 10^{31} - 10^{32}$ эрг. Отметим, кстати, что эта величина сравнима с энергией большой солнечной вспышки (см. выше), причем эмпирические оценки показывают, что в обоих случаях до 10% всей энергии возмущения (вспышки или СМЕ) передается ускоренным частицам (солнечным космическим лучам).

Форма выбросов отличается большим разнообразием в зависимости от обстоятельств конкретного явления и особенностей его проекции на картинную плоскость. Когда направление движения близко к направлению луча зрения (на или от наблюдателя) возмущение появляется вокруг затмевающего диска коронографа в виде расширяющегося диффузного кольца. При направлении движения поперек луча зрения внутренняя структура выброса видна более определенно. Чаще всего СМЕ состоит из трех основных элементов: фронтальной части, имеющей вид петли с концами, закрепленными на Солнце, более темной области внутри петли, называемой полостью, и яркого центрального ядра выброса. Ядро представляет собой остатки эруптивного протуберанца, инициировавшего корональный выброс. Помимо радиального движения, вся система расширяется, сохраняя некоторое подобие. В результате скорость фронтальной части может оказаться почти вдвое больше скорости центрального ядра.

Корональные выбросы вещества являются очень динамичными событиями, в которых плазма, первоначально удерживаемая в замкнутых корональных магнитных структурах, вдруг выбрасывается в межпланетное пространство. В эпоху минимума солнечной активности (СА) корональные выбросы случаются через день-два (минимум – 1 раз в неделю). В максимуме цикла наблюдается от двух до пяти СМЕ в сутки. При усреднении за весь солнечный цикл (≈ 11 лет), частота их появления составляет примерно 1 событие за сутки. Отрыв от Солнца такой структуры, кажущейся весьма стабильной и магнитно-замкнутой, ставит перед исследователями ряд фундаментальных вопросов из области магнитной гидродинамики (МНД). Примечательно, что примерно в 90% случаев вспышек всех классов корональные выбросы не наблюдаются, тогда как только 60% СМЕ происходят без вспышек. Поэтому не случайно между учеными пока нет единодушия в понимании как происхождения СМЕ (или **системы «вспышка-СМЕ»**), так и в оценке их относительной роли (по сравнению со вспышками) в проблеме «Солнце-Земля» (в проблеме солнечно-земных связей). Все известные связи СМЕ с другими проявлениями активности на диске Солнца являются статистическими (вероятностными), а не физическими; физические связи между этими явлениями до сих пор однозначно не установлены и являются предметом интенсивных исследований.

Отдельный класс межпланетных возмущений представляют **«магнитные облака» (magnetic clouds)** – магнито-плазменные структуры с усиленным магнитным полем и повышенными значениями основных параметров плазмы (скорости, плотности и температуры). Облака были впервые идентифицированы в начале 80-ых годов прошлого столетия по данным наблюдений солнечного ветра на КА *Helios 1* и *SMM*. Магнитные облака можно считать проявлением СМЕs. Наблюдения СМЕ у Земли обычно ведутся

только одним КА, поэтому обнаружить их связь с облаками не всегда удастся. Типичная структура, которую можно наблюдать для быстрого СМЕ с борта КА типа ACE - это ударная волна (быстрая мода), которая сопровождается плотной оболочкой (sheath) из горячей плазмы (вниз по потоку солнечного ветра) и магнитным облаком.

Главная характеристика облака – это усиленное магнитное поле, вектор которого плавно вращается. С течением времени (по мере удаления облака от Солнца) происходит постепенное уменьшение поля, скорости, плотности и температуры плазмы. Магнитные облака ведут себя подобно магнитосфере, движущейся в солнечном ветре. Они отличаются очень малым отношением динамического давления к магнитному и высоким значением модуля магнитного поля. В результате плазма в облаке остается относительно изолированной в процессе распространения. Облако постепенно расширяется, и его плотность уменьшается соответственно. Одним из важнейших свойств магнитных облаков является захват частиц SEPs в магнитную ловушку (рис.3.7). В целом это очень сложный межпланетный объект, интересный с различных точек зрения, в частности, для понимания захвата и переноса SEPs от Солнца к Земле.

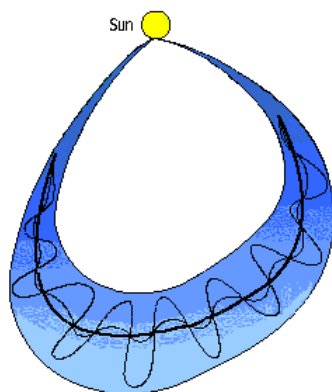


Рис. 3.7. Модель магнитного облака на расстоянии 1 а.е. (Lepping *et al.*, 1990). Показано двунаправленное движение захваченных энергичных электронов в магнитном поле облака.

3.5. Цикличность солнечной активности

Солнечной активностью принято называть всю совокупность наблюдаемых явлений в атмосфере Солнца, вызывающих изменения его излучения в различных диапазонах электромагнитных волн и потоках частиц различных энергий: пятна, волокна, вспышки, протуберанцы, СМЕ и т.д. Состояние СА характеризуется несколькими наблюдательными индексами, среди которых наиболее длительный ряд имеет относительное число солнечных пятен (число Вольфа W). Число Вольфа – это комбинированный индекс

$$W = 10g + f, \quad (3.1)$$

включающий число групп пятен g и полное число пятен f на видимом полушарии Солнца. Этот индекс впервые ввел в научный оборот швейцарский астроном Р. Вольф (R. Wolf) в 1849 г. По существу, именно с этого года, когда начались научные наблюдения Солнца, был получен достоверный ряд W . Кроме того, Вольф по отрывочным данным отдельных европейских наблюдателей восстановил среднемесячные значения W с 1749 г. и среднегодовые значения W с 1700 г. По историческим данным о пятнах, а также по некоторым косвенным (проху) геофизическим данным (например, по содержанию космогенного изотопа бериллия-10 (^{10}Be) в годичных отложениях гренландского льда)

современные исследователи приближенно продлили этот ряд до 1610 г. Таким образом, в настоящее время мы располагаем временным рядом чисел Вольфа длиной около 400 лет.

Через каждые примерно 11 лет число пятен (**sunspot**), одновременно наблюдаемых на диске, достигает максимального значения (рис.3.8). Это явление называют «циклом солнечной активности» или «11-летним циклом». Период в 11 лет, однако, выдерживается неточно и в 20-ом веке был ближе к 10 годам, а за последние 300 лет варьировался в интервале от 7 до 17 лет. Например, солнечный цикл, начавшийся в мае 1996 г., достиг максимума в апреле 2000 г.; вторичный (несколько меньший) максимум был отмечен в ноябре 2001 г., и по аналогии с предыдущими циклами следовало ожидать, что в 2007-2008 гг. начнется новый цикл. Однако, лишь в январе 2009 г. начали появляться первые пятна нового цикла. Тем не менее, именно традиционный 11-летний цикл до сих пор служит основой для многочисленных гипотез о причинах солнечной цикличности и даже для прогнозов СА на ближайшие годы (рис.3.8). Фаза роста цикла может продолжаться от 2 до 5 лет, а фаза спада - от 5 до 12 лет. Амплитуды последовательных циклов плавно меняются от значений $W \sim 50$ (низкие) до $W \sim 200$ (высокие циклы).

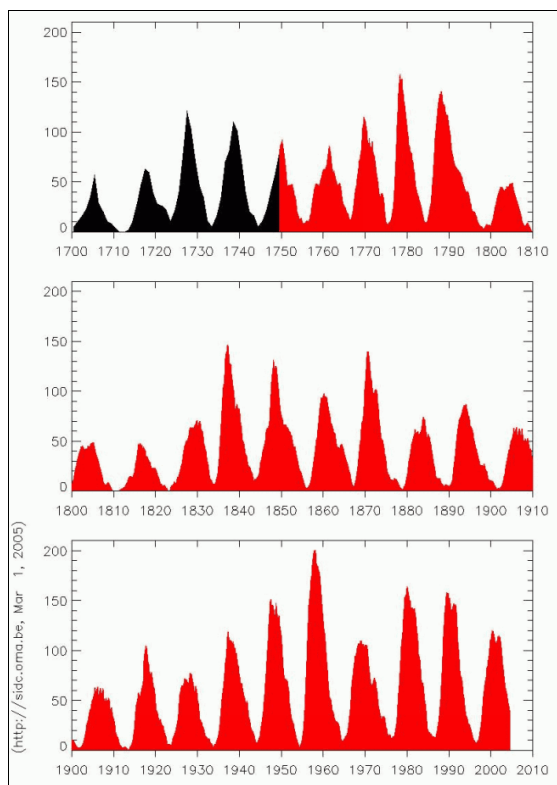


Рис.3.8. Изменения среднего числа солнечных пятен W на диске с 1700 по 2005 гг. Значения чисел Вольфа до 1749 г. восстановлены по косвенным геофизическим данным. Подробнее см.: (http://www.kosmofizika.ru/ucheba/sun_act.htm).

Следуя схеме, предложенной Р. Вольфом, цикл 1755-1766 гг. стали называть циклом №1 (его максимум был достигнут в 1761 г.). В 2000-ом году наблюдался максимум уже 23-го цикла солнечной активности. В минимумах СА пятен почти совсем нет. Особый интерес вызвало поведение Солнца в 24-ом цикле активности (см. ниже раздел 3.6 и

рис.3.11). В течение цикла сохраняется последовательность магнитной полярности главных пятен в группах, однако противоположная в обоих полушариях. В следующем цикле полярность меняется на противоположную. Зона пятнообразования в течение цикла смещается от средних широт ($\pm 30-35^\circ$) до $\pm 5^\circ$ в конце цикла. Имеются данные о существовании более продолжительных циклов: 35-летнего, «векового» (или так называемого «цикла Глайсберга» $\sim 80-130$ лет) и еще более длительных. В конце XX века выяснилось, что в индексах солнечной активности присутствует очень важный **квазидвухлетний период (quasi-biennial oscillation, QBO)**, типичный также для ряда геофизических явлений. Природа и иерархия циклов СА все еще не получили должного объяснения, хотя их физическая основа не вызывает сомнений: это структура и динамика магнитных полей в конвективной зоне Солнца.

Кроме квазипериодических вариаций числа пятен с периодом ~ 11 лет, существуют также вариации СА большей длительности. Так, во второй половине XVII века (1645-1715 гг.) солнечная активность и, в частности, её 11-летний цикл были сильно ослаблены (эта эпоха известна как «**минимум Маундера**», **Maunder minimum**). В эту же эпоху в Европе отмечалось снижение среднегодовых температур (т.н. «**Малый ледниковый период**», **Little Ice Age**), что, возможно, вызвано воздействием солнечной активности на климат Земли. Существует также точка зрения, что глобальное потепление до некоторой степени вызвано повышением общего уровня СА во второй половине XX века.

Действительно, 11-летние вариациям подвержены не только солнечные пятна, но и **полный поток солнечного излучения (solar irradiance)** – основной источник энергии для тепловой машины «Атмосфера». На рис.3.9 показаны вариации параметров СА в трех последних циклах: полный поток излучения (**irradiation**); число солнечных пятен; индекс вспышечной активности Солнца (**solar flare activity**) и потока радиоизлучения на волне 10.7 см. Полный поток излучения, т.е. прямой поток солнечной энергии на вершине земной атмосферы, показан в виде суточных значений и скользящих среднегодовых значений. Все другие данные представляют собой скользящие среднегодовые значения.

Несмотря на несомненную корреляцию между полным потоком солнечного излучения и различными индексами СА, механизмы ее воздействия на климат Земли пока ещё недостаточно ясны. Некоторые возможные механизмы воздействия космофизических факторов на метеорологические и климатические процессы обсуждаются в главе 9.

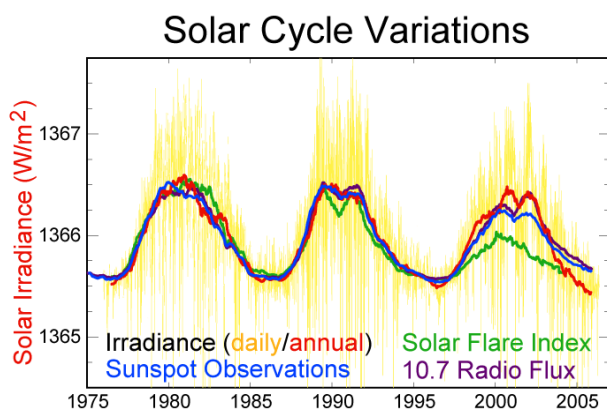


Рис.3.9. Вариации параметров солнечной активности за период около 30 лет (1975-2007). Видна тесная корреляция (http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_variation) между солнечными пятнами, вспышечной активностью, потоком радиоизлучения на волне 10.7 см и полным потоком солнечного излучения.

Важнейшей особенностью циклов СА является изменение магнитной полярности пятен. В пятнах сконцентрированы самые сильные магнитные поля. Поскольку поле генерируется внутри Солнца (глубоко под фотосферой) в результате действия механизма динамо, силовые линии всплывающего магнитного потока должны начинаться и заканчиваться в фотосфере. Поэтому пятна появляются либо парами противоположной полярности, либо одна из полярностей может быть недостаточно компактной и представлена не пятном, а факельной площадкой. Дипольный момент группы пятен ориентирован преимущественно в широтном направлении, так что пятно одной полярности, идущее впереди в направлении вращения Солнца, считается ведущим или головным, а пятно (или факел) противоположной полярности – ведомым или хвостовым. В северном и южном полушарии полярности головных пятен противоположны, так что дипольные моменты групп почти антипараллельны.

Как показали многолетние наблюдения, глобальная картина распределения магнитного поля на Солнце меняется квазипериодически со средним периодом около 22 лет. Во второй половине полного «магнитного цикла» (или в следующем 11-летнем цикле пятен) полярности головных и хвостовых пятен в каждом полушарии меняются. В каждом 11-летнем цикле пятна появляются первоначально на широтах примерно $\pm 30^\circ$, а затем зона пятнообразования смещается к экватору. Диаграмма зависимости широты появления новых пятен от времени имеет характерный вид и называется диаграммой «бабочек» Маундера (рис.3.10).

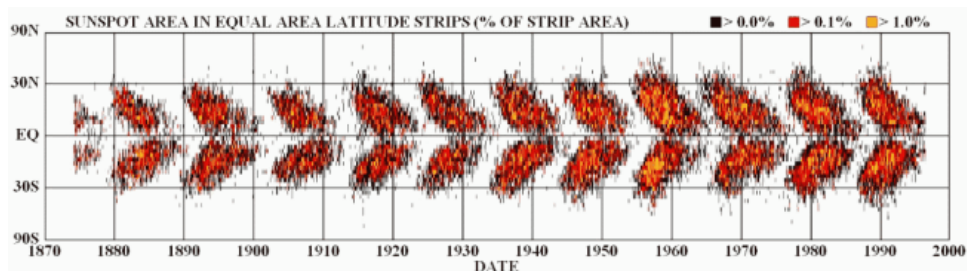


Рис.3.10. Зависимость широты появления солнечных пятен от времени (диаграмма «бабочек» Маундера). NASA-Marshall Space Flight Center.

В течение каждого 11-летнего цикла все ведущие пятна в биполярных группах имеют некоторую одинаковую полярность в северном полушарии и противоположную - в южном полушарии. То же самое справедливо для хвостовых пятен, у которых полярность всегда противоположна полярности ведущего пятна. В следующем 11-летнем цикле полярность ведущих и хвостовых пятен меняется на противоположную. Одновременно с этим меняется полярность и общего магнитного поля Солнца, полюсы которого находятся вблизи полюсов вращения (см. раздел 4.1). Поэтому правильнее говорить не об 11-летнем, а о 22-летнем, «магнитном» цикле солнечной активности (его называют также «циклом Хэйла»). При этом, в отличие от традиционного 11-летнего цикла числа пятен, их 22-летнюю периодичность можно назвать «истинно физическим» циклом.

3.6. Прогноз будущих солнечных циклов

На рис.3.11 приведены прогностические оценки из архива NASA за 2006 год, причём показана картина развития двух соседних циклов СА (1995-2015 гг.) - №23 (наблюдения) и №24 (прогноз). Видно, что американские эксперты предсказывали для 24-го цикла максимальную амплитуду W около 150 единиц, тогда как в максимуме 23-го цикла усреднённое наблюдаемое значение числа W составило примерно 120. Но спустя три года, эксперты NASA заметно изменили свой прогноз, и теперь их кривые для W выглядят по-

другому: высота ожидаемого максимума 24-го цикла едва достигнет 90 единиц. На рис.3.11 приведены оба этих прогноза (последняя оценка относится к октябрю 2009 г.). Характерно, что в новом варианте прогноза максимум цикла с 2010-2011 гг. сместился примерно на начало 2014 г., а его окончание, по-видимому, затянется до 2020 г.

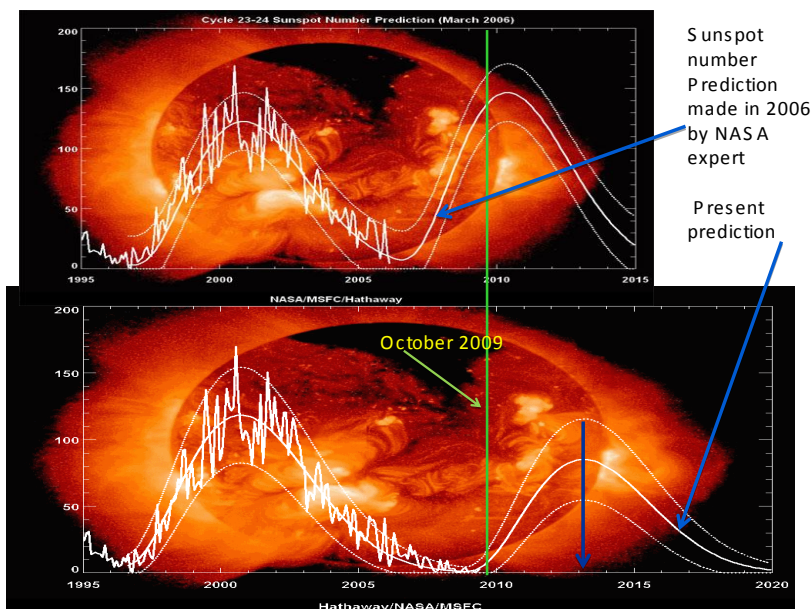


Рис.3.11. Солнечные циклы 1995-2015 гг. - №23 (наблюдения, ломаная кривая) и №24 (прогноз, плавная кривая). Пунктиром показаны доверительные интервалы (пределы неопределённости) прогноза. Credit: D. Hathaway/NASA/MSFC (2009).

Судя по данным многочисленных наблюдений, солнечный цикл 23, действительно, отличался определёнными особенностями. Если оценивать его развитие, опираясь на формальную процедуру метода скользящих среднемесячных значений чисел Вольфа W , то следовало ожидать, что новый цикл 24 должен начаться уже с 1 января 2009 г. Однако по ряду других параметров (поток радиоизлучения на волне 10.7 см, магнитный момент солнечного диполя, угол раствора гелиосферного токового слоя и др.) в 2009 г. всё ещё наблюдался либо спад, либо затянувшееся «дно минимума». Тем не менее, минимум 23-го цикла по пятнам был всё-таки достигнут в декабре 2008 г., и с января 2009 г. Солнце «живёт» уже в 24-ом цикле. Переходное время составило около 1.5 лет. Вместе с тем, хотя минимум по пятнам был пройден, уровень магнитной активности, например, в течение 2009 г. всё ещё падал, отчасти, возможно, из-за характерного для неё запаздывания по сравнению с числом пятен или потоком радиоизлучения на волне 10.7 см.

Аномалии в поведении солнечных магнитных полей в 23-ем цикле приводят к тому, что прогноз высоты 24-го цикла дополнительно затрудняется. К какому-либо твёрдому выводу сегодня прогнозисты прийти не могут. Дискуссия, проведенная в июне 2008 г. в NOAA Space Weather Prediction Center-SWPC, <http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle?SC24/>, показала, что существуют две альтернативные точки зрения: цикл будет либо высоким (140 единиц), либо ниже среднего (90 единиц). Выбор между этими двумя возможностями пока сделать не удалось. Данные по полярному полю говорят скорее о низком цикле (максимальное значение числа W порядка 80). С другой стороны, по характеристикам

крупномасштабного поля и геомагнитной активности для максимума цикла 24 в ИЗМИРАНе были получены умеренные значения W – соответственно 128 и 113 единиц.

По различным данным наблюдений параметров солнечной активности, геомагнитных возмущений, вариаций космических лучей и других гелиосферных явлений к настоящему времени накопилось немало свидетельств, указывающих на начало эпохи низких циклов солнечной активности. Нельзя исключить и более серьезный сбой 11-летней цикличности типа маундеровского минимума (1645-1715 гг.) или, по крайней мере, такого понижения уровня СА, который наблюдался на рубеже и в самом начале 20-го века (минимум Хэйла). В контексте проблемы солнечно-земных связей дальнейшее изучение этих тенденций крайне важно, например, для решения вопроса о реальности, причинах и механизмах так называемого «глобального потепления» климата. В частности, предстоит выяснить хотя бы знак основного тренда в изменении средней температуры на Земле в ближайшие десятилетия: следует ли нам ожидать усиления темпов потепления, его замедления или же, наоборот, надо готовиться к «глобальному похолоданию»...

4. СТРУКТУРА И ДИНАМИКА МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

**Many theories have not survived their confrontation with observations.
Margaret (Peggy) Shea and Don F. Smart (2003)**

В главе 3 были кратко изложены современные представления о глобальной структуре и основных свойствах гелиосферы. Теперь необходимо более подробно рассмотреть ее внутреннюю структуру, главные физические факторы, а также электродинамические процессы, определяющие солнечно-земные связи. Одним из основных факторов межпланетного пространства является, несомненно, межпланетное магнитное поле (ММП). Своим существованием ММП полностью обязано магнитному полю Солнца, а его структура и динамика, даже в деталях, определяются поведением солнечного ветра.

4.1. Расширение короны и солнечный ветер

Дистанционные наблюдения с Земли и многочисленные прямые измерения на космических аппаратах и спутниках на протяжении многих десятков лет убедительно показали, что межпланетное пространство постоянно заполнено плазмой, движущейся от Солнца. Потоки плазмы, направленные от Солнца, и магнитные поля в них были обнаружены косвенно намного раньше по наблюдениям вызванных ими геомагнитных возмущений, отклонений кометных хвостов и вариаций космических лучей. Эти потоки существуют всегда и всюду вокруг Солнца на достаточно больших расстояниях, превышающих несколько солнечных радиусов за пределами внешней короны. Они приобретают там почти радиальное направление. Уместно подчеркнуть, что их скорость в несколько раз превосходит скорость звука и альфеновскую скорость, так что солнечный ветер носит сверхзвуковой характер. Такой характер течения сохраняется почти всегда до очень больших расстояний ~ 100 а.е. (т.е., практически до границы гелиосферы).

Солнечный ветер формируется в атмосфере Солнца потому, что там отсутствует полное термодинамическое и механическое равновесие. По современным представлениям, избыточная свободная энергия самосогласованных плазменных и электродинамических процессов переноса в атмосфере Солнца поддерживается потоками энергии из его недр. Свободная энергия проявляется, в частности, в нагреве солнечной атмосферы вплоть до корональных температур $\geq 10^6$ К (см. раздел 3.1). Потоки солнечного ветра возникают в атмосфере Солнца вместе с ее нагревом. Это единый и сложный диссипативный процесс, в основе которого лежит преобразование одних видов свободной энергии (тепловой, электромагнитной и гравитационной) в другие виды. С другой стороны, можно утверждать, что процессы формирования регулярного потока солнечного ветра имеют постепенную, эволюционную природу; они сводятся, в конечном счете, к преобразованию энергии мощных упорядоченных и неупорядоченных движений и электромагнитных полей в энергию направленного радиального течения.

Плотность энергии направленного движения плазмы в сформировавшемся солнечном ветре на один-два порядка величины превышает плотность других видов энергии, кроме видимого света. Оптическое излучение Солнца представляет собой гораздо более мощный поток энергии, однако он слабо “сцеплен” с плазмой из-за ее крайней разреженности и практически полной прозрачности в верхней атмосфере Солнца и гелиосфере. Испускание солнечного ветра остается важным фактором эволюции Солнечной системы в целом. Энергия, которую уносят в межпланетное пространство частицы солнечного ветра, составляет $\sim 10^{27}$ – 10^{29} эрг/с. Это может быть сравнимо с мощностью крупной вспышки, но на 4-6 порядков величины меньше, чем энергия электромагнитного излучения Солнца

$\sim 4 \times 10^{33}$ эрг/с. В течение года Солнце теряет с солнечным ветром $\sim 2 \times 10^{-14}$ своей массы. Аналогичные явления - астросферы и звездные ветры - обнаружены и у многих других астрофизических объектов.

4.2. Глобальное магнитное поле Солнца

В разделе 2.5 мы уже коротко описали свойства обширной области вокруг Солнца, занятой солнечным ветром и магнитными полями вплоть до контакта с локальной межзвездной средой. Свое название – **гелиосфера** – эта область получила в 50-х годах прошлого века, прежде всего, в связи с исследованиями модуляции галактических космических лучей. Спустя два десятилетия с помощью космических аппаратов удалось установить, что гелиосфера фактически представляет собой **гелиомагнитосферу** (или магнитосферу Солнца). Это открытие стало возможным только тогда, когда КА *Pioneer 11* на своем пути к Сатурну, под воздействием гравитационного поля Юпитера, отклонился от плоскости эклиптики и в феврале 1976 г. достиг северной гелиошироты 16° (рис.4.1).

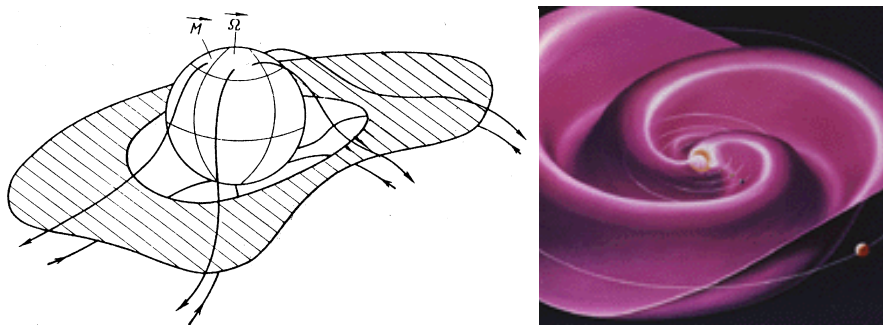


Рис.4.1. Слева: Схема трехмерной структуры **гелиомагнитосферы** (глобального магнитного поля Солнца) с нейтральным токовым слоем вблизи экватора (*затриховано*). Показаны также наклон солнечного **магнитного диполя** M относительно оси вращения Солнца Ω и происхождение незамкнутых силовых линий ММП на высоких гелиоширотах (Smith *et al.*, 1978). Справа: «Волнистая» структура гелиосферного токового слоя вблизи орбиты Земли (<http://wso.stanford.edu/gifs/helio.gif>).

Наблюдаемые в солнечной фотосфере магнитные поля принято разделять на два типа, в соответствии с их масштабом. Крупномасштабное (общее или глобальное) магнитное поле с характерными размерами, сравнимыми с размерами Солнца, имеет среднюю напряжённость на уровне фотосферы порядка нескольких гаусс. В минимуме цикла солнечной активности оно имеет приблизительно дипольную структуру, при этом его напряжённость на полюсах Солнца максимальна. Затем, по мере приближения к максимуму цикла, напряжённости поля на полюсах постепенно уменьшаются и через 1-2 года после максимума цикла становятся равными нулю, т.е., происходит так называемая «**переполусовка**» солнечного магнитного поля. На этой фазе общее магнитное поле (ОМП) Солнца не исчезает полностью, но его структура носит уже не дипольный, а квадрупольный характер. Далее напряжённость солнечного диполя снова возрастает, но при этом он имеет уже другую полярность. Таким образом, полный цикл изменения ОМП Солнца, с учётом перемены знака, равен удвоенной продолжительности 11-летнего цикла солнечной активности — примерно 22 года («закон Хэйла»).

Вдоль плоскости магнитного экватора Солнца противоположно направленные открытые силовые линии параллельны друг другу и разделены тонким токовым слоем, известным под именем «межпланетный токовый слой» или «гелиосферный токовый слой»

(ГТС, см. рис.4.1 слева). Токовый слой имеет некоторый наклон (из-за различия между наклоном оси вращения Солнца и его магнитной оси) и искривлен (из-за квадрупольного момента солнечного магнитного поля) и поэтому имеет волнистую структуру (типа «юбки балерины») по мере вытяжения в межпланетное пространство (рис.4.2 справа). Поскольку Земля располагается иногда над, а иногда под вращающимся токовым слоем, это приводит к регулярным, периодическим изменениям полярности ММП (при измерениях вблизи орбиты Земли). Эти периоды переменной положительной (от Солнца) и отрицательной (к Солнцу) полярности известны как магнитные секторы («секторная структура») ММП.

4.3. Межпланетное магнитное поле

Межпланетное магнитное поле (ММП) – это часть солнечного магнитного поля, которое выносится в межпланетное пространство солнечным ветром. С другой стороны, солнечный ветер представляет собой почти идеально проводящую жидкость (плазму), движущуюся в магнитном поле. При движении плазмы относительно магнитного поля или магнитного поля относительно плазмы в последней должна возникнуть ЭДС индукции. Эта ЭДС вызвала бы в идеально проводящей плазме бесконечно большой ток, что невозможно. Такое ограничение приводит к тому, что магнитное поле не может перемещаться относительно плазмы; оно, следовательно, должно перемещаться вместе с плазмой так, как если бы оно было «приклеено» или «вморожено». Если жидкость (плазма) расширяется, то индукция «вмороженного» в нее магнитного поля уменьшается. Если же жидкость сжимается, то магнитное поле усиливается. Иными словами, силовые линии ММП «вморожены» в плазму солнечного ветра, магнитное поле объединяет плазму в сплошную среду в бесстолкновительной области ($r \geq 10 R_C$).

Из-за вращения Солнца частицы солнечного ветра, покидающие корону в последовательные моменты времени t_0, t_1, t_2 и т.д., оказываются «приклеенными» к одной и той же силовой линии магнитного поля (рис.4.2, вверх). В результате ММП вытягивается наружу в виде архимедовых спиралей, которые часто сравнивают со струями воды от вращающегося разбрызгивателя на газоне (рис.4.2, вниз).

Межпланетное магнитное поле берет начало в областях на Солнце, где магнитное поле не замкнуто, т.е., где силовые линии, выходящие из одной области, не возвращаются в сопряженную точку, а вытягиваются виртуально до бесконечности в пространство. Направление (полярность, знак) поля в северном полушарии Солнца противоположно направлению поля в южном полушарии. Полярности этого ОМП Солнца меняют свой знак на противоположный в каждом солнечном цикле. Межпланетное магнитное поле является слабым, его величина вблизи орбиты Земли меняется от 1 до 37 нТ, при среднем значении $\sim 5-6$ нТ. Заметим, что гелиосферный токовый слой - это трехмерная форма спирали, возникающей под влиянием вращения глобального магнитного поля Солнца.

Вместо термина "ММП" в последние годы широко используется его синоним "гелиосферное магнитное поле". Это поле создается в основном электрическими токами в самой гелиосфере, а не только на Солнце. Электропроводность плазмы велика, поэтому электрические токи легко возбуждаются всюду на Солнце и в гелиосфере. Причинами возбуждения токов являются индукционный механизм в движущейся плазме с ее переменными скоростями, а также частичное разделение зарядов в ней при сохранении в целом квазинейтральности в больших объемах.

Чтобы описать ММП в целом и его специфические структурные и физические особенности, применяют различные методы и системы отсчета. В гелиоцентрической системе отсчета, не вращающейся вместе с Солнцем, магнитное поле вне некоторой исходной сферы радиуса r_0 можно описать простыми формулами:

$$B_r = B_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2, \quad B_\theta = 0, \quad B_\phi = -B_r \frac{\Omega r}{u} \sin \theta \quad . \quad (4.1)$$

где r, θ, φ - сферические координаты, u - скорость солнечного ветра, B_0 - значение радиальной составляющей магнитного поля B_r на некоторой исходной сфере радиуса $r = r_0$, а величина $\Omega = 2,7 \times 10^{-6}$ рад/с представляет собой угловую скорость вращения Солнца. В плоскости гелиоэкватора радиальная компонента B_r обратно пропорциональна квадрату расстояния до Солнца, а азимутальная (гелиодолготная) компонента B_φ обратно пропорциональна первой степени r . В простейшем аксиально-симметричном случае принимают $B_\theta(\theta) = B_0 \text{sgn}(\theta - \pi/2)$, так что в плоскости гелиоэкватора гелиоширотная компонента $B_\theta = 0$ по определению. Если среднее поле в фотосфере (т.е. на «поверхности») Солнца, при $r_0 = 7 \times 10^{10}$ см принять равным ~ 2 Гс, то на орбите Земли ($r = 1$ а.е.) получим $B \approx 5 \times 10^{-5}$ Гс, что хорошо согласуется с наблюдаемым значением.

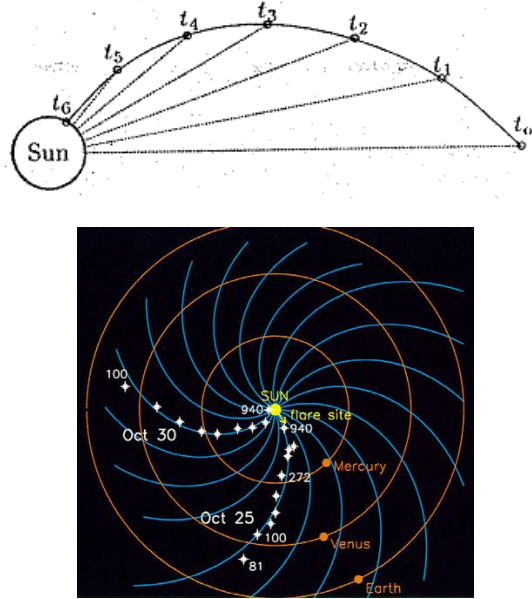


Рис.4.2. Схема образования спиральной структуры силовых линий межпланетного магнитного поля ММП при вращении Солнца (Image credit: NASA).

Такая модель лишь в самых общих чертах описывает некоторую сильно осредненную картину ММП в годы низкой солнечной активности. В покоящейся системе координат вблизи солнечного экватора магнитные силовые линии поля (4.1) имеют вид спиралей Архимеда, закрученных против вращения Солнца:

$$r = r_0 - \frac{u}{\Omega}(\varphi - \varphi_0). \quad (4.2)$$

Как уже отмечалось выше (рис.4.2), они представляют собой линии, образованные макроскопическими элементами плазмы, испущенными в последовательные моменты времени из определенного места на поверхности Солнца. В силу «вмороженности» поля указанные элементы плазмы связаны одной силовой линией.

В плоскости гелиоэкватора ($\theta = \pi/2$) спираль плоская, при других значениях широтного угла θ витки спирали располагаются на поверхности конуса $\theta = \text{const}$. Из-за уменьшения компоненты B_φ магнитное поле на высоких гелиоширотах ($\theta \rightarrow 0, \pi$) становится все более радиальным. Угол ψ между радиусом и силовой линией дается формулой

$$\psi = \arctg\{(r\Omega/u)\sin\theta\} \quad (4.3)$$

При $u = 400$ км/с и $\sin\theta = 1$ получим вблизи орбиты Земли $\psi = 45^\circ$, что также согласуется с наблюдениями. В декартовой системе координат межпланетное магнитное поле можно представить в векторной форме \mathbf{B} с тремя компонентами по направлениям:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B} \{B_x, B_y, B_z\}. \quad (4.4)$$

Две из них (B_x и B_y) ориентированы параллельно эклиптике, а третья, B_z , перпендикулярна эклиптике, она создается волнами и другими возмущениями в солнечном ветре. Когда силовые линии ММП и геомагнитного поля направлены противоположно друг другу, они могут «пересоединиться». Это приводит к передаче энергии, массы и импульса от солнечного ветра внутрь магнитосферы. Наиболее сильная связь ММП и геомагнитного поля и, соответственно, самые драматические магнитосферные эффекты имеют место в случае, когда B_z – компонента направлена к югу от эклиптики (см. раздел 9.2).

Спиральный узор корпускулярных потоков из вращающегося Солнца наподобие струи воды из вращающегося шланга (рис.4.2) был указан С. Чепменом (1929) и затем описан в его классической книге «Геомагнетизм», написанной совместно с Ю. Бартельсом (1940). Впоследствии Е. Паркер теоретически обосновал общий характер квазистационарного ММП в виде спиралей Архимеда. Модель солнечного ветра со спиральным ММП была развита Паркером (1958, 1963) для области вблизи плоскости эклиптики на основе кинематического анализа уравнений электродинамики с использованием приближения "вмороженности". В действительности, картина гелио-магнитосферного поля оказалась гораздо сложнее, чем предсказано теорией Паркера. Дальнейшие важные шаги в развитии теории межпланетного магнитного поля, связанные с разработкой более реалистических моделей трехмерной структуры гелиосферного магнитного поля, были сделаны другими исследователями, причем главным достижением явилось осознание роли гелиосферного токового слоя, его формы и расположения в пространстве. Особый интерес представляет структура и динамика ММП над полюсами Солнца.

В настоящее время наиболее разработанной моделью магнитного поля для полярных областей Солнца является модель Л. Фиска. Как показывают наблюдения, медленный солнечный ветра формируется в больших корональных петлях. Потоки быстрого солнечного ветра начинаются в корональных дырах. Возникает очевидный вопрос: как распределяется магнитный поток с незамкнутыми силовыми линиями (открытый магнитный поток) за пределами корональных дыр? Солнце вращается дифференциально, однако области корональных дыр не обнаруживают никаких признаков подобного вращения. Отсюда следует, что если корональные дыры не являются асимметричными относительно оси вращения Солнца, то открытый магнитный поток предположительно должен пересекать границы корональных дыр.

Разрешение этой дилеммы возможно в предположении, что открытые силовые линии на Солнце пересоединяются так часто, что открытый магнитный поток оказывается «отцепленным» от дифференциального вращения фотосферы. Благодаря известным свойствам глобального распределения корональных петель, открытый магнитный поток концентрируется в корональных дырах. При этом он не остаётся статическим, но всё время перемещается под совместным действием дифференциального вращения и диффузии магнитного поля, вызванной пересоединением магнитных петель. В результате основания открытых силовых линий непрерывно передвигаются внутрь и наружу от корональных дыр, при этом они концентрируются внутри корональных дыр благодаря преобладанию малых петель в этих областях.

Описанная концепция детально представлена на схематическом рисунке 4.3, где показана идеализированная полярная корональная дыра, открытый магнитный поток, истекающий из неё, и движения оснований силовых линий из области корональной дыры

в область больших корональных петель. Рисунок построен в системе отсчёта, которая вращается с той же скоростью, что и экваториальная область Солнца.

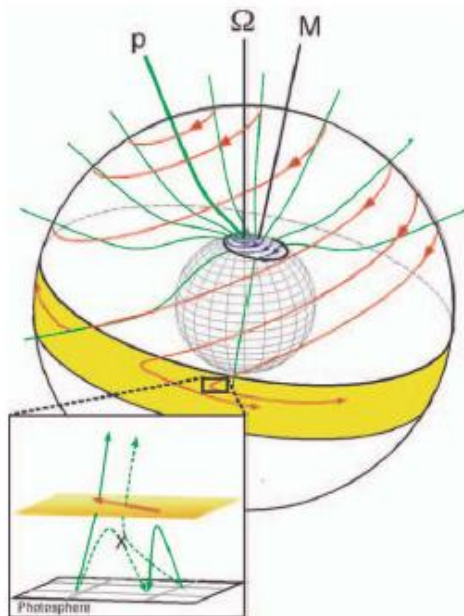


Рис.4.3. Иллюстрация движений незамкнутых силовых линий магнитного поля Солнца в полярных областях солнечной короны (Fisk *et al.*, 1999). Рисунок сделан в системе отсчёта, вращающейся со скоростью вращения экваториальных областей Солнца. Ось M - это ось симметрии при расширении магнитного поля от полярной дыры. Ось Ω есть ось вращения Солнца. Зеленые линии – это открытые силовые линии, причём p – это силовая линия, связанная с гелиографическим полюсом. Красные линии – это траектории силовых линий, движение которых задаётся дифференциальным вращением фотосферы.

Незамкнутые силовые линии от полярной корональной дыры на рис.4.3 совершают крупномасштабные движения: они перемещаются из областей корональных дыр к областям больших корональных петель на одной стороне Солнца, а затем двигаются обратно внутрь областей корональных дыр на противоположной стороне Солнца. Такая динамика магнитного поля в полярных областях представляет интерес не только для изучения физики Солнца, но оказывается также важной, например, для интерпретации некоторых эффектов модуляции галактических космических лучей в гелиосфере.

Как показали измерения на космическом зонде «*Ulysses*», в эпохи минимумов СА из районов больших гелиоширот солнечный ветер дует со скоростью в два раза большей (750-800 км/с), чем из района гелиоэкватора. Из-за взаимодействия потоков быстрого СВ из корональных дыр с медленным СВ из районов гелиоэкватора возникают так называемые взаимодействующие вращающиеся области (ВВО), которые приводят к появлению рекуррентных изменений в потоке ГКЛ. В максимуме СА большинство корональных дыр исчезает, а корональные области с замкнутыми линиями магнитного поля препятствуют свободному вытеканию солнечного вещества. В такие периоды дует более симметричный СВ со средней скоростью около 400 км/с.

Наблюдаются и другие особенности крупномасштабной динамики и структуры гелиосферы в пространстве и времени. Так, анализ данных показывает, что в максимуме солнечной активности появляются корональные выбросы массы (СМЕ) с вмороженным

магнитным полем, которые создают так называемые слившиеся взаимодействующие области (СВО). Затем эти области сливаются и создают глобальные слившиеся взаимодействующие области (ГСВО). Эти образования (СВО и ГСВО) можно считать глобальными явлениями, которые нарушают устойчивую структуру внешней гелиосферы.

С ростом расстояния от Солнца увеличивается тормозящее влияние межзвездной среды на скорость солнечного ветра. Например, в 2002 г. зонд *Voyager 2*, который находился на расстоянии около 65 а.е., зарегистрировал скорость СВ примерно на 60 км/с меньше, чем во внутренней гелиосфере. Наконец, 16 декабря 2004 г. КА *Voyager 1* на расстоянии 94 а.е. и на широте 35°N пересёк терминальную (граничную) ударную волну (ТУВ) и вошёл в «гелиошит» (см. рис.2.4). Непосредственные наблюдения на КА *Voyager 1* показали понижение скорости СВ, увеличение температуры и плотности во время взаимодействия с межзвездной средой, сильное повышение интенсивности ионов низкой энергии в области ТУВ. Магнитное поле увеличилось примерно в 3-4 раза, произошло также усиление флуктуаций поля из-за его сжатия в области ударной волны, и это было решающим доказательством прохождения КА *Voyager 1* через терминальную ударную волну.

4.4. Флуктуации межпланетного магнитного поля

На усредненную топологию ММП нулевого порядка (4.4) накладываются возмущения - неоднородности ММП различных масштабов. Обычно ММП представляют как сумму регулярной и случайной компонент: $B = B_0 + \delta B$, где $\langle B \rangle = B_0$; $\langle \delta B \rangle = 0$; $|\delta B/B| \ll 1.0$. Усредненная компонента B_0 определяет нулевой порядок движения частиц, а флуктуации δB действуют как возмущения (флуктуации, пульсации или неоднородности ММП), приводящие к резонансному рассеянию частиц. С флуктуациями ММП взаимно и очень тесно связаны флуктуации плотности солнечного ветра и скорости плазмы.

В возмущенном солнечном ветре наблюдаются несколько типов крупномасштабной конфигурации поля, например, секторная структура, магнитные облака, жгуты и петли. Даже в «спокойном» солнечном ветре постоянно присутствуют мелкомасштабные флуктуации (волны), занимающие широкую область временных масштабов τ . Не все из этих флуктуаций в настоящее время полностью поняты. Фактически величина τ есть интервал времени, по которому производится усреднение наблюдаемых или возможных реализаций поля. Выбор τ не может быть универсальным, он зависит от характера рассматриваемой задачи. Он определяет также разделение поля на регулярную и случайную компоненты ММП.

Некоторые из флуктуаций ММП имеют очевидное происхождение, например, вращение Солнца ($\tau \approx 27$ суток), высокоскоростные потоки солнечного ветра ($\tau \approx 6$ суток), а также ударные и альфвеновские волны, вращательные и тангенциальные разрывы (τ порядка часов-десятков минут). Другие типы флуктуаций могут возникать, например, за счет временных вариаций параметров короны ($\tau \approx 2-3$ суток), а также за счет волн, индуцированных супергрануляцией ($\tau \approx 20-40$ часов) или взаимодействием потоков солнечного ветра ($\tau \gtrsim 24$ часов).

Флуктуации параметров солнечного ветра (магнитного поля, плотности, скорости плазмы) создают тот динамический и электромагнитный фон, которым определяются характеристики галактических и солнечных космических лучей в межпланетной среде (их транспортный пробег, анизотропия, времена переноса, резонансное рассеяние и др.). Для солнечных космических лучей, время движения которых от Солнца до орбиты Земли не превышает нескольких часов, низкочастотные пульсации поля (с периодами $T > 10^5 \text{ с} \approx 1$ сутки) надо рассматривать как заданное регулярное поле, которое не меняется за время наблюдения данного возрастания потока СКЛ у Земли. Для процессов, время протекания которых больше периода обращения Солнца, интервал τ можно выбрать равным 27 суток.

Такой подход применим, в частности, к анализу 11-летней модуляции ГКЛ. Тогда под регулярным полем можно понимать крупномасштабную и, соответственно, низкочастотную часть полного поля, а под случайным полем – его мелкомасштабные флуктуации. Значения масштаба L_0 или характерного периода T_0 , разграничивающие регулярное и случайное поля, могут быть различными в разных задачах. С другой стороны, как мы увидим в главе 9, крупномасштабные образования ММП (флуктуации фона) очень важны для генерации геомагнитных возмущений типа магнитной бури.

Флуктуации плотности, скорости и магнитного поля в солнечном ветре удобно рассматривать в рамках теории турбулентности. Прямыми и косвенными измерениями установлено, что в межпланетной среде существует широкий спектр магнитных неоднородностей, типичный для развитой турбулентности. Спектр имеет непрерывное распределение по масштабам (частотам или длинам волн). Наблюдаемый спектр (спектральную плотность, или спектр мощности) флуктуаций ММП можно представить в виде:

$$P(k) = dh^2 / dk = A/(k_0 + k)^q = A/(f + f_0)^q \quad (4.5)$$

где h – случайное поле, k – волновой вектор, f – частота флуктуаций; величины k_0 и f_0 соответствуют так называемому основному масштабу турбулентности L_0 . Его смысл, в дополнение к сказанному выше, состоит в том, что в пределах области L_0 значения компонент поля заметно коррелированы, т.е. не являются независимыми. Величина A есть нормировочная постоянная, зависящая от уровня турбулентности, а показатель степени q определяет наклон (форму) спектра при различных длинах волн. Так, если $k \ll k_0$, то спектр (4.5) становится плоским, а при $k \gg k_0$ он удовлетворяет степенному закону k^{-q} . Таким образом, формула (4.5) имеет простой физический смысл: она приближенно описывает распределение плотности энергии между флуктуациями ММП различного масштаба (см. рис.4.4).

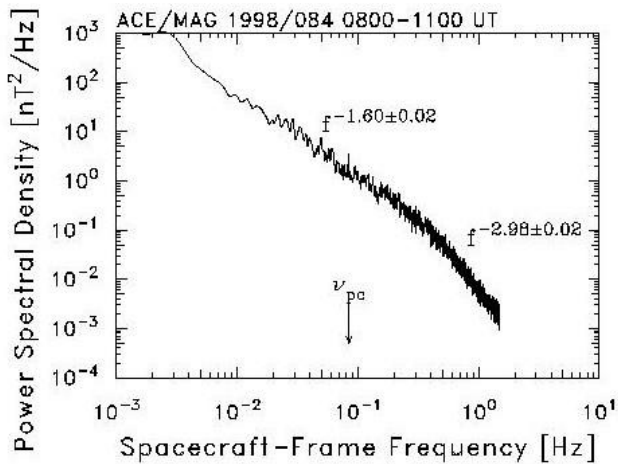


Рис.4.4. Спектр мощности флуктуаций полного вектора ММП по измерениям 1998 г. на борту КА ACE. Отчетливо видно существенное изменение наклона спектра ($q = 1.6-3.0$) в области больших частот флуктуаций (т.е. малых размеров неоднородностей), с изломом вблизи протонной циклотронной частоты ν_{pc} .

Соотношение (4.5) получено путем синтеза большого количества наблюдений вблизи орбиты Земли. Оно, естественно, не отражает всех деталей спектра и его динамики. В

частности, показатель спектра q может существенно меняться в зависимости от рассматриваемого интервала частот, уровня турбулентности, фазы солнечного цикла, типа неоднородностей. Для примера на рис.4.4 приведен спектр мощности флуктуаций для полного вектора ММП. Спектр построен по данным измерений 1998 г. на борту КА *ACE* (*Advanced Composition Explorer*) в точке Лагранжа L_1 на расстоянии 1.5 миллионов километров от Земли в сторону Солнца.

На рис.4.5 представлены спектры мощности для трех компонент ММП в системе отсчета с минимальной дисперсией, т.е., в системе отсчета, в которой одна из осей вытянута вдоль направления поля с наименьшими флуктуациями. Такой метод анализа дает информацию о пространственном распределении флуктуаций данного вектора. Компонента с минимальной дисперсией показана на рис.4.5 черной (нижней) кривой, голубая (верхняя) кривая – это компонента с максимальной дисперсией, а красная (средняя) кривая соответствует компоненте с промежуточной дисперсией.

Легко видеть, что максимальная и промежуточная компоненты имеют гораздо большую мощность, чем компонента с минимальной дисперсией. Таким образом, большая часть мощности флуктуаций связана с квазиперечными компонентами ММП. В общем, такая анизотропия характеризует турбулентность альфеновского типа, присущую высокоскоростным потокам солнечного ветра.

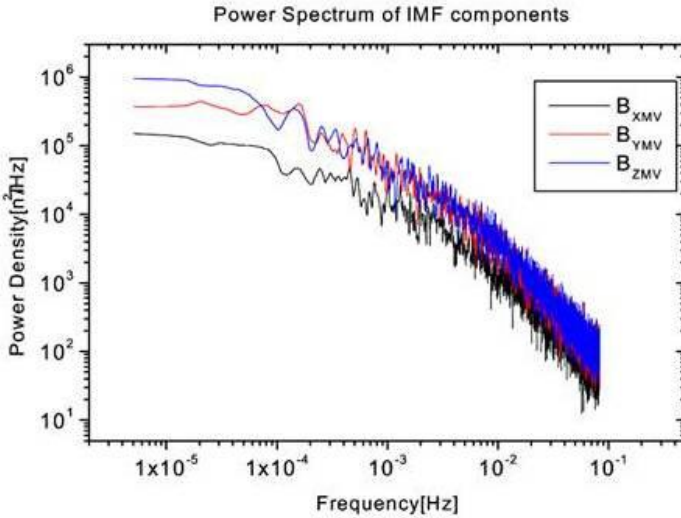


Рис.4.5. Спектры мощности флуктуаций для различных компонент ММП в системе отсчета с минимальной дисперсией (из книги R. Bruno & V. Carbone, 2005). Графики построены по измерениям на КА *Helios 2* в 1976 г. в интервале расстояний 0.3-1.0 а.е.

Использование хорошо развитой теории гидродинамики для описания и понимания свойств «замагниченной» плазмы солнечного ветра имеет давнюю историю. Еще в 1941 г. А.Н. Колмогоров предсказал, что спектр гидродинамической турбулентности должен иметь форму степенного закона с показателем $q = -5/3$. Подобный спектр формируется благодаря своеобразному процессу сохранения энергии в системе путем ее каскадной передачи от больших к малым масштабам. Такое состояние длится до тех пор, пока не возникнут диссипативные механизмы, которые удалят энергию из системы. Это, по-видимому, оказалось справедливым и для спектра флуктуаций ММП с частотами в интервале от 10^{-4} до ~ 0.5 Гц, который называют инерциальной областью. Многие годы проверки подтвердили, что спектр флуктуаций ММП непременно смягчается вблизи

протонной циклотронной частоты ν_{pc} . Этот излом в спектре означает начало действия механизмов диссипации, а область более высоких частот как раз и называют областью диссипации. Эта замечательная особенность наблюдалась при всех измерениях ММП на космических аппаратах - от *Helios* до *Voyager*. Обычно излом считают свидетельством циклотронного торможения альфвеновских волн, хотя полного понимания процессов диссипации пока не достигнуто.

5. УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ НА СОЛНЦЕ

**Истина всегда оказывается проще, чем можно было предположить.
Р. Фейнман**

Одним из важнейших физических процессов на Солнце и/или вблизи него является ускорение заряженных частиц (электронов и ионов) до высоких (релятивистских) энергий. Этот процесс тесно связан, прежде всего, с крупномасштабной структурой и динамикой атмосферы в целом (макроскопические эффекты магнитогидродинамической природы). На другом, микроскопическом уровне рассмотрения, ускорение теснейшим образом связано с интимными свойствами солнечной магнитоплазмы (микрофизические процессы генерации, например, локальных электрических полей). Можно даже утверждать, что процесс ускорения на начальной стадии (от тепловых скоростей) определяется в основном микроскопическими процессами в плазме, тогда как заключительная стадия (ускорение до максимально возможных энергий) требует наличия протяженных (крупномасштабных) магнитных образований в короне Солнца.

5.1. Сценарии ускорения частиц на Солнце

Энергичные частицы присутствуют во Вселенной всюду, и, как выяснилось с самого начала, в целом они не находятся в термодинамическом равновесии. Они проявляют себя, например, в виде космических лучей, в основном, протонов галактического и солнечного происхождения, падающих на земную атмосферу. Релятивистские электроны генерируют синхротронное излучение от удаленных радиогалактик. Энергичные (ускоренные) частицы обнаруживаются также в солнечном ветре вблизи фронтов ударных волн перед выбросами коронального вещества (ВКВ) и на границе магнитосферы Земли. Более того, даже внутри магнитосферы имеются обширные области, заполненные захваченными быстрыми частицами (радиационные пояса Земли). Главная причина того, что природа избегает равномерного распределения для таких частиц, состоит в том, что они встречаются с другими частицами крайне редко. Например, в течение, скажем, миллиона лет, пока частица ГКЛ блуждает по диску нашей Галактики, она имеет вероятность столкнуться с другой частицей всего $\sim 10^{-8}$.

С другой стороны, заряженные частицы в космосе подвергаются сложному воздействию электромагнитных полей. В простейшем случае уравнение движения для нерелятивистской частицы с постоянной массой m , скоростью v и зарядом Ze в электрическом E и магнитном B полях имеет вид:

$$m \frac{dv}{dt} = Ze(E + v \times B) \quad (5.1)$$

Вместе с тем, крупномасштабные электрические поля являются крайне редкими в плазме Вселенной, так что в течение большей части их времени жизни частицы движутся в магнитных полях B по круговым орбитам под действием одной лишь силы Лоренца

$$F = Ze v \times B \quad (5.2)$$

Эта сила действует в направлении, перпендикулярном вектору скорости и поэтому не действует на частицу, тем самым позволяя сохранять ее энергию неизменной. Иными словами, магнитное поле не совершает над частицами никакой работы. С другой стороны,

такое свойство затрудняет частице возможность приобретать энергию, так что при отсутствии столкновений частица может увеличивать свою энергию только под действием электрического поля.

Мы описываем здесь лишь основы классических процессов, поэтому ограничимся кратким рассмотрением простейшего случая, когда частица движется вдоль однородного магнитного поля под действием электрического поля. На самом деле существует гораздо больше тонких аспектов и более сложных случаев, когда возникают не-продольные электрические поля, токовые слои и т.п. В нерелятивистском случае поведение частицы характеризуется несколькими основными параметрами – *ларморовским радиусом* ρ и *ларморовской (циклотронной) частотой (гирочастотой)* ω_B в магнитном поле

$$\rho = v/\omega; \quad \omega_B = ZeB/mc \quad (5.3)$$

а также *магнитной жесткостью* R , *энергией покоя* E_0 и *кинетической энергией* E_k :

$$R = cp/Ze = \rho/B; \quad E_k + E_0 = [E_0^2 + (ZeR)^2]^{1/2}; \quad R = [E_k^2 + E_k E_0]^{1/2} \quad (5.4)$$

Все эти параметры оказались очень удобными при анализе движения частиц в различных космофизических процессах, в частности, в моделях ускорения частиц на Солнце (см. ниже), взаимодействия ускоренных частиц с солнечной атмосферой (глава 6), переноса в межпланетном пространстве (глава 7) и т.п.

Проблема ускорения частиц в космосе имеет довольно длительную историю. Ещё в 1933 г. W. Swann впервые предложил механизм ускорения, в котором частицы могут достигать энергий космических лучей в результате электромагнитной индукции, связанной с переменными магнитными полями звёзд. Этот механизм впоследствии стал известен под названием *бетатронного механизма*. В 1949 г. E. Fermi предположил, что космические лучи набирают свою энергию путем *стохастического ускорения* в процессе рассеяния заряженных частиц на случайно движущихся магнитных облаках. Что касается ускорения частиц на Солнце, то в последние десятилетия была выявлена и детально исследована тонкая связь между крупномасштабной макроскопической магнитной гидродинамикой солнечной вспышки и микроскопической физикой плазмы в ускорительных процессах. Не вызывает сомнений, что глобальное окружение (среда), в котором происходит ускорение, создается МГД процессами, которые, в свою очередь, подвергаются воздействию процессов микроскопической физики (например, возникновение аномального сопротивления и аномального переноса в плазме). Макрофизика и микрофизика объединяются также в процессах фрагментации корональной плазмы, которые были выявлены, например, при наблюдениях жесткого рентгеновского излучения, микроволновых радиовсплесков, так называемых спайков (spike) радиоизлучения и других явлений.

Для ускорения СКЛ было предложено несколько макроскопических сценариев, которые опирались на реальные (наблюдаемые) свойства солнечной атмосферы и оказались применимыми для более детальных расчетов микроскопических процессов. Один из сценариев включает взрыв магнитной аркады и ее закрытие путем магнитного пересоединения. При этом возникают вспыхивающие петли и хромосферные ленты, наблюдаемые во время типичной эруптивной двухленточной вспышки (two-ribbon flare). Второй сценарий связан со взаимодействием (путем пересоединения) между отдельными вспыхивающими петлями, как это предполагается в модели всплывающего магнитного потока. Третий сценарий опирается на фрагментацию энерговыделения в большом количестве малых токовых слоев (микровспышек - microflares), хотя этот процесс мог бы также происходить и в каждом из первых двух сценариев.

В каждом из этих сценариев имеют место следующие процессы: 1) прямое ускорение электрическим полем, связанное с пересоединением; 2) ускорение на ударных волнах (как

вблизи места пересоединения, так и на быстрой ударной волне, которая распространяется наружу от области первичного энерговыделения); 3) стохастическое ускорение на турбулентности в месте (или местах) пересоединения и в струях, которые с ускорением отходят от области пересоединения. При этом для развития количественных моделей важно решить такие вопросы, как механизмы образования токовых нитей, природа и детальные свойства обратных токов; эффективность ускорения и доля магнитной энергии, которая передается ускоряемым частицам.

5.2. Основные механизмы ускорения

Поскольку магнитное поле не совершает над частицей работы, все ускорение происходит при её движении вдоль электрического поля. В связи с этим мы используем термин "*прямое ускорение*" для того, чтобы указать на процессы, в которых ускорение обеспечивается за счет усредненного, или среднего, электрического поля, а не за счет флуктуирующего поля. Например, электрон полярных сияний, проходящий через скачок потенциала вдоль силовой линии, подвергается прямому ускорению, тогда как частица КЛ при рассеянии на магнитных флуктуациях не испытывает такого ускорения. Напротив, этот последний из двух процессов является классическим примером не-прямого, *стохастического ускорения*. Вместе с тем, существуют также процессы, которые стирают различие между терминами "прямое" и "стохастическое" ускорение. Ниже для примера мы будем обсуждать *диффузионное ускорение на ударной волне*, которое является прямым процессом, если смотреть на единичный акт столкновения между частицей и ударным фронтом. Однако, если рассматривать множественные столкновения частиц с ударной волной и турбулентными магнитными флуктуациями выше по потоку плазмы, то процесс становится стохастическим.

Нерелятивистское уравнение движения частицы (5.1) в случае однонаправленного магнитного поля можно разделить на компоненту, направленную вдоль магнитного поля

$$m (dv_{\parallel}/dt) = qE_{\parallel} \quad (5.5)$$

и компоненту, перпендикулярную магнитному полю

$$m \frac{dv_{\perp}}{dt} = q(E_{\perp} + v_{\perp} \times B) \quad (5.6)$$

Когда силовые линии не являются однонаправленными, продольная компонента скорости v_{\parallel} подвергается действию поперечной компоненты электрического поля E_{\perp} , а v_{\perp} - действию продольной компоненты E_{\parallel} . В релятивистском варианте уравнения (5.1) множитель $m d\mathbf{v}/dt$ заменяется множителем $d/dt(\gamma m \mathbf{v})$, где $\gamma = 1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$ - Лоренц-фактор. Рассмотрим сначала простейший случай, когда частица движется вдоль однородного магнитного поля под действием электрического поля.

Согласно уравнению (5.5), электрическое поле будет неограниченно ускорять частицы вдоль магнитного поля, причем ионы и электроны будут двигаться в противоположных направлениях. Этот процесс может продолжаться до тех пор, пока электрическая сила не будет уравновешена силой столкновительного трения. Для ионов с массой m_i и зарядом q_i , движущихся со средней скоростью дрейфа u_d относительно электронов (рис.13.1), это случится при выполнении условия

$$m_i(u_d/\tau) \approx q_i E \quad (5.7)$$

где τ - характерное время торможения ионов за счет взаимодействия с электронами. Параллельная электрическая проводимость σ_{\parallel} тогда определяется как отношение $\sigma_{\parallel} = j/E$, где электрический ток есть $j \approx q_i n_i u_d \approx e n_e u_d$ при зарядовой нейтральности. Теперь

из (5.7) мы находим, что параллельная электрическая проводимость, в терминах частоты электрон-ионных соударений, $\nu = m_i n_i / (m_e n_e t)$, имеет вид

$$\sigma_{\parallel} = \varepsilon_0 \omega_{pi}^2 \tau = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2}{\nu} \quad (5.8)$$

где $\omega_{pe} = [(e^2 n_e) / (\varepsilon_0 m_e)]^{1/2}$ и $\omega_{pi} = [(q^2 n_i) / (\varepsilon_0 m_i)]^{1/2}$ - это электронная и ионная плазменная частота, соответственно.

Учтем теперь, что скорость дрейфа u_d значительно меньше, чем тепловая скорость электронов $v_{Te} = (k_B T_e / m_e)^{1/2}$. В результате частота столкновений ν и, следовательно, столкновительное трение растет линейно со скоростью u_d , а окончательная формула для электрической проводимости имеет вид

$$\sigma_{\parallel} = \frac{6(2\pi)^{3/2} m_e v_{Te}^3 \varepsilon_0^2}{e^2 \ln \Lambda} \approx 0.0152 \frac{T_e^{3/2}}{\ln \Lambda} \text{ сим м}^{-1} \quad (5.9)$$

где $\ln \Lambda$ есть известный кулоновский логарифм. Видно, что проводимость растет как $T_e^{3/2}$, так что более горячая плазма является лучшим проводником. Соответствующая скорость дрейфа из уравнения (5.7) можно теперь оценить из соотношения

$$\frac{u_d}{v_{Te}} = 3 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{E}{E_D} \quad (5.10)$$

где величина

$$E_D = \frac{q_i \ln \Lambda}{4\pi \varepsilon_0 \lambda_D^2} \quad (5.11)$$

известна как *поле Дрейсера*, а $\lambda_D = \sqrt{[\varepsilon_0 k_B T / (n_e e^2)]}$ есть *длина Дебая*. Эти соотношения важны для понимания самой начальной стадии ускорения, которая, очевидно, полностью определяется микропроцессами в плазме. На этой стадии как раз и происходит генерация локальных электрических полей, начинается генерация плазменных неустойчивостей при взаимодействии типа «волна-частица» и появляются так называемые *убегающие* частицы.

Действительно, по мере того, как относительная скорость дрейфа u_d ионов и электронов приближается к тепловой скорости электронов v_{Te} , линейная связь между E и j нарушается. Равновесие между электрической силой и силой трения за счет столкновений становится более невозможным, и частицы начинают неограниченно ускоряться до тех пор, пока не начнется генерация неустойчивостей "волна-частица". Это явление убегания частиц было впервые проанализировано Дрейсером (Dreiser, 1959). Он рассмотрел уравнение движения для иона, имеющего скорость u_d относительно окружающего фона электронов:

$$m_i \frac{du_d}{dt} = eE - eE_D G(u_d) \quad (5.12)$$

где отношение $\langle u_d \rangle = \frac{u_d}{\sqrt{2} v_{Te}}$, функция $G(\langle u_d \rangle) = \frac{\text{erf}(\langle u_d \rangle)}{2(\langle u_d \rangle)^2} - \frac{e^{-\langle u_d \rangle^2}}{\langle u_d \rangle \sqrt{\pi}}$, а произведение

$eE_D G$ есть сила трения (т.е., ион ускоряется электрическим полем eE , но тормозится силой трения $eE_D G$). При этом распределение электронов считалось максвелловским, а электрическое поле принималось $\geq E_D$. Наиболее важное свойство силы трения состоит в том, что она начинает падать, когда дрейфовая скорость u_d превышает $\sqrt{2} v_{Te}$. Иными

словами, как только величина u_d достигает области значений, где эта сила начинает уменьшаться, происходит убегание частиц. Критическое значение электрического поля E_c , при котором $u_d = \sqrt{2}v_{Te}$, равно $E_c = 0.214E_D$; это максимальное поле для состояния равновесия имеет место при максимальном значении функции $G(u_d)$. Появление убегающих частиц можно считать первым этапом в ускорении частиц. Для дальнейшего развития процесса необходима более интенсивная энергизация (нагрев) плазмы на хвосте распределения Максвелла.

5.3. Ускорение частиц при магнитном пересоединении

Частицы ускоряются во многих местах и в различных средах повсюду в космосе. В некоторых случаях за ускорение может непосредственно отвечать один из основных явлений в плазме – так называемое магнитное пересоединение. Это явление по существу представляет собой перестройку топологии магнитного поля, обусловленную изменением связанности его силовых линий, нарушением их вмороженности и т.д. При этом происходит высвобождение накопленной магнитной энергии, которое во многих ситуациях является преобладающим источником свободной энергии в плазме. Разумеется, в плазме, кроме пересоединения, происходит также множество других процессов. Однако этот фундаментальный процесс, по-видимому, является наиболее важным для объяснения крупномасштабных динамических преобразований магнитной энергии. Наиболее яркие свидетельства пересоединения находят именно на Солнце.

Выше мы упомянули три главных механизма ускорения частиц (прямое ускорение, стохастическое ускорение и ускорение на ударных волнах). Ниже мы приводим иллюстративные примеры того, как эти механизмы работают в солнечных условиях. В первую очередь рассмотрим прямое ускорение, непосредственно связанное с магнитным пересоединением в атмосфере Солнца. В этой проблеме астрофизиков долго смущала одна фундаментальная трудность. Как мы уже отмечали, космическая плазма имеет очень высокую электрическую проводимость. Поэтому трудно представить себе, как в такой плазме мог бы возникать пространственный заряд, достаточный для появления заметного электрического поля: ведь этот заряд должен мгновенно разрушаться. Однако уже в 60-ых годах прошлого века было показано, что в некоторых особых конфигурациях магнитных полей электрическое поле может возникать в малых объемах и сохраняться в течение промежутка времени, достаточного для ускорения частиц до сравнительно высоких энергий.

Одна из таких конфигураций, вероятно, возникает в атмосфере Солнца на границе раздела двух солнечных пятен противоположной полярности. В области соприкосновения пятен, где обычно начинает развиваться солнечная вспышка, магнитное поле становится равным нулю – возникает «нулевая линия» (рис.5.1, слева). Магнитное поле в этом месте «аннигилирует», или «диссипирует», а сам процесс получил название «магнитного пересоединения». Процесс пересоединения не ограничивается образованием одной нейтральной точки, а приводит со временем к формированию нейтрального токового слоя (рис.5.1 справа).

Действительно, поскольку пятна перемещаются, картина силовых линий будет со временем изменяться. Вместо нулевой линии возникает тонкий слой электрического тока («токовый слой»), который разделяет области противоположно направленного магнитного поля. При этом по краям токового слоя образуются два волокна уплотнённой плазмы, параллельные нулевой линии. Со временем волокна раздвигаются со скоростью расширения токового слоя. Именно такая волокнистая структура наблюдается в мощных солнечных вспышках.

Токовый слой – образование неустойчивое, а его реальная структура и физические свойства могут сильно отличаться от предполагаемых. Так, для самосогласованного описания ускорения частиц в слое приходится вводить небольшие магнитные поля вдоль

и поперек слоя, тем самым нарушая его «нейтральность». Вместе с тем, принципиальное значение имеет тот факт, что «обрыв» тока способен вызвать появление сильного электрического поля, которое, работая в сравнительно малом объеме, способно за короткое время ускорить огромное количество частиц. Таким образом, энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля, а затем в энергию ускоренных частиц. В некоторых моделях токового слоя напряженность электрического поля может достигать весьма больших значений $\sim 10\text{-}30$ В/см.

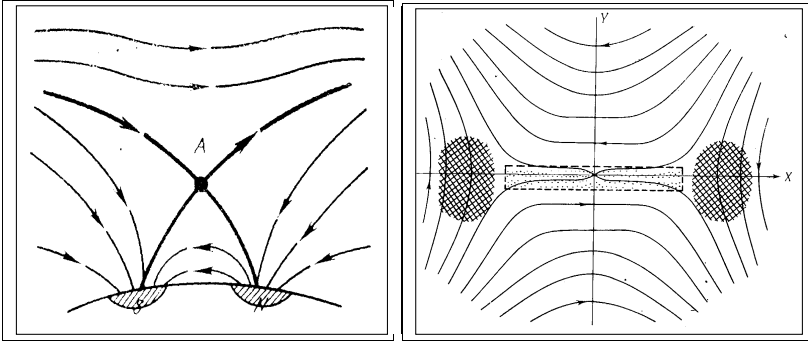


Рис.5.1. Схема образования нулевой линии магнитного поля и нейтрального токового слоя в солнечной атмосфере. *Слева*: Возникновение нулевой линии магнитного поля (точка А) в области соприкосновения двух солнечных пятен с магнитными полями противоположной полярности (в точке А линия перпендикулярна плоскости рисунка). *Справа*: Токовый слой (точки) и магнитное поле (сплошные линии) над развивающейся биполярной группой пятен. Двойной штриховкой показаны области уплотненной плазмы, которые наблюдаются в виде ярких волокон на фоне вспышки. Ток течет перпендикулярно плоскости ХУ, волокна видны при наблюдениях «сверху».

Реальное движение частиц в области токового слоя и в его окрестностях в процессе ускорения также является очень сложным. На рис.5.2 показаны траектории движения протонов (ионов) и электронов частиц для случая, когда в токовом слое толщиной $2l$ магнитное поле имеет две компоненты $B_x = -B_0 y/l$, и $B_y = \lambda B_0$, а электрическое поле E_z направлено перпендикулярно плоскости ХУ. В общем случае частица, попадая в токовый слой, испытывает воздействие трёх сил: сила $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ вызывает дрейф частицы в направлении y ; параллельное электрическое поле приводит к ускорению частицы; поперечное магнитное поле вызывает круговое вращение частицы относительно направления y .

Разумеется, эта схематическая картина не исчерпывает всей сложности ускорения частиц при магнитном пересоединении. Тем не менее, в настоящее время уже не остаётся сомнений, что этот фундаментальный процесс играет очень важную роль в различных сценариях ускорения (см., например, книгу Priest and Forbes, 2000). Магнитным пересоединением обусловлен процесс энерговыделения при генерации солнечной вспышки. Более того, начало энерговыделения, скорее всего, инициирует и другое выдающееся явление солнечной активности - выброс коронального вещества (СМЕ).

Типичные значения коронального магнитного поля $B \cong 100$ Г и плотности плазмы $n \cong 10^{11}$ см⁻³ дают типичную скорость движения СМЕ от Солнца, равную альфвеновской скорости в короне $V_A \cong 1000$ км/с. Принимая, что скорость втекания плазмы внутрь токового слоя равна $u = 0.1V_A$ (быстрое пересоединение при большой, но конечной проводимости), можно оценить время формирования слоя $t_f = L/u = 10^2 - 10^3$ с, где $L = 10^9 - 10^{10}$ см – это характерный масштаб для ширины и длины слоя. В предположении о наличии удерживающего поперечного электрического поля вне слоя получим характерное время ускорения $t_{ac} \cong 0.03$ ($E_p/1$ ГэВ) с. Отсюда следует, что протон может быть ускорен до энергии $E_p \sim 100$ ГэВ всего за 3 с (Litvinenko and Somov, 1995).

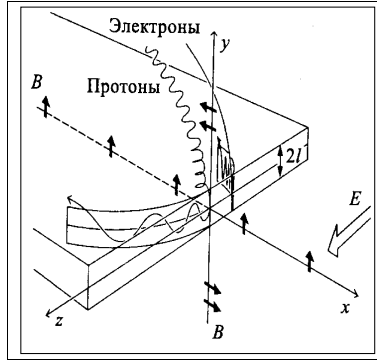


Рис.5.2. Траектории частиц в токовом слое с толщиной $2l$, двухкомпонентным магнитным полем $B_x = -B_0 y/l$, $B_y = \lambda B_0$ и электрическим полем E_z (Спайсер, 1965).

Как отмечают Priest и Forbes (2000), магнитное пересоединение даёт элегантное и пока единственное объяснение движений хромосферных лент и всплывающих петель во время солнечных вспышек. Без привлечения пересоединения невозможно также объяснить выход солнечного магнитного потока во время СМЕ и эруптивных протуберанцев и ряд других солнечных явлений. Особенно важно то, что пересоединение позволяет объяснить огромную энергию, выделяющуюся в солнечных вспышках.

Первые пространственные наблюдения гамма-излучения вспышек на ИСЗ *RHESSI* (Lin *et al.*, 2003) показали, что ускоренные электроны и ионы вторгаются в хромосферу в существенно различных областях. Этот новый факт в общих чертах согласуется с предположением о первичном ускорении частиц электрическим полем (Сомов, 2006) в высокотемпературном турбулентном токовом слое (ВТТС). Положительно и отрицательно заряженные частицы ускоряются электрическим полем в противоположных направлениях и, соответственно, высыпаются из ВТТС в хромосферу вдоль различных линий магнитного поля. Аккуратные расчеты эффекта, к сожалению, отсутствуют. Кроме того, остаётся еще немало нерешенных вопросов, связанных, в основном, с оценкой относительного вклада магнитного пересоединения и ударных волн в формирование спектра ускоренных частиц. Вместе с тем, недавние наблюдения на КА *Hinode* (2008 г.) впервые принесли фактически прямое доказательство магнитного пересоединения.

5.4. Стохастическое ускорение

При пересоединении магнитных полей возникает много различных типов волн. Иными словами, вблизи области пересоединения создаётся турбулентная среда, в которой энергия может передаваться частицам путем *стохастического ускорения*. Предтечей этой идеи был Ферми (1949), который предположил, что галактические космические лучи ускоряются при рассеянии заряженных частиц на случайно движущихся межзвёздных магнитных облаках. Облака действуют как магнитные зеркала, упруго отражающие частицы. При встречном столкновении частица приобретает энергию, тогда как в догоняющем столкновении энергия частицы уменьшается (рис.5.3).

Эта гипотеза развивалась в двух направлениях. В том процессе, который называется *ускорением Ферми первого порядка*, два зеркала непрерывно сближаются, двигаясь навстречу друг другу, так что частицы совершают колебательные движения вперед и назад много раз, наращивая свою энергию при каждом отражении. Если U есть скорость облака, а v - скорость частицы, тогда энергия увеличивается пропорционально отношению U/v . При этом предполагается, что скорость частицы намного больше скорости облака.

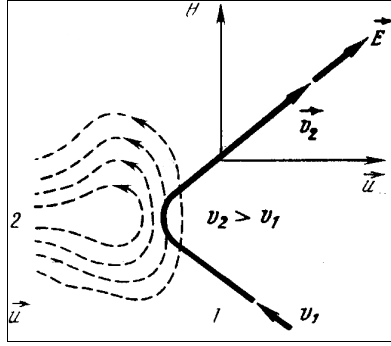


Рис.5.3. Схема столкновения частиц (1) с движущимся магнитным облаком (2). При движении облака возникает электрическое поле E , направленное перпендикулярно векторам H и u . Это поле ускоряет частицу при встречном столкновении или замедляет её, если она догоняет облако.

В случае *ускорения Ферми второго порядка* (истинно *стохастического ускорения*) облака движутся в случайных направлениях. Это означает, что во многих столкновениях частица вынуждена скорее терять энергию, а не приобретать ее. Однако, как можно показать, столкновения с потерей энергии статистически (в среднем) оказываются менее частыми, чем столкновения с приобретением энергии. В результате происходит все-таки чистый прирост энергии, хотя и с меньшим темпом, $\Delta E \sim U^2/v^2$. Поэтому такое ускорение оказывается гораздо менее эффективным, чем ускорение Ферми I порядка. При этом также необходимо выполнение условия $v \gg U$.

Ускорение Ферми II порядка все еще может работать даже в случае, если столкновения с приростом энергии (встречные) и с потерей энергии (догоняющие) - равновероятны, поскольку имеет место диффузия по импульсам в фазовом пространстве. При высоких энергиях объем фазового пространства намного больше, чем при низких энергиях, так что представляется весьма маловероятным, чтобы случайное блуждание частицы в пространстве импульсов привело к уменьшению ее скорости до нуля. Основные проблемы при ускорении частиц на Солнце (или вблизи него) связаны с двумя необходимыми условиями: в солнечной плазме должна существовать хорошо развитая волновая турбулентность, т.е., достаточный уровень турбулентности (*спектр волн*), а ускоряемые частицы должны предварительно иметь определенную *энергию инжекции* E_i . Вместе с тем, стохастическое ускорение обладает одним замечательным свойством – резонансным характером взаимодействия «волна-частица». Резонанс описывается выражением:

$$x \equiv \omega - k v - n\Omega/\gamma = 0 \quad (5.13)$$

где ω есть частота волны, k - компонента её волнового вектора \mathbf{k} вдоль магнитного поля, v - компонента скорости частицы параллельно магнитному полю, Ω - циклотронная частота, γ - Лоренц-фактор частицы, n - номер гармоники, x - параметр рассогласования частот. Наиболее эффективный резонанс (т.е. отбор-передача энергии от волны к частице) происходит при $n = 0$ (*затухание Ландау*).

Хотя первоначальная идея Ферми для ускорения ГКЛ межзвездными облаками претерпела большие изменения, оба механизма - I и II второго порядка - получили большое развитие и продолжают занимать выдающееся место в астрофизике. Механизм I порядка может действовать между противоположно направленными МГД импульсами или аккретирующими астрофизическими течениями. Однако, наиболее эффективной конфигурацией, в которой он работает, является ударная волна. Последняя обеспечивает

встречные столкновения для частиц, которые пересекают ударный фронт и рассеиваются на магнитных неоднородностях, расположенных вверх и вниз по течению относительно ударного фронта. Этот механизм, получивший название *диффузионного ускорения на ударном фронте*, описывается ниже в разделе (5.5).

5.5. Ускорение ударными волнами

Ударные волны различных типов естественным образом создают благоприятные условия для ускорения частиц двумя основными способами. В случае *дрейфового ускорения* обычно отслеживается движение отдельных частиц в электромагнитном поле ударного фронта, а их взаимодействием с флуктуирующими электрическими и магнитными полями пренебрегают. Поскольку частицы могут входить в область ударного фронта под разными питч-углами, то на выходе они могут появляться с целым набором энергий. В случае *диффузионного ускорения* на ударном фронте частицы совершают возвратно-поступательные движения между неоднородностями, существующими вверх и вниз по течению относительно фронта. При этом частицы многократно пересекают ударный фронт и каждый раз увеличивают свою энергию.

Прежде чем рассматривать движение частицы вблизи ударной волны, необходимо выяснить, какая система отсчета является наиболее удобной для анализа свойств ударного фронта. При этом следует отдать предпочтение системе отсчета, движущейся вместе с ударным фронтом, и следить за плазмой, приближающейся к фронту из направления вверх по течению и покидающей фронт в направлении вниз по течению. Вообще говоря, магнитное поле будет иметь некоторый наклон по отношению к вектору скорости плазмы. Поэтому течение будет сносить магнитные силовые линии к фронту с одной стороны и уносить от фронта - с другой, так что точка пересечения силовых линий с ударным фронтом будет перемещаться вдоль фронта, скажем, со скоростью u_l .

Рассмотрим для простоты процесс дрейфового ускорения на перпендикулярном ударном фронте (рис.5.4). В заданной конфигурации плазма приближается к ударному фронту со скоростью u_l гораздо меньшей, чем скорость частицы v , и составляет $\sim 0.1c$. В этой области вверх по течению частица вращается в магнитном поле $B_1 u$, тогда как ее ведущий центр дрейфует со скоростью $\mathbf{E} \times \mathbf{B}_1 / B_2^2 = u_l \mathbf{x}$. Когда частица проникает через ударный фронт в область ниже по течению, ее орбита имеет меньший радиус кривизны, поскольку там напряженность магнитного поля B_2 выше. Для положительно заряженной частицы конечный результат сводится к сдвигу ее орбиты в z -направлении параллельно электрическому полю. Таким образом, электрическое поле действительно выполняет работу над частицей и увеличивает ее энергию (электрон двигался бы в противоположном направлении). Поскольку движение ведущего центра очень напоминает градиентный дрейф в неоднородном магнитном поле, то этот процесс называют *дрейфовым ускорением на ударном фронте*.

Несмотря на резкое увеличение магнитного поля на ударном фронте, магнитный момент частицы сохраняется, по крайней мере, при $v \gg u_l$. Непосредственным следствием этого является тот факт, что даже в случае сильных ударных волн приращение энергии оказывается скромным. Например, типичное максимальное сжатие магнитного поля (B_2/B_1) в 4 раза приводит к увеличению энергии, также в 4 раза, для нерелятивистской частицы и всего в 2 раза - для релятивистской частицы.

Эффективное дрейфовое ускорение на ударных волнах более важно для электронов, чем для ионов. Причина состоит в том, что большинство электронов (т.е., тепловые электроны) имеют гирорадиусы намного меньше толщины фронта, так что их движение является адиабатическим, тогда как тепловые ионы стремятся иметь гирорадиус, близкий к толщине фронта, и поэтому они не испытывают отражения. Кроме того, тепловые электроны могут подвергаться отражению, тогда как более медленно движущиеся ионы с более узкой функцией распределения, вообще говоря, имеют питч-углы внутри конуса

потерь и, следовательно, не подвергаются отражению. Предпринимались различные попытки расширить основную теорию такого ускорения, чтобы каким образом повысить прирост энергии. Однако, в большинстве случаев увеличение не превышало множителя порядка 10. Очевидно, требуется иной механизм (такой как диффузионное ускорение на ударных волнах, см. ниже), чтобы объяснить более существенное ускорение, подобное ускорению космических лучей.

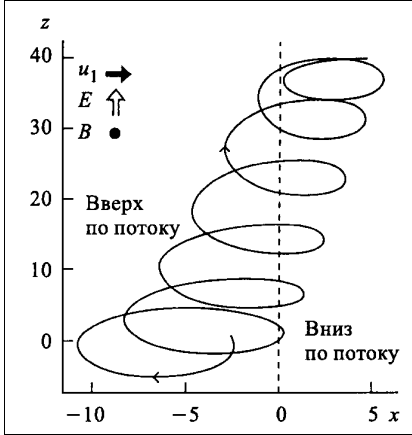


Рис.5.4. Дрейфовое ускорение на фронте ударной волны. Сплошная линия – траектория частицы, пересекающей ударный фронт (пунктир), u_1 – скорость плазмы ($\sim 0.1c$) при приближении к фронту (Kirk, 1994). Поле B направлено вдоль отрицательной оси y , поле E – в направлении оси z , а течения плазмы – слева направо в направлении оси x . Поле E сдвигает частицу вдоль оси z и увеличивает ее энергию.

Движение частиц в электромагнитном поле носит обратимый характер. Потенциальная проблема с механизмом дрейфового ускорения на ударных волнах состоит в том, что замедление на волне разрежения может противодействовать ускорению на ударной волне. Однако, если питч-угловое ускорение происходит далеко вверх или вниз по течению относительно ударного фронта, оно будет изотропизовать распределение частиц и вносить в этот процесс необратимость. Ниже мы рассматриваем эффект рассеяния при ускорении на ударной волне и описываем простую модель для ускорения частиц по обе стороны ударного разрыва с учетом диффузии (рис.5.5). В системе покоя фронта ударной волны плазма несет потоки волн турбулентности со скоростью u_1 из области перед фронтом в область за фронтом ударной волны, где её скорость становится $u_2 < u_1$. Внутри каждой области нет изменения энергии частиц при рассеянии, если пренебречь дисперсией фазовых скоростей. Однако при пересечении разрыва частица с импульсом p испытывает два последовательных соударения с двумя рассеивающими центрами, движущимися с относительной скоростью $\pm (u_1 - u_2)$, что приводит к приращению энергии $\Delta E_k = p(u_1 - u_2)$.

Рассмотрим ударный фронт, окруженный зоной, свободной от рассеяния, где питч-угловое рассеяние отсутствует. Далее вниз и вверх по течению существуют области, в которых рассеяние создает изотропное распределение частиц. Вычисление конечных функций распределения, вообще говоря, представляет собой очень сложную задачу. Даже если частицы, падающие на фронт справа, образуют часть изотропного распределения, некоторые частицы могут отразиться на ударном фронте, тогда как другие смогут пройти через ударный фронт. Микроскопическая картина диффузионного ускорения на ударных волнах отчетливо раскрывает физику процесса. Оценим изменение импульса частицы, когда она пересекает ударный фронт, а затем возвращается обратно.

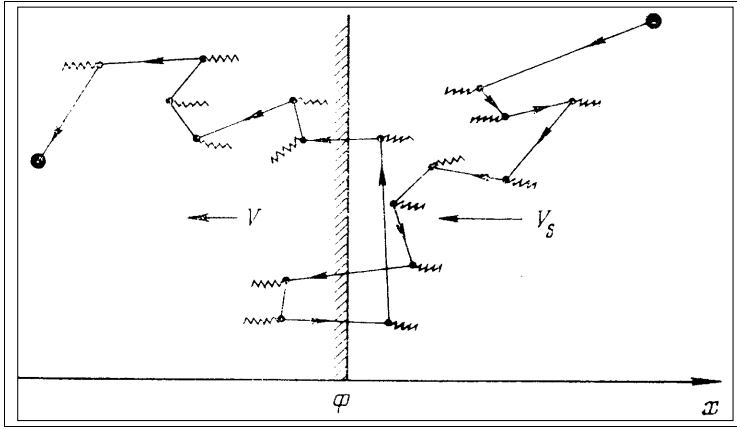


Рис.5.5. Рассеяние и ускорение частиц при прохождении ударного фронта (Volk, 1981). Разность скоростей плазмы на фронте $\Delta u = (u_1 - u_2)$ является источником МГД энергии для ускорения частиц.

При переходе частицы из области вверх по течению в область ниже по течению для случая $-u_1/v_1 < \mu_1 < 1$ изменение импульса $(p_2 - p_1) \approx p_1(\Delta u/u_1)\mu_1$, где μ_1 есть косинус питч-угла частицы в области перед фронтом (вверх по течению). Предположим, что та же частица рассеивается в области ниже по течению, так что меняется только ее питч-угол. Тогда при ее возвращении в область выше по течению она приобретает новый импульс $p_1 + \Delta p_1 = p_2(1 - \mu_2 \Delta u/v_2)$, причем $-1 < \mu_2 < -u_2/v_2$. Вероятность пересечения фронта частицей пропорциональна относительной скорости частицы и фронта, т.е. $|\mu v + u|$, если распределение частиц изотропно. Поэтому среднее приращение импульса за один цикл, с точностью до множителя первого порядка по $\Delta u/v$, будет

$$\left\langle \frac{\Delta p}{p_1} \right\rangle = \frac{4\Delta u}{3v} \quad (5.14)$$

Таким образом, приращение импульса за одно столкновение есть множитель первого порядка по $\Delta u/v$. Именно поэтому такое ускорение получило название процесса Ферми I порядка, тогда как столкновения частицы со случайно движущимися рассеивающими центрами приводили бы к приращению II порядка. Действительно, из макроскопического решения уравнения переноса можно показать, что далеко вверх по течению (где функция распределения падает экспоненциально) все частицы увлекаются обратно к ударному фронту. В то же время в области далеко вниз по течению (где распределение является пространственно однородным) некоторые частицы рассеиваются обратно к фронту, тогда как другие уносятся адвекцией в противоположную сторону.

Спектр для стационарного состояния можно вычислить из баланса полного числа частиц с импульсами больше $p + \Delta p$, пересекающими фронт в сторону области ниже по течению, и числом частиц, пересекающих фронт с импульсами больше p за вычетом частиц, которые убегает без возврата. Показатель спектра определяется выражением

$$s = \frac{3u_1}{\Delta u} = \frac{3u_1}{u_1 - u_2} \quad (5.15)$$

Если частицы, входящие в систему далеко вверх по течению, отсутствуют, то необходим какой-то процесс инжекции, который мог бы разогнать небольшое количество частиц до определенного начального импульса, с которого и начнется собственно

ускорение частиц. Если частицы далеко вверх по течению имеют степенной спектр вида $A_1 = A_0 p^{-q}$, с показателем $q < s$, то роль ударной волны сводится к генерации спектра

$$f_2^{(0)} = \frac{s}{s-q} A_0 p^{-q} \quad (5.16)$$

т.е., конечный спектр повторяет форму исходного, но имеет повышенную интенсивность.

Интересно отметить, что спектр ускоренных частиц (при $q > s$) имеет степенной показатель s , который зависит только от степени сжатия плазмы u_1/u_2 , но не зависит от коэффициента диффузии κ . Этот результат, однако, может видоизмениться за счет влияния границ. Далее, как отмечено выше, при однократном пересечении фронта увеличение энергии частицы происходит на величину порядка $\Delta u/v_1$. Это означает, что для увеличения импульса, скажем, в p/p_0 раз частицы должны пересечь фронт $p v_1 / \Delta u p_0$ раз. Кроме того, предположение об изотропии функции распределения теряет силу уже для частиц с энергиями выше тепловой (как это наблюдается, например, вблизи головной ударной волны Земли), или в случае релятивистского ударного фронта.

В целом, однако, диффузионное ускорение на ударном фронте является медленным процессом. Так, чтобы прирост энергии частицы составил $p v = 2E(\kappa)$, необходимо N^2 рассеяний с изменением энергии при пересечении фронта, где $N = v/\Delta u$, p и v – импульс и скорость частицы. Кроме того, для эффективного ускорения необходимо выполнение условия $v \gg u$ (проблема инжекции), иначе частицы будут просто перетекать из области вверх по потоку через фронт в область вниз по потоку. Вместе с тем, при больших временных масштабах этот механизм ускорения может быть достаточно эффективным. Так, например, его считают вполне пригодным для образования аномальной компоненты космических лучей на границе гелиосферы (см. главу 2).

5.6. Комбинированное ускорение СКЛ

Даже из краткого изложения проблемы хорошо видно, насколько многообразны и сложны процессы ускорения частиц в космосе (в частности, в плазме солнечной атмосферы). До сих пор ни одна теоретическая или эмпирическая модель ускорения не смогла удовлетворительно объяснить, например, совокупность данных о спектре, составе, зарядовом состоянии и других свойствах ускоренных солнечных частиц. В этих условиях исследователи часто обращаются к концепции множественного (многократного) ускорения частиц на Солнце (или вблизи него). Суть её сводится к идее, что на Солнце, скорее всего, работает некоторая комбинация ускорительных механизмов, которые, к тому же, могут находиться в определённой иерархии друг к другу. Для примера рассмотрим ускорение частиц в модели волокнистой короны (Vlahos, 1989, 1994).

В этой модели предполагается, что активная область на Солнце представляет собой ансамбль малых магнитных трубок (волокон), их характеристический радиус составляет ≤ 10 -100 км, а сами трубки перемещаются случайным образом с характеристической скоростью $u = 0.5$ км с⁻¹ (рис.5.6). При определенных обстоятельствах могут образоваться множество областей энерговыделения («горячих точек») - областей диссипации энергии магнитного поля, т.е., токовых слоёв (или, в другой терминологии, «микро-вспышек»), что и положит начало собственно вспышке.

С другой стороны, в процессе эволюции «горячих точек», по-видимому, образуется множество ударных волн, которые могут быть эффективными и быстрыми ускорителями частиц. Дрейфовое ускорение на отдельной волне – это когерентный (регулярный) процесс, но ускорение на N волнах приобретает стохастическую природу. При этом ускорение прямым электрическим полем в области пересоединения, очевидно, может служить инжектором частиц для последующего стохастического ускорения. Такая комбинированная картина «рассеянного пересоединения» и «многоточечного ускорения»

имеет свои трудности. В частности, для формирования ударных волн она требует слишком высоких температур в короне, несовместимых с наблюдениями. Поэтому, более перспективным, в контексте коронального пересоединения, выглядит стохастическое ускорение, с предварительной инъекций «затравочных частиц» из области (областей) пересоединения.

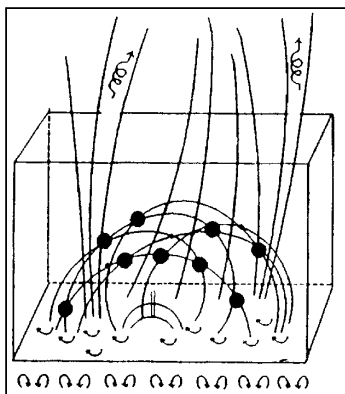


Рис.5.6. Катастрофическое взаимодействие тысяч токовых слоев в модели волокнистой короны (Vlahos, 1989, 1994). Частица набирает энергию стохастическим образом при взаимодействии со множеством областей магнитного пересоединения (тёмные кружки).

За последние два десятилетия концепция многократного ускорения обогатилась новым содержанием. В частности, были предложены и развиты новые модели ускорения частиц в протяженных магнитных структурах солнечной короны: ускорение в присутствии СМЕ, двукратная инъекция релятивистских СКЛ, модель двух источников, ускорение в быстро расширяющихся и эволюционирующих корональных петлях и др. Было также показано, что спектры источника, рассматриваемые в широком интервале энергий СКЛ (от ≥ 10 МэВ до ≥ 10 ГэВ), допускают различные аппроксимации, включая степенную функцию с изломом, который как раз и может свидетельствовать о многократном (по крайней мере, двукратном) ускорении. Поэтому включение данных о спектрах источника СКЛ в общую картину генерации энергичных солнечных явлений позволяет глубже понять нерешенные проблемы ускорения частиц на Солнце.

5.7. Вспышки, СМЕ и два класса солнечных протонных событий

В самых общих чертах, модель динамики комбинированного возмущения в солнечной атмосфере можно представить в виде схемы, показанной на рис.5.7. Магнитное пересоединение имеет место на вершине вспыхивающих магнитных петель в короне и сопровождается генерацией сильных альфвеновских волн или быстрых ударных волн, которые движутся вверх и вниз от области пересоединения. Эта область служит источником ускоренных солнечных частиц, которые образуют быструю (импульсную) компоненту СКЛ. Частицы, идущие вниз, проникают («оседают») в хромосферу и генерируют гамма-излучение (см. главу 6), тогда как частицы, идущие вверх, покидают Солнце и наблюдаются в межпланетном пространстве в виде импульсных протонных событий. С другой стороны, над областью пересоединения может сформироваться СМЕ с мощной ударной волной. Последняя способна ускорить большое количество частиц до значительных энергий и, тем самым, образовать вторую – задержанную или постепенную компоненту СКЛ.

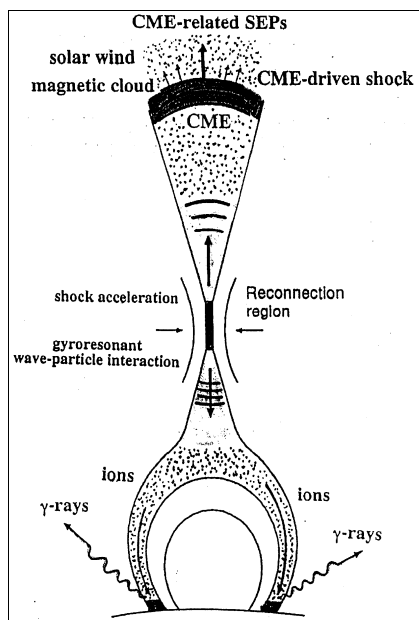


Рис.5.7. Схема генерации частиц высоких энергий с учетом процесса магнитного пересоединения в солнечной атмосфере (Yoshimori *et al.*, 2000).

Такая схема формирования двух компонент СКЛ или, соответственно, двух классов солнечных протонных событий (СПС), как выяснилось недавно, справедлива не всегда. Однако она имеет под собой серьёзное наблюдательное обоснование. Прежде всего, как уже отмечалось, сами солнечные вспышки принято делить на импульсные и постепенные в зависимости от длительности всплеска мягкого рентгеновского излучения (Таблица 3.1). Вспышки двух классов имеют разные временные и пространственные характеристики, а также отличаются своей энергетикой, наличием или отсутствием CME и т.п. Эти различия побудили исследователей провести аналогичный анализ данных о солнечных протонных событиях (СПС), регистрируемых у Земли. В результате стало совершенно очевидно, что деление на два класса применимо и к протонным событиям (Таблица 5.1). Действительно, события отличаются по степени обогащения электронами и протонами, по содержанию ^3He и ^4He , Fe и O, по степени ионизации атомов железа $Q(\text{Fe})$. Имеются также различия по типам радиоизлучения, по длительности и угловой ширине наблюдаемого потока частиц на орбите Земли, наличию или отсутствию CME, межпланетных ударных волн, по частоте событий в течение года.

Вместе с тем, при более пристальном анализе индивидуальных протонных событий приходится признать, что не все они укладываются в приведенную схему, часть из них имеют смешанные характеристики, а их распределение имеет скорее непрерывный, а не бимодальный характер. Это может быть связано как с условиями генерации СКЛ, так и с условиями их наблюдения. Действительно, обе популяции регистрируются далеко от места ускорения, поэтому нельзя исключить эффектов распространения и накопления. С другой стороны, хотя приведенная классификация СПС носит чисто феноменологический характер, за их наблюдательными различиями могут скрываться разные механизмы генерации СКЛ. Для понимания этих различий оказалось существенным то обстоятельство, что частицы низкой энергии (~ 1 -10 МэВ для протонов) реагируют крайне чувствительно на некоторые процессы, которые не играют никакой роли для частиц более

высоких энергий. И хотя нам приходится опираться на эмпирическую классификацию событий, конечной целью исследования остаются фундаментальные физические механизмы ускорения. Сказанное можно проиллюстрировать схематическим рисунком 5.8, где показаны два основных подхода к проблеме генерации СКЛ.

Таблица 5.1. Два класса солнечных протонных событий (Reames, 1996, 1999)

Параметры частиц, Методы наблюдений	Импульсные события	Постепенные события
Частицы:	СПС, обогащенные электронами	СПС, обогащенные протонами
$^3\text{He}/^4\text{He}$	~1	~0.0005
Fe/O	~1,23	~0.15
H/He	~10	~100
Q(Fe)	~20	~14
Длительность	Часы	Дни
Раствор конуса	<30 градусов	~180 градусов
Тип радиоизлучения	III, V (II)	II, IV
Коронोगраф (CME)	-	CME (96%)
Солнечный ветер	-	Межпланетная UV
Число случаев/год	~1000	~10

В случае вспышек поток ускоренных частиц отличается сравнительно узким конусом раствора, а в их составе наблюдается эффект обогащения ионами ^3He , Fe и других малых составляющих СКЛ. Процесс ускорения развивается быстро, и это свидетельствует в пользу прямого ускорения частиц электрическим полем, обусловленным магнитным пересоединением. Магнитная конфигурация источника содержит открытые силовые линии, что облегчает выход ускоренных частиц в межпланетное пространство. Если же ускорение связано с ударной волной, инициированной CME, то вся картина генерации СКЛ сильно усложняется. Источник в этом случае имеет большие угловые размеры, а наблюдаемый временной профиль интенсивности потока СКЛ, по-видимому, включает в себя частицы различных популяций, ускоренных на различных стадиях комплексного процесса «вспышка-CME». Например, при анализе известного большого события 14 июля 2000 г. (Bastille Day Event) были получены свидетельства того, что спектр ионов Fe сильно отличался от спектров более лёгких ионов. Для объяснения этого факта авторам (Tylka *et al.*, 2001) пришлось допустить, что конечный состав частиц был сформирован при ускорении на фронте ударной волны от CME из двухкомпонентной популяции, которая включала сверхтепловые частицы солнечного ветра и небольшую добавку (~5%) остаточных вспышечных частиц. Аналогичное допущение было использовано ранее для объяснения повышенного отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в некоторых постепенных протонных событиях.

В некоторых работах предпринимались попытки разделить восстановленные спектры солнечных протонов в зависимости от их источников (импульсные или постепенные вспышки, ударные волны от CME, другие энергичные солнечные и межпланетные явления). На примере нескольких СПС был обнаружен важный факт: число ускоренных частиц, оседающих в солнечной атмосфере, систематически меньше, чем число убегающих частиц. Вопрос принципиальной важности, который возникает в связи с этим, сводится к следующему: можно ли различить убегающие и взаимодействующие частицы в импульсных и постепенных событиях? Как показал анализ, эта проблема не может быть решена полностью на основе лишь данных о спектрах СКЛ в источнике, так что вопрос остаётся открытым до сих пор.

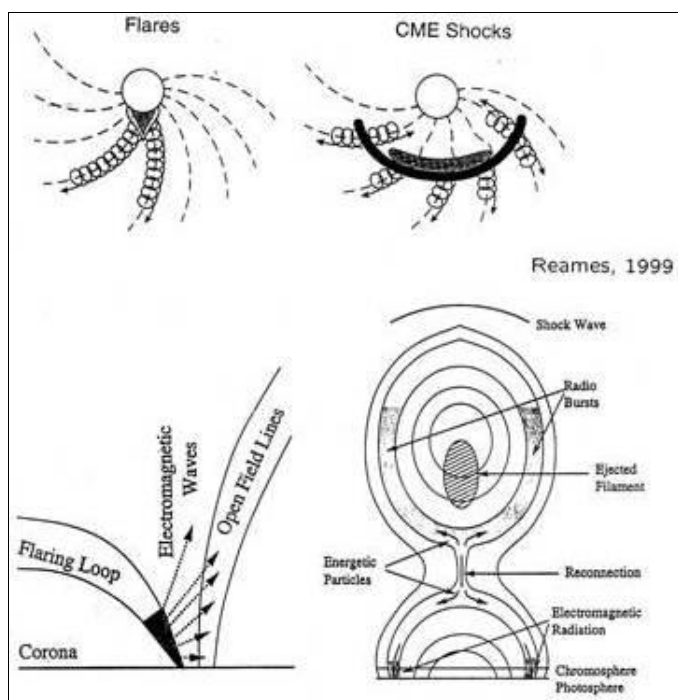


Рис.5.8. Вспышки и CME: В основе формирования солнечных протонных событий, наблюдаемых на орбите Земли, могут лежать два разных физических механизма (сценария) ускорения солнечных космических лучей (Reames, 1999; Kallenrode, 2002).

Наблюдения гамма-излучения высокой энергии и большой длительности от вспышек 11 и 15 июня 1991 г. (см. главу 6) открыли новые аспекты давно обсуждаемой проблемы многократной инжекции и/или непрерывного ускорения частиц на Солнце. Альтернативные гипотезы сводятся к тому, что частицы могут быть либо импульсно ускорены, а затем захвачены в магнитных петлях, либо могут непрерывно ускоряться в течение длительного времени. Возможно также, что частицы ускоряются при различных физических условиях в нескольких эпизодах, разделенных определенными интервалами времени. В этом последнем случае спектры частиц, ускоренных в различных эпизодах, могут существенно различаться между собой.

Более подробное обсуждение механизмов ускорения и их приложений к конкретным событиям выходит за рамки нашего рассмотрения. Тем не менее, следует отметить, что во многих моделях ускорения важная, если не решающая, роль отводится магнитному пересоединению как источнику энергии и генератору электромагнитных полей, необходимых для ускорения частиц. Например, Reames (2000) и Yoshimori *et al.* (2000) принимают процесс магнитного пересоединения в качестве основы для описания как импульсных, так и постепенных солнечных вспышек. При этом в случае импульсных вспышек, согласно Reames (2000), частицы (электроны и ионы) резонансно ускоряются стохастическим механизмом (см. формулу (5.13)) на волновой турбулентности, генерированной при пересоединении. В более сложных постепенных вспышках (Yoshimori *et al.*, 2000) магнитное пересоединение служит соединительным звеном между стохастическим ускорением и ускорением на ударной волне от CME.

Что касается самого ускорения на ударных волнах в солнечной короне и/или в межпланетном пространстве, то его роль в сложных СПС типа 4 августа 1972 г. может

быть весьма значительной. Однако, несмотря на хорошо развитый математический аппарат, ни одна из предложенных моделей (например, Ellison & Ramaty, 1985; Zank *et al.*, 2000; Бережко и др., 2003) не может удовлетворительно описать ускорение СКЛ до экстремально высоких энергий $E_p \geq 10 - 100$ ГэВ. Солнечные протоны достигают таких энергий, на наш взгляд, за счет прямого ускорения электрическими полями при магнитном пересоединении в протяженных магнитных структурах в короне Солнца. Как было показано нами (Мирошниченко и др., 2000), сценарий такого ускорения в мощных событиях типа 29 сентября 1989 г. неизбежно должен включать несколько стадий.

6. УСКОРЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА

**We have a theory for everything we can't resolve with a telescope.
– Dr. Eugene N. Parker, University of Chicago, Spring 2002 AAS Meeting**

Энергичные частицы, ускоряемые в атмосфере Солнца, несут на себе печать всех свойств той среды, где происходит ускорение, и всех процессов, в которых они начинают участвовать. Так, например, элементный состав и энергетический спектр СКЛ отражают, соответственно, состав солнечной атмосферы и особенности механизмов ускорения. Далее, кроме потерь энергии в ионизационных столкновениях с веществом атмосферы, ускоренные частицы теряют энергию на генерацию различного рода электромагнитных волн - от ядерного гамма-излучения до километровых радиоволн. При этом, из-за различия масс у электронов и ионов природа и темп их энергетических потерь совершенно различны. Электроны теряют энергию в основном на ионизацию среды и генерацию тормозного рентгеновского и синхротронного радиоизлучения, тогда как протоны, кроме ионизации, участвуют преимущественно в ядерных взаимодействиях на уровне хромосферы и фотосферы, где рождается множество вторичных частиц (нейтроны, позитроны, пионы и др.), а также происходит генерация солнечного гамма-излучения.

Исторически первым (еще в 1942 г.) было открыто вспышечное радиоизлучение. Это открытие послужило первым косвенным свидетельством ускорения частиц (электронов) до высоких энергий. Впоследствии наземные наблюдения радиоизлучения Солнца стали одним из лучших методов диагностики солнечной плазмы. Вместе с тем, давно ожидаемое теоретически солнечное гамма-излучение, указывающее на присутствие ускоренных ионов (протонов), было впервые уверенно зарегистрировано лишь спустя 30 лет, во время мощных вспышек в августе 1972 г., благодаря внеатмосферным спутниковым измерениям. Ниже кратко описывается современное состояние солнечной гамма-астрономии, дан обзор ее возможных астрофизических приложений.

6.1. Ядерные реакции в атмосфере Солнца

Энергичные ионы, ускоренные в солнечных вспышках или на фронтах ударных волн, связанных с движением СМЕ, регистрируются непосредственно путем прямых измерений в космическом пространстве на различных расстояниях от Солнца. Начиная с 1972 г., ускоренные ионы уверенно обнаруживаются также косвенно - по гамма-линиям, которые генерируются в области взаимодействия ионов с веществом атмосферы Солнца, т.е., в хромосфере и фотосфере (так называемая модель толстой мишени). Во многих гамма-вспышках регистрируются ионы с энергией ~ 100 МэВ, а в некоторых из них протоны ускоряются до энергий ≥ 10 ГэВ. Время ускорения составляет около 1 с. Число протонов с энергией выше 30 МэВ равно примерно $3 \times 10^{31} \text{ с}^{-1}$, что в сумме дает около 10^{32} протонов при типичной длительности вспышки ~ 30 с. Соответствующие величины для протонов с энергией выше 1 МэВ равны 10^{35} с^{-1} и 3×10^{36} . Они содержат суммарную энергию около 3×10^{24} Дж (3×10^{31} эрг), что сравнимо с энергией нетепловых электронов (если опираться на модель толстой мишени), а также с магнитной энергией, содержащейся в кубе со стороной 10^9 см и магнитным полем ~ 0.1 Тесла (10^3 Гаусс).

Типичные энергетические пороги для измерений потоков солнечных протонов в межпланетном пространстве, например, $E_p > 10, > 30, > 60$ и > 100 МэВ соответствуют магнитной жесткости протонов $R > 0.14, > 0.24, > 0.34$ и > 0.44 ГВ, соответственно (см. формулу (5.4)). Нейтронные мониторы на поверхности Земли чувствуют приход СКЛ, начиная с энергии около 433 МэВ ($R \approx 1$ ГВ). Наземная сеть станций космических лучей в

целом (нейтронные мониторы, мюонные телескопы и ионизационные камеры) позволяет регистрировать СКЛ в интервале жесткостей $\geq 1\text{-}10$ ГВ. Ценную информацию о солнечных протонах в интервале энергий $\approx 100\text{-}500$ МэВ приносят стратосферные измерения. Наконец, большие мюонные детекторы и другие нестандартные установки дают уникальные сведения о солнечных частицах предельно высоких энергий (≥ 100 ГэВ).

Применение двух характеристик заряженных частиц (E и R) оказалось очень удобным не только для описания движения частиц в магнитных полях, но и для представления их спектров. На рис.6.1 приведены некоторые примеры спектров известных протонных событий в энергетическом (E) и жесткостном (R) представлениях. На левой и средней панелях показаны дифференциальные и интегральные спектры, соответственно, полученные по измерениям СКЛ у Земли. Эти данные важны, прежде всего, для расчетов геофизических эффектов СКЛ и оценок их радиационной опасности на околоземных орбитах. Что касается ядерно-физических эффектов СКЛ в атмосфере Солнца, то для их изучения необходимы сведения о форме спектра и абсолютном количестве ускоренных частиц непосредственно в источнике. На правой панели для примера приведены восстановленные спектры источника для двух протонных событий, причем одно из них (23 февраля 1956 г.) до сих пор остается крупнейшим за всю историю наблюдений СКЛ.

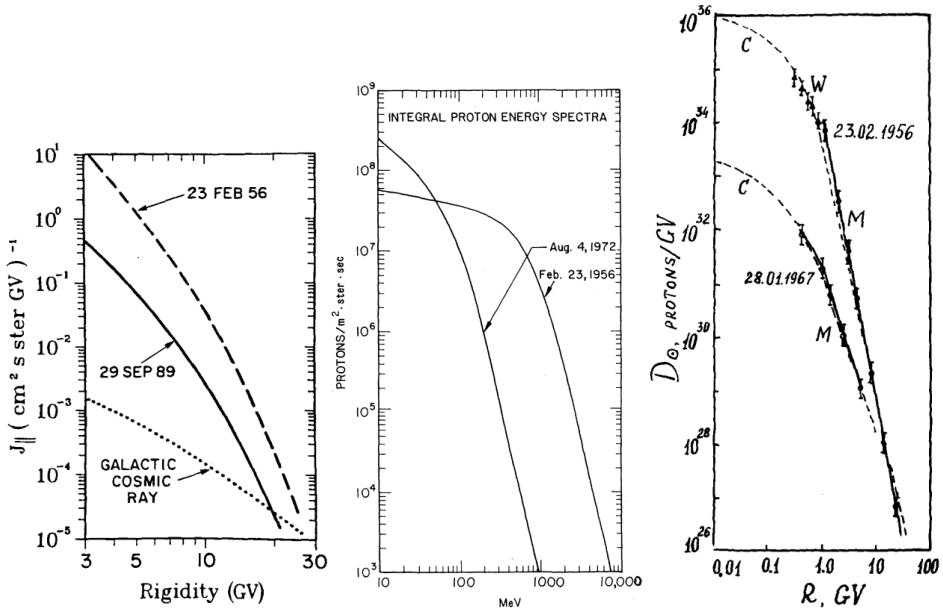


Рис.6.1. Характерные спектры больших протонных событий по наблюдениям у Земли (левая и средняя панели) и в источнике (правая панель).

Все приведенные выше оценки и данные о спектрах пока недостаточно точны и носят, разумеется, ориентировочный характер, однако важно отметить, что ускоренные протоны, альфа-частицы и другие ионы обладают достаточной энергией, чтобы привести в возбужденное состояние ядра различных элементов в атмосфере Солнца, особенно ядра C, N, O, Fe (рис.6.2). Снятие возбуждения происходит путем испускания гамма-квантов определенной энергии. Излучение наблюдается обычно в виде узких линий, характерных для тех или иных ядер, причем отдельные ядра могут испускать по несколько линий.

Число испускаемых линий и их интенсивность зависят от заряда ядра, типа налетающей частицы и её энергии. Например, ядро углерода даёт наиболее интенсивную

линию с энергией 4.444 МэВ при столкновении с ускоренной альфа-частицей. Одна из линий от ядра азота с энергией 5.105 МэВ (не самая интенсивная) образуется при столкновении с ускоренным протоном. В случае ядра кислорода интенсивная линия с энергией 6.129 МэВ возбуждается при столкновении с быстрыми альфа-частицами и протонами с почти одинаковой вероятностью и т.д. Возбуждённое ядро железа также испускает несколько интенсивных гамма-линий, среди которых наибольший интерес представляют линии с энергиями 0.847, 1.238 и 1.811 МэВ.

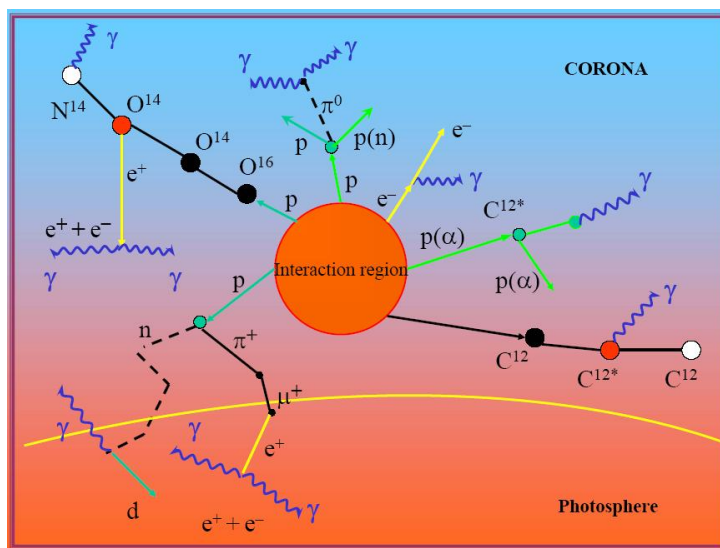


Рис.6.2. Схема ядерных реакций в солнечной атмосфере под действием СКЛ (>10 МэВ/нуклон) (Котов, 2009). Ядерные реакции сопровождаются генерацией множества вторичных частиц – электронов и позитронов, протонов и нейтронов, а также генерацией интенсивного гамма-излучения (в том числе в линии захвата нейтронов ядрами водорода с энергией 2.223 МэВ).

Теоретические расчеты показывают, что наибольший вклад в генерацию ядерных линий вносят ускоренные протоны и альфа-частицы с энергиями ~ 1 -100 МэВ/нуклон. В ядерных взаимодействиях СКЛ рождаются также вторичные нейтроны, электроны и позитроны. Аннигиляция электронов и позитронов в фотосфере приводит к рождению квантов с энергией 0.511 МэВ. При захвате нейтронов ядрами водорода в фотосфере испускаются гамма-кванты с энергией 2.223 МэВ (так называемая линия нейтронного захвата). Наконец, если энергия налетающего протона превышает 300 МэВ, то рождаются пионы, которые при распаде также дают гамма-кванты, но уже значительно большей энергии (> 90 МэВ). Для генерации вспышечных нейтрино с энергией ≥ 1 ГэВ необходимы большие потоки солнечных протонов с энергией до ≤ 100 ГэВ. Все эти виды ядерных излучений, включая нейтроны, часто называют нейтральным излучением вспышек.

6.2. Нейтроны и гамма-излучение

Как отмечено выше, нейтральное излучение солнечных вспышек, включая нейтроны, было теоретически предсказано задолго до его обнаружения. Вспышечные нейтроны были впервые зарегистрированы на спутнике *SMM* 21 июня 1980 г. Регистрация солнечных нейтронов высокой энергии (до 400 МэВ) в редких случаях возможна и на поверхности Земли с помощью глобальной сети стандартных нейтронных мониторов (NM). В конце

90-ых годов была создана также мировая сеть из 5 солнечных нейтронных телескопов (SNT). Полная статистика нейтронных событий, однако, не превышает 30 случаев почти за 30 лет исследований. Одно из самых выдающихся событий произошло 7 сентября 2005 г. В момент вспышки в наиболее благоприятном положении (полдень в подсолнечной точке) находились детекторы нейтронов в западном полушарии Земли. На рис.6.3 хорошо видны, прежде всего, нейтронные пики на нейтронных мониторах в Мехико (Мексика) и на горе Чакалтайя (Боливия), 5- и 2-минутные данные, соответственно. Приведены также 2-минутные показания двух энергетических каналов SNT в Боливии для нейтронов с энергиями >40 МэВ и >80 МэВ. Момент 17:36:40 UT соответствует времени максимума для потока жесткого рентгеновского излучения по измерениям на спутнике *GEOTAIL*. Кривыми серого цвета показаны ожидаемые (расчетные) скорости счета нейтронов, полученные на основе данных нейтронного монитора в Боливии.

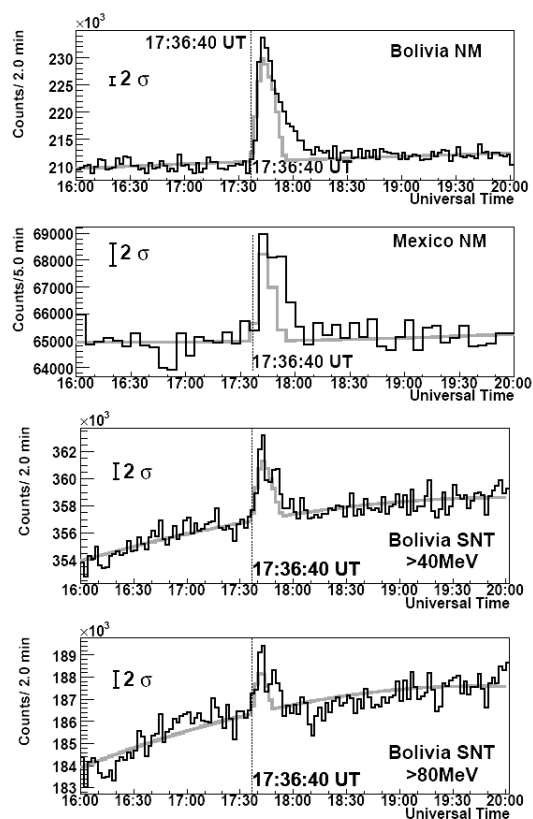


Рис.6.3. Вспышечные нейтроны по наблюдениям 7 сентября 2005 г. на нейтронных мониторах и телескопах солнечных нейтронов в Мексике и Боливии (Sako *et al.*, 2006). Жирными и серыми линиями показаны, соответственно, данные наблюдений и результаты теоретических расчетов.

На рис.6.4 приведены спектры вспышечного гамма-излучения - теоретический (слева) и наблюдаемый (справа). Расчетный спектр получен при одинаковых показателях спектра ускоренных протонов и электронов. Точечная линия – тормозное излучение электронов. Показаны основные линии возбуждения ядер, линия захвата нейтронов водородом, линия аннигиляции позитронов. Позитроны появляются при β -распаде радионуклидов, которые

рождаются в реакциях между ускоренными и «фоновыми» ионами. Для сравнения с теорией приведены данные наблюдений для хорошо измеренной и детально изученной «типичной» гамма-вспышки 27 апреля 1981 г. Сплошная линия в спектре вспышки соответствует расчетам (Murphy *et al.*, 1991) в предположении, что отношение числа ускоренных ионов гелия (альфа-частиц) к числу протонов (ионов водорода) составляет $^4\text{He}/^1\text{H} = 0.5$.

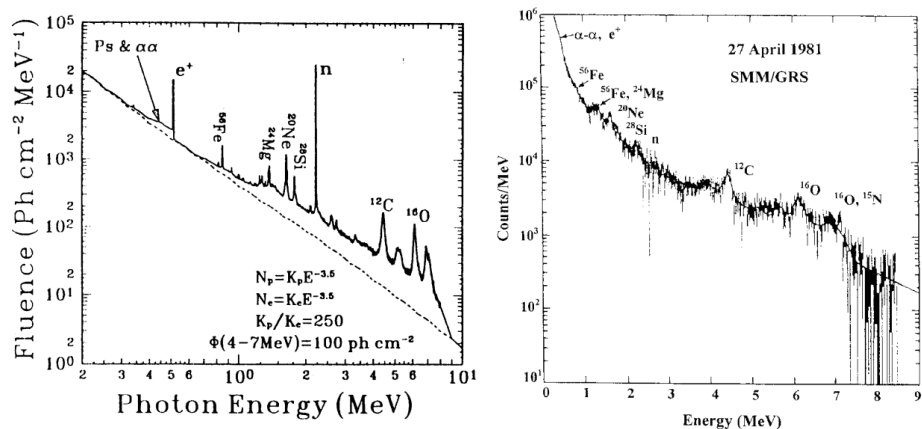


Рис.6.4. Генерация гамма-излучения на Солнце: Слева - теоретический спектр гамма-излучения от солнечных вспышек (Ramaty and Lingenfelter, 1995), справа – данные наблюдений для типичной гамма-вспышки 27 апреля 1981 г. (Murphy *et al.*, 1991).

Большинство линий возбуждения в спектре принадлежит ядрам C, N, O, Ne, Mg, Si, и Fe. Генерация линий обусловлена в основном протонами с энергиями 10-30 МэВ/нуклон (максимум сечения взаимодействия). В подавляющем большинстве случаев снятие возбуждения происходит практически мгновенно. Например, в случае генерации линии с энергией 4.438 МэВ, среднее время жизни ядра углерода в возбуждённом состоянии составляет всего 6.1×10^{-14} с. Для линии 6.129 МэВ от ядра кислорода соответствующая величина равна 2.7×10^{-11} с. В этих «мгновенных» ядерных столкновениях рождаются также вторичные нейтроны. Из этого факта вытекает важное следствие: временной профиль генерации вспышечных нейтронов оказывается идентичным профилю линейчатого гамма-излучения в интервале энергий 4-7 МэВ. В спектре видны также две задержанные линии, представляющие большой интерес, - 0.511 МэВ (аннигиляция позитронов и электронов) и 2.223 МэВ (захват нейтронов). Их задержка относительно испускания «мгновенных» линий возбуждения на время примерно 100-140 с объясняется тем, что как образование источников позитронов, так и генерация нейтронов происходят на значительных глубинах в фотосфере Солнца, где плотность вещества превышает 10^{14} см⁻³ (см. рис.6.2). Линейчатое излучение накладывается на тормозной континуум от энергичных электронов. Этот континуум доминирует при энергиях квантов ниже 1 МэВ и в большинстве случаев – выше 10 МэВ. В некоторых вспышках наблюдаются гамма-кванты от распада пионов с энергией 10 МэВ – 3 ГэВ.

6.3. Астрофизические следствия и приложения

Данные о вспышечных нейтронах и гамма-излучении (т.е. нейтральном излучении Солнца) оказались весьма ценным источником новых сведений о солнечных вспышках и солнечной атмосфере. Они позволяют глубже изучать свойства плазмы в областях ускорения и взаимодействия ускоренных частиц, особенности ядерных взаимодействий в

солнечных условиях, механизмы ускорения и спектр ускоренных частиц, содержание различных элементов на Солнце (особенно соотношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ во время вспышек). Так, например, по отношению интенсивностей гамма-линий с энергиями 2.223 МэВ и (4-7) МэВ можно оценить показатель спектра и число ускоренных протонов в источнике при энергии $E_p \leq 50$ МэВ. Те же параметры для протонов с энергией $E_p \geq 50$ МэВ можно получить из отношения потоков гамма-квантов с энергией $E_\gamma \geq 30$ МэВ к потоку нейтронов с энергией $E_n \geq 20$ МэВ и т.д.

Такой метод пригоден, в основном, для восстановления спектра СКЛ в источнике в интервале энергий 10-100 МэВ. Используя данные о нейтронах более высокой энергии, можно расширить этот интервал до энергий $E_p \leq 1000$ МэВ. Неопределенности и ограничения этого метода обусловлены неточным описанием процессов генерации гамма-излучения и нейтронов во вспышках и свойствами области взаимодействия ускоренных частиц (толстая и тонкая мишени, угловое распределение СКЛ, элементный состав ускоренных частиц и окружающей плазмы и т.п.). В частности, обогащение СКЛ тяжелыми частицами может существенно влиять на число генерированных нейтронов. Из-за неопределенностей отношения $^4\text{He}/^1\text{H}$, которое может сильно меняться от вспышки к вспышке (см. Таблицу 6.1), а также состава ускоренных и фоновых частиц, геометрии вспышки и т.п. показатель спектра протонов также меняется в интервале 2.5-4.5.

На рис.6.5 дана сводка ядерно-физических процессов, связанных с генерацией гамма-излучения. Указаны также основные астрофизические приложения солнечной гамма-астрономии: изучение состава солнечной атмосферы, фотосферного содержания ^3He , спектра ускоренных частиц и др. Таким образом, гамма-астрономия вспышек служит связующим звеном между физикой Солнца как звезды, ядерной физикой и физикой плазмы (через ускорение частиц). Особый интерес представляют данные по содержанию ^3He в фотосфере.

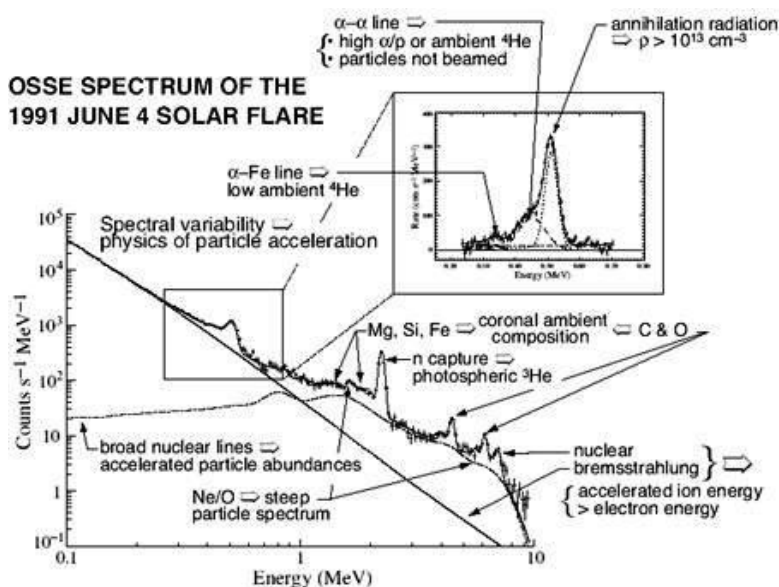


Рис.6.5. Спектр гамма-излучения от вспышки 4 июня 1991 г. по наблюдениям на космическом аппарате CGRO/OSSE (Share & Murphy, 2000). Отмечены некоторые ядерно-физические процессы, связанные с генерацией гамма-излучения. Указаны основные астрофизические приложения солнечной гамма-астрономии: изучение состава солнечной атмосферы, содержания ^3He в фотосфере, спектра СКЛ и др.

В космологии принято считать, что первичный стабильный изотоп гелия ^3He образовался в процессе ядерного синтеза на ранней стадии эволюции Вселенной, и его содержание накладывает определённые ограничения на космологические модели. Определить спектроскопическим путём содержание ^3He на Солнце невозможно, поэтому исключительную важность представляют косвенные оценки отношения $^3\text{He}/^1\text{H}$, например, по данным о гамма-линии с энергией 2.223 МэВ. Дело в том, что вспыхивающие нейтроны захватываются не только ядрами водорода ^1H с генерацией дейтерия ^2H (стабильный изотоп водорода) и испусканием гамма-кванта с энергией 2.223 МэВ (это излучение иногда называют также линией дейтерия)



но и ядрами ^3He с образованием трития (радиоактивный изотоп водорода)



В этой последней реакции нейтроны захватываются без генерации гамма-излучения (безрадиационный захват). Образовавшийся тритий испытывает β -распад с периодом полураспада 4500 ± 8 дней (12.32 лет), при этом снова образуется ^3He и т.д. В результате число нейтронов, участвующих в генерации линии 2.223 МэВ в фотосфере, и плотность потока этого излучения сильно зависят от концентрации ядер ^3He в солнечной атмосфере. Действительно, сечения реакций (6.1) и (6.2) равны, соответственно, $2.2 \times 10^{-30} / \beta \text{ см}^2$ и $3.7 \times 10^{-26} / \beta \text{ см}^2$, где β – скорость нейтронов в единицах скорости света. Следовательно, если величина $^3\text{He}/^1\text{H}$ в области захвата составляет $\sim 5 \times 10^{-5}$ (что сравнимо с наблюдаемым в солнечном ветре), то числа нейтронов, захваченных на водороде и на ^3He , становятся сравнимыми между собой. При этом отношение $^3\text{He}/^1\text{H}$ влияет не только на конечную плотность потока линии 2.223 МэВ, но и на задержку в формировании её временного профиля. В свою очередь, эти особенности позволяют оценить отношение $^3\text{He}/^1\text{H}$ для конкретной вспышки (Таблица 6.1). Захват нейтронов другими ядрами не играет особой роли из-за малой концентрации последних.

Таблица 6.1. Данные наблюдений содержания ^3He в фотосфере

$^3\text{He}/^1\text{H} (\times 10^{-5})$	Вспышка	КА/Детектор	Ссылка
<3.8	03 июня 1982 г.	<i>SMM/GRS</i>	Prince <i>et al.</i> , 1983
2.3 ± 1.2	03 июня 1982 г.	<i>SMM/GRS</i>	Hua & Lingenfelter, 1987
2-5	11 июня 1991 г.	<i>GRANAT/PHEBUS</i>	Trottet <i>et al.</i> , 1993
2.3	04 июня 1991 г.	<i>CGRO/OSSE</i>	Murphy <i>et al.</i> , 1997
4.5	04 июня 1991 г.	<i>CGRO/OSSE</i>	Murphy <i>et al.</i> , 2007
2.3 ± 1.4	06 ноября 1997 г.	<i>YOHKOH/GRS</i>	Yoshimori <i>et al.</i> , 2000
11-20	20 января 2005 г.	<i>CORONAS/AVS-F</i>	Arkhangelskaja <i>et al.</i> , 2009

Из Таблицы 6.1 видно, что имеющиеся немногочисленные оценки отношения $^3\text{He}/^1\text{H}$ в фотосфере укладываются в интервал $\sim (1-5) \times 10^{-5}$. Однако недавно на примере одного из крупнейших протонных событий 20 января 2005 г., выяснилось, что это отношение может быть гораздо большим. Для непротиворечивого описания данных по гамма-излучению в линии 2.223 МэВ для вспышки 20 января 2005 г. необходимо предположить, что $^3\text{He}/^1\text{H} \geq 8 \times 10^{-5}$. Новые расчеты профиля линии 2.223 МэВ для этой вспышки дают наилучшее согласие с наблюдениями при отношении $^3\text{He}/^1\text{H}$ в фотосфере $\sim (1.1-2.0) \times 10^{-4}$. Отметим, что по измерениям энергичных солнечных частиц на орбите Земли после той же вспышки получен верхний предел указанного отношения $< 1.54 \times 10^{-4}$. Имеются и другие факты, указывающие на повышенное содержание ^3He в данной вспышке.

Такой эффект может быть обусловлен, например, преимущественным (резонансным) ускорением ионов ^3He в короне и его последующим накоплением в более низких слоях солнечной атмосферы. Для реализации этого процесса необходимо стохастическое ускорение частиц при определенном уровне турбулентности плазмы в области солнечной вспышки. Ранее было показано, что обогащение теми или иными ионами может быть вызвано гирорезонансом частиц с электростатическими и электромагнитными волнами, частоты которых близки к циклотронной частоте иона. Например, увеличение отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ во вспышках по сравнению с нормальным *корональным* значением $\sim 5 \times 10^{-4}$ до величины 0.1-10 удалось объяснить с помощью электромагнитных ионно-циклотронных волн.

Для поиска других приложений принципиально важной оказалась демонстрация того факта (Кужевский и др., НИИЯФ МГУ, 1998), что сгусток энергичных вспышечных нейтронов до их захвата в фотосфере лишь незначительно расплывается по глубине. Отсюда следовало, что временной ход излучения с энергией 2.223 МэВ может содержать информацию о высотном профиле плотности плазмы в атмосфере Солнца. Действительно, из анализа данных по вспышкам 16 декабря 1988 г., 22 марта 1991 г., 6 ноября 1997 г. и 28 октября 2003 г. был получен вывод о возможном повышении плотности вещества в фотосфере под местом вспышки по сравнению с плотностью в невозмущенной атмосфере. Для примера на рис.6.6 показан расчётный временной профиль линии 2.223 МэВ в сравнении с результатами измерений на КА *SMM/GRS* во время солнечной вспышки 16 декабря 1988 г. В расчетах использовались пять различных моделей плотности, в том числе стандартная модель 1 для невозмущенной атмосферы Солнца и модель 5 с возмущением (уплотнением) в фотосфере. При этом предполагалось, что спектр ускоренных частиц может быть описан функцией Бесселя с аргументом $\alpha T = 0.03$, характеризующим стохастическое ускорение.

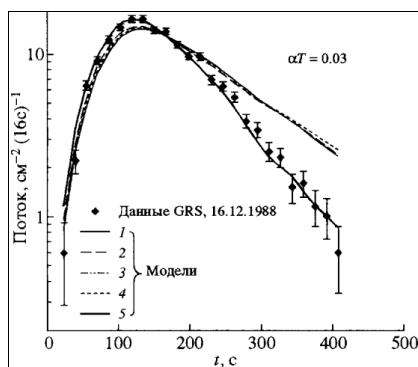


Рис.6.6. Наблюдаемый временной профиль гамма-излучения в линии 2.223 МэВ (ромбы) для вспышки 16 декабря 1988 г. (КА *SMM/GRS*) и его наилучшая аппроксимация ($\alpha T = 0.03$, модель 5, сплошная жирная кривая). Расчетные кривые для стандартной модели 1 (тонкая сплошная кривая) и моделей 2-4 практически совпадают между собой (Troitskaya et al., 2003).

Из рис.6.6 видно, что данные наблюдений наилучшим образом согласуются с моделью 5, которая соответствует случаю, когда по всей толще фотосферы плотность составляет $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Между тем, согласно стандартной модели 1, плотность должна плавно возрастать от $1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на вершине фотосферы до $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ на уровне, лежащем на 330 км ниже. С учётом аналогичных результатов по вспышкам 22 марта 1991 г., 6 ноября 1997 г. и 28 октября 2003 г. можно было думать, что найденный эффект уплотнения под фотосферой является довольно общей характеристикой больших солнечных вспышек. Однако для последней выдающейся вспышки 20 января 2005 г. эффект уплотнения

уверенно подтвердить не удалось, и для интерпретации наблюдений пришлось привлечь дополнительное предположение о повышенном содержании гелия-3 в этом событии (см. выше). Более того, природа уплотнения, если оно имеет место, остаётся очень неясной.

Простые оценки показывают, что для объяснения эффекта недостаточно чисто динамического сжатия вещества под вспышкой в результате взрывного процесса пересоединения (имеются в виду ударные волны, движущиеся вниз к фотосфере). При этом уплотнение вещества должно сопровождаться колебаниями давления и вариациями температуры в подфотосферной области, оптическими эффектами при сжатии плазмы и т.п. Если это так, то было бы важно проанализировать ситуацию с учётом всех подобных наблюдаемых (или предполагаемых) явлений в области под вспышкой. Этот интересный вопрос остаётся предметом исследований, причём, как упоминалось выше, правдоподобное альтернативное объяснение может быть дано на основе гипотезы об увеличении содержания ^3He в фотосфере на предвспышечной стадии или в процессе развития мощной вспышки, как это было сделано для вспышки 20 января 2005 г.

Ряд исследователей (в основном, в США) развивают другое, кинематическое описание процессов формирования временных профилей гамма-излучения. Их подход опирается на модель вспышечной магнитной петли. В модели совместно рассматриваются процессы ускорения, переноса и взаимодействия частиц, включая потери энергии за счёт кулоновских соударений, выбывание частиц при ядерных взаимодействиях, магнитное отражение в сходящемся поле магнитных силовых трубок и, наконец, питч-угловое рассеяние частиц на МГД неоднородностях в короне. При этом каждая измеряемая величина считается зависимой (в различной степени) от таких параметров петлевой модели, как длина петли, уровень МГД турбулентности, степень сходимости силовых линий в подножиях петли, положение вспышки на диске Солнца, высотные профили плотности и температуры и элементный состав атмосферы в области вспышки.

С другой стороны, результаты измерений будут сильно зависеть от чисто физических параметров ускоренных ионов - их полного числа и формы спектра, относительного состава, полного содержания энергии в ускоренных частицах и т.п. Эффективность такого подхода была недавно показана на примере гамма-вспышки 4 июня 1991 г. (Murphy *et al.*, 2007). Авторы оценили отношения $^4\text{He}/^1\text{H} > 0.4$ и $^3\text{He}/^1\text{H} = 4.5 \times 10^{-5}$; показатель степени спектра ускоренных ионов в интервале $\sim 2\text{--}50$ МэВ/нуклон оказался близким к 4.0; при энергиях выше 100 МэВ/нуклон спектр резко становится более крутым. Из этих оценок вытекают определённые ограничения, которые необходимо учитывать в любой модели ускорения. Вместе с тем, измеряемые в наблюдениях величины могут сложным образом зависеть от параметров моделей переноса частиц и их взаимодействия с атмосферой Солнца.

6.4. Локализация источников ускорения

Для понимания механизмов ускорения частиц на Солнце было крайне важно получить сведения о том, где именно происходит взаимодействие ускоренных ионов и электронов с солнечной атмосферой. Такая задача требовала высокого углового и энергетического разрешения при наблюдениях вспышек с помощью космических аппаратов. Впервые необходимого разрешения удалось достигнуть во время наблюдений вспышки 23 июля 2002 г. При этом детекторами КА *RHESSI* были получены изображения источников жесткого излучения вспышки в четырёх энергетических интервалах: 2.223 МэВ (линия дейтерия), 3.25–6.5 МэВ (линии от возбуждённых ядер C и O), а также 0.3–0.5 и 0.7–1.4 МэВ (в основном тормозное рентгеновское излучение электронов). В результате анализа оказалось, что центр масс источника излучения с энергией 2.223 МэВ отстоит от центра излучения с энергией 0.3–0.5 МэВ на 20 ± 6 угловых секунд (рис.6.7). Это указывает на существенные различия в механизмах ускорения и/или переноса ускоренных электронов и ионов вблизи Солнца.

Подобные, хотя и менее выразительные, результаты были получены на КА *RHESSI* также для вспышки 28 октября 2003 г. При этом удалось показать, что источники гамма-излучения (2.223 МэВ) и рентгеновского излучения (100-200 кэВ) располагаются на вспыхивающих лентах, видимых на изображении вспышки в крайней ультрафиолетовой области (195Å) по наблюдениям на КА *TRACE*. Для вспышек 29 октября и 2 ноября 2003 г. было также установлено, что их источники имели компактный характер с характерными размерами порядка 10 угловых секунд или меньше. Таким образом, можно сделать вывод, что во всех трёх случаях излучение вспышек было ограничено в весьма компактных источниках. Это означает, что ионы, генерирующие гамма-излучение, были ускорены, по-видимому, непосредственно в области вспышки, а не на фронте пространственно-распределённой ударной волны, генерированной быстрым СМЕ.

При всей важности этих результатов, надо иметь в виду, что они относятся к изображениям областей взаимодействия ускоренных частиц с атмосферой Солнца (областей генерации гамма- и рентгеновского излучения), которые не обязаны в точности совпадать с областями (источниками) ускорения частиц. К тому же, линия дейтерия 2.223 МэВ запаздывает на ≥ 100 с относительно момента генерации протонов с энергиями ≥ 10 МэВ, и это время может быть сравнимо с полной длительностью ускорения частиц во вспышке.

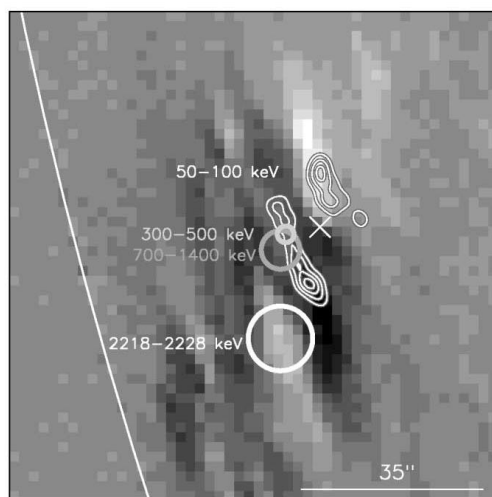


Рис.6.7. Карты-изображения для источников гамма- и рентгеновского излучений от вспышки 23 июля 2002 г. по наблюдениям на КА *RHESSI*. Толстые кружки соответствуют ошибкам величиной 1σ для интервалов 300–500 кэВ (светло-серые линии), 700–1400 кэВ (тёмно-серые линии) и 2218–2228 кэВ (белый кружок). Белыми контурными линиями показан источник излучения 50-100 кэВ с разрешением 3σ . Крестиком отмечен центроид для излучения 50-100 кэВ, построенный с тем же разрешением, что и карты для гамма-излучения (Hurford *et al.*, 2003).

До последнего времени в стандартной схеме расчёта потоков гамма-излучения от вспышек учитывался вклад в интенсивность линий только от pk - и ak -взаимодействий ускоренных протонов p и альфа-частиц α с частицами k окружающего вещества солнечной атмосферы. Было также принято считать, что линии возбуждения являются результатом бомбардировки в основном ядер углерода и кислорода в солнечной фотосфере. Однако резкое расширение возможностей солнечной гамма-астрономии (КА *RHESSI*, *CORONAS-F*, *INTEGRAL* и др.) требуют более детального рассмотрения ряда физических проблем. Одна из них связана с генерацией гамма-излучения в процессах взаимодействия энергичных (ускоренных) тяжелых и средних ядер с аналогичными (фоновыми) ядрами

солнечной атмосферы (это так называемые ядерно-ядерные, или *ij*-взаимодействия). Согласно новым теоретическим оценкам, вклад «перекрёстных» взаимодействий между ускоренными и фоновыми ядрами тяжелее гелия (Kuzhevskij *et al.*, 2005) в генерацию солнечного гамма-излучения может быть более существенным, чем считали ранее. Такие *ij*-взаимодействия особенно эффективны при достаточно мягком спектре ускоренных частиц (дифференциальный показатель ≥ 4 -5).

Этот вывод подтверждается при сравнении теоретических оценок с данными наблюдений на КА *RHESSI* во время вспышки 23 июля 2002 г. Для примера отметим, что наблюдаемое отношение интенсивностей линий углерода и магния $^{12}\text{C}/^{24}\text{Mg}$ (энергии гамма-квантов – 4.43 и 1.37 МэВ, соответственно) составляло 1.0-1.9. Если учитывать взаимодействия этих ядер только с ускоренными протонами и альфа-частицами, то получим отношение интенсивностей от 4.4 до 10.4, в зависимости от предполагаемого содержания этих элементов в атмосфере Солнца. Такое различие между расчетами и наблюдениями означает, что в фотосфере появились вновь рожденные возбуждённые ядра ^{24}Mg , и в результате линия магния оказалась намного сильнее, чем следовало ожидать из первоначальных теоретических соображений. Всё сказанное относится также к отношению интенсивностей линий углерода и кремния $^{12}\text{C}/^{28}\text{Si}$, где энергия гамма-кванта от ядра ^{28}Si равна 1.78 МэВ: наблюдаемое отношение было 1.67-3.31, а расчетное – в пределах 12-31. Чтобы согласовать теорию с наблюдениями, необходимо допустить, что уже в процессе вспышки имела место эффективная генерация новых ядер ^{24}Mg и ^{28}Si в активной области, например, за счёт взаимодействий между ускоренными ядрами ^{12}C и ^{16}O и фоновыми ядрами кислорода ^{16}O . Таким образом, несмотря на впечатляющий прогресс в наших знаниях о солнечных процессах, мы всё ещё далеки от четкого понимания и исчерпывающего описания процессов ускорения частиц на Солнце...

7. ПЕРЕНОС ЧАСТИЦ В ГЕЛИОСФЕРЕ

**Среди континуума дурацких теорий обязательно найдутся такие,
предсказания которых совпадают с экспериментом.
Н. Бор**

К настоящему времени хорошо установлено, что гелиосфера заполнена заряженными частицами различного происхождения (солнечный ветер и солнечные космические лучи, ГКЛ, аномальная компонента космических лучей и др.). В целом они занимают огромный диапазон энергий (около 20 порядков величины). В частности, солнечные космические лучи (СКЛ) занимают интервал кинетических энергий от $E_k \geq 1$ МэВ до $E_k \geq 10$, возможно, до ~ 100 ГэВ (для протонов). Ниже мы будем излагать основные сведения о переносе частиц в основном на примере СКЛ. Те же закономерности переноса справедливы для ГКЛ, для их аномальной компоненты, для частиц иного происхождения в межпланетном пространстве, но уже с учётом других временных и пространственных масштабов.

Если частицы движутся в корональном, межпланетном и геомагнитном полях без взаимодействия друг с другом, то их перенос можно рассматривать в рамках простого *траекторного подхода*. Такой подход возможен в случае, когда плотность энергии частиц значительно уступает плотности магнитной энергии, т.е., когда выполняется условие

$$m_p n_p v^2 / 2 \ll B^2 / 8\pi \quad (7.1)$$

где m_p , n_p и v – масса, концентрация и скорость протона, соответственно, а B – напряженность магнитного поля. В противоположном случае необходимо учитывать коллективное взаимодействие ансамбля частиц с окружающим магнитным полем (*самосогласованный подход*). Что касается собственно СКЛ, то кинетическую энергию $E_k \sim 1$ МэВ/нуклон для большинства вспышек можно условно принять в качестве нижней границы их спектра. Однако, мы не будем ограничивать рассмотрение преобладающей компонентой СКЛ (т.е., протонами с энергией $E_p \geq 1$ МэВ): начальная стадия ускорения частиц от тепловых скоростей (см. главу 5) представляет фундаментальный интерес, а самые острые проблемы формирования спектра СКЛ находятся как раз в области энергий $E_k \leq 1$ МэВ/нуклон.

Перенос энергичных частиц в гелиосфере подразумевает разнообразные типы их движений и взаимодействий: перемещение в крупномасштабных магнитных структурах, рассеяние на неоднородностях межпланетного магнитного поля, различного рода дрейфы, взаимодействия типа «волна-частица», генерация возмущений в межпланетной плазме и др. Кроме того, частица может испытывать ускорение или замедление, т.е. менять свою энергию. Фактически речь идёт об изменениях функции распределения частиц $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ в процессе переноса, при этом могут меняться как пространственные координаты (вектор \mathbf{r}), так и компоненты скорости частицы (её импульс \mathbf{p}).

7.1. Энергичные частицы в гелиосфере

На рис.7.1 представлена современная суммарная картина корпускулярного излучения в гелиосфере на орбите Земли – от тепловых ионов и электронов солнечного ветра до релятивистских частиц ГКЛ. Как видно из левой панели рис.7.1, ниже ~ 10 МэВ поток протонов в межпланетном пространстве фактически может представлять собой смесь частиц, ускоренных во вспышках, на ударных волнах и в магнитосфере Земли; выше 10 МэВ, по-видимому, преобладают вспышечные протоны. В центре приведены аналогичные данные наблюдений для электронов (для сравнения показан также типичный спектр

ускоренных вспыхивающих протонов). Примечательно резкое различие в интенсивностях ускоренных вспыхивающих протонов и электронов при одинаковых энергиях, начиная с $E_k \sim 10^5$ эВ. Это различие касается одной из фундаментальных проблем физики вспыхивающих и ускорения частиц на Солнце, а именно – возможной роли нетепловых протонов как основного носителя энергии в солнечной атмосфере на предвспыхивающей стадии.

На правой панели рис.7.1 показаны типичные спектры ядер кислорода от различных источников, измеренные различными приборами космического аппарата ACE (названия приборов приведены в нижней части панели). Сплошные кривые относятся к постоянно действующим источникам (например, солнечный ветер и ГКЛ); точечные линии соответствуют кратковременным источникам типа солнечных вспыхивающих; густой штриховкой показан невозмущенный фон сверхтепловых солнечных частиц. Обращает на себя внимание так называемая аномальная компонента космических лучей (АКЛ) в области энергий $E_k \sim 1-100$ МэВ/нуклон.

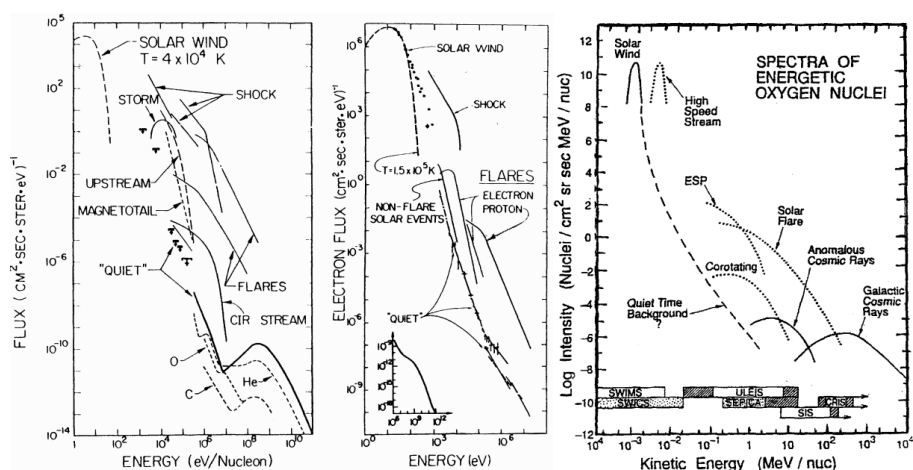


Рис.7.1. Энергетические спектры протонов и некоторых других ионов (левая панель) и электронов (средняя панель) различного происхождения по наблюдениям на орбите Земли (Lin, 1980). Для сравнения на средней панели показан также типичный спектр ускоренных вспыхивающих протонов. На правой панели приведены типичные спектры ядер кислорода от различных источников по измерениям различными приборами на борту космического аппарата ACE (Garrard et al., 1997).

Аномальные космические лучи были впервые обнаружены в начале 1970-ых годов при измерениях на космических аппаратах. Вместо ожидаемого уменьшения потока частиц с энергиями ниже 100 МэВ/нуклон оказалось, что в спектрах некоторых ядер наблюдаются увеличения их интенсивности. Впоследствии было установлено, что такой эффект имеет место для ядер H, He, C, N, O, Ne, Ar и, возможно, также для ядер S, Si и Fe до энергий $E_k \sim 50$ МэВ/нуклон. Появление АКЛ у Земли связывают с ускорением частиц на границе гелиосферы, в области терминальной ударной волны (см. раздел 2.5). В процесс генерации АКЛ вовлечены, с одной стороны, нейтральные частицы межзвездного газа, а с другой – заряженные частицы солнечного ветра. Между этими двумя популяциями частиц происходит обмен зарядами, затем вновь образованные «межзвездно-гелиосферные» ионы ускоряются на ударной волне и путем диффузии медленно просачиваются до орбиты Земли. Скорость проникновения вглубь Солнечной системы зависит от энергии и заряда ионов. Для «аномальных» ионов водорода и гелия, например, запаздывание относительно таких же «нормальных» ионов ГКЛ может составлять около 280-350 дней.

В связи с этим уместно отметить, что проблема формирования АКЛ тесно связана с теорией модуляции ГКЛ, рассмотрение которой выходит за рамки нашей книги. Важно,

однако, подчеркнуть, что основы теории переноса являются общими для обеих указанных проблем, равно как и для описания распространения солнечных космических лучей.

7.2. Основные понятия теории переноса

В самом общем виде движение нерелятивистской частицы с массой m и зарядом q в магнитном и электрическом полях определяется уравнением (5.1), или, что равносильно, компонентными уравнениями (5.5) и (5.6) в случае однонаправленного магнитного поля. В главе 5 мы уже видели некоторые следствия уравнения (5.5) для движения *вдоль* магнитного поля, так что теперь уместно рассмотреть движение *поперек* поля. Простейшее описание такого движения дает *теория (приближение) ведущего центра*. Основное ее допущение состоит в том, что временные и пространственные вариации электрического и магнитного полей считаются достаточно малыми по сравнению с периодом вращения и ларморовским радиусом частицы. Тогда движение частиц можно представить как возмущение относительно движения, которое совершала бы частица в случае однородных и стационарных полей.

Исходные уравнения получаются путем разложения в ряд Тэйлора векторных полей, затем члены второго и более высоких порядков отбрасываются. Такое приближение первого порядка справедливо, если гирорадиус ρ и период вращения τ_g намного меньше, чем пространственные и временные масштабы для вариаций полей. Движениями нулевого порядка для частицы являются: круговое движение вокруг силовой линии поля, электрический дрейф в скрещенных электрическом и магнитном полях $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, а также движение под действием любой из компонент поля \mathbf{E} , параллельного \mathbf{B} . Отсюда вектор положения частицы \mathbf{x} можно представить как

$$\mathbf{x} = \mathbf{r} + \mathbf{r}_g \quad (7.2)$$

где \mathbf{r} есть вектор положения ведущего центра, т.е. центра орбиты вращения, и \mathbf{r}_g есть вектор, проведенный из ведущего центра к частице. Заменяя \mathbf{x} в уравнениях движения, разлагая поля в ряды и затем, усредняя по периоду вращения, получим уравнение движения для ведущего центра частицы:

$$d^2\mathbf{r}/dt^2 = (e/m)\mathbf{E} + (e/m)d\mathbf{r}/dt \times \mathbf{B} - (\mu_m/m)\Delta\mathbf{B} \quad (7.3)$$

где $\mu_m = mv_g^2/2B$ есть *магнитный момент* (или *первый адиабатический инвариант*), а v_g — это скорость кругового вращения частицы (*гироскорость*). Величина скорости вращения и ларморовский радиус связаны соотношением $v_g = \omega\rho$, где $\omega = eB/m$ есть *ларморовская* или *гирочастота*, $2\pi/\omega = \tau_g$ — период вращения (*гиропериод*). Подробное решение уравнения (7.3) для скорости ведущего центра $d\mathbf{r}/dt$ можно найти в книге Priest and Forbes (2000). Если временные вариации пренебрежимо малы, а электрическое поле \mathbf{E} достаточно слабое, тогда единственный эффект электрического поля в уравнении (7.3) сводится к возбуждению электрического дрейфа в поле $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, который не приводит к какому-либо изменению полной энергии частицы.

Кроме концепции ведущего центра, одним из ключевых понятий теории переноса является резонансное рассеяние частиц на волновых возмущениях (неоднородностях) среды. Выражение для волнового вектора \mathbf{k} в случае резонансного рассеяния частиц имеет вид:

$$k_{res} \cong 1/\rho = ZeB/cv = B/R \quad (7.4)$$

где $\rho = v/\omega$ есть ларморовский радиус частицы с зарядом Ze , массой m и скоростью v в магнитном поле B ; $\omega = ZeB/mc$ — её ларморовская частота, $R = \rho/B = cv/Ze$ — магнитная

жесткость, а энергия и жесткость частицы связаны соотношениями (5.4). Смысл формулы (7.4) состоит в том, что рассеяние происходит наиболее эффективно (на максимальный угол) в том случае, когда ларморовский радиус частицы сравним с размером (радиусом) магнитной неоднородности (длиной волны). На рис.7.2 приведены примеры резонансного рассеяния частиц на неоднородностях межпланетного магнитного поля (ММП).

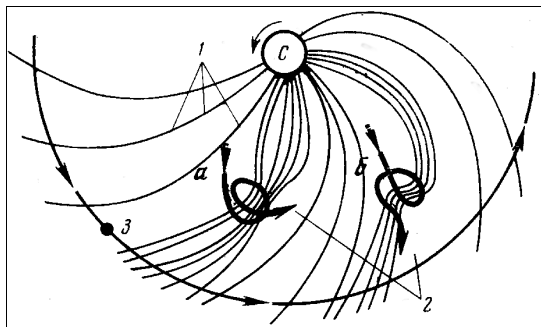


Рис.7.2. Рассеяние солнечных частиц на неоднородностях ММП двух видов: а) сгущение силовых линий; б) изгиб силовых линий с одновременным их сгущением; 1- силовые линии ММП; 2 – траектории солнечных частиц; С – Солнце; 3 – Земля.

Характер движения частиц заданной энергии в межпланетном магнитном поле существенно зависит от соотношения между их ларморовским радиусом ρ и масштабом неоднородности магнитного поля l . Поля, у которых l велико по сравнению с ρ (случай $l \ll \rho$), воздействуют на частицы адиабатически. В таких полях ведущий центр частицы в первом приближении движется вдоль силовой линии, испытывая слабый поперечный дрейф. Энергия частиц слабо изменяется за счёт электрического поля, которое в межпланетном пространстве мало по сравнению с магнитным. Изменение питч-угла частицы определяется сохранением адиабатического инварианта $p_{\perp}^2/B = \text{const}$ (p_{\perp} – поперечная составляющая импульса частицы). Движение частиц в этих условиях можно описывать в приближении ведущего центра, либо на основе точных уравнений движения.

Движение в полях с масштабом неоднородностей (флуктуаций) порядка или меньше ρ является более сложным. В межпланетном пространстве поля такого масштаба для частиц не слишком высоких энергий имеют характер случайных неоднородностей. Они приводят к быстрому и нерегулярному изменению координат и питч-угла частицы. Особый интерес представляет случай $l \sim \rho$, рассмотренный выше (резонансное рассеяние, рис.7.2). Если наряду с магнитными имеются и электрические поля (движущиеся магнитные неоднородности), то меняется также энергия частицы. Эти изменения носят характер диффузии в фазовом пространстве.

Опираясь на современные данные о характеристиках ММП, нетрудно показать, что для релятивистских частиц с $E_k > 200$ ГэВ всё межпланетное поле является совокупностью мелкомасштабных неоднородностей. В интервале энергий от сотен до нескольких ГэВ крупномасштабные структуры ММП должны рассматриваться как регулярное поле, на фоне которого существуют случайные неоднородности (флуктуации) с размерами l в несколько миллионов километров и меньше. Ларморовский радиус частиц с энергией ниже нескольких ГэВ удовлетворяет условию $\rho < l_{\text{max}}$, где l_{max} – максимальный размер неоднородностей ММП. Интенсивность рассеяния таких частиц существенно зависит от вида спектральной функции магнитных флуктуаций (4.5). При падающем спектре флуктуаций рассеивающее поле, в которое входят магнитные структуры с $l \leq \rho$, мало по сравнению с крупномасштабным полем, образованным структурами с $l > \rho$. Это приводит

к тому, что частицы рассеиваются на малый угол на каждом ларморовском обороте и становится возможным использовать теорию возмущений.

Если же главный вклад в возмущённость ММП вносят сильные МГД разрывы, особенно ударные волны и вращательные разрывы, то, по-видимому, рассеяние можно описывать с помощью модели магнитных «облаков», отклоняющих частицы на большой угол. Из сказанного ясно, что частицы СКЛ (интервал энергий от $E_k \geq 1$ МэВ до $E_k \geq 10$ –100 ГэВ) подвержены воздействию как крупномасштабных магнитных образований, так и мелкомасштабных неоднородностей ММП. Поэтому ниже мы сосредоточим внимание на теории переноса частиц, движущихся в крупномасштабном поле с мелкомасштабными неоднородностями.

7.3. Плотность энергии и перенос энергичных частиц

Как уже отмечалось, определяющее влияние на движение быстрых частиц в межпланетном пространстве оказывают электрические и магнитные поля. В этом нетрудно убедиться, оценивая воздействие различных факторов, например, на частицы солнечного происхождения. Так, гравитационная энергия протона на поверхности Солнца составляет величину около 2 кэВ; такой порядок величины имеет кинетическая энергия протонов солнечного ветра. Поскольку СКЛ имеют значительно большие энергии, то влиянием гравитационного поля на них можно пренебречь. Кулоновские столкновения быстрых частиц с межпланетной плазмой также несущественны: пробег относительно рассеяния на большой угол даже для тепловых электронов и ионов у орбиты Земли больше 1 а.е. С ростом энергии пробег возрастает пропорционально её квадрату при нерелятивистских энергиях. Ещё больше пробег ускоренных частиц относительно ядерных столкновений.

С другой стороны, пробег протонов с энергиями ~ 1 МэВ относительно столкновений с магнитными неоднородностями ММП в большинстве случаев превышает 1 а.е. и часто значительно меньше этой величины. Поэтому при рассмотрении движения энергичных частиц в гелиосфере, с её характерным размером ~ 100 а.е. (см. главу 4), можно пренебречь влиянием гравитационного поля, кулоновским и ядерным рассеянием и рассматривать только взаимодействие частиц с межпланетными магнитными полями.

Характер взаимодействия быстрых частиц с ММП существенно зависит от соотношения их плотностей энергии (7.1). Если плотность энергии частиц мала, то их обратным влиянием на межпланетную среду можно пренебречь. При этом регулярное (4.1) и случайное (4.5) поля в солнечной системе можно считать заданными. Перенос энергичных частиц в этом случае описывается линейными уравнениями. В противном случае влияние быстрых частиц (например, СКЛ) на ММП и через него – на солнечный ветер приводит к нелинейной задаче. При этом можно ожидать, что повышенные потоки солнечных протонов будут генерировать дополнительную турбулентность межпланетной среды (см. раздел 7.5).

Характерное значение плотности магнитной энергии у орбиты Земли $w_B \approx 10^{-10}$ эрг/см³, что соответствует величине $B \approx 5 \times 10^{-5}$ Гс ($1 \text{ эВ} = 1.6 \times 10^{-12}$ эрг). Для оценки плотности энергии космических частиц используем спектр протонов ГКЛ (GCR), приведенный на левой панели рис.7.1. Он достаточно типичен и характеризует постоянно существующий в межпланетном пространстве «фон» космических частиц. Оценка плотности энергии даёт $w_{GCR} \approx 10^{-16}$ эрг/см³, что значительно меньше плотности энергии ММП. Если этот спектр продолжить с тем же дифференциальным показателем $s = 3$ вплоть до $E_p = 1$ кэВ, то получим плотность энергии $w_{GCR} \approx 3 \times 10^{-12}$ эрг/см³ $\leq 2 \text{ эВ/см}^3$, что на два порядка меньше плотности энергии магнитного поля на орбите Земли. Точность этих оценок невелика, так как данные о частицах субкосмических лучей ненадёжны. Однако в целом принято считать, что в пределах нашей Галактики суммарная плотность энергии ГКЛ составляет $\sim 1 \text{ эВ/см}^3$, и эта величина сравнима с плотностью энергии электромагнитного излучения

звёзд, энергии движения межзвёздного газа и плотностью энергии его турбулентных движений, а также с плотностью энергии магнитного поля Галактики. На периферии гелиосферы плотность энергии межпланетной среды достаточно мала, так что межзвёздное магнитное поле, космические лучи, нейтральный и ионизованный газ оказывают на неё заметное влияние.

При очень мощных вспышках плотность энергии СКЛ w_p может быть сравнима с плотностью энергии ММП. Так, после известной вспышки 4 августа 1972 г. плотность энергии СКЛ у орбиты Земли достигала 6.44×10^{-9} эрг/см³ = 4×10^3 эВ/см³ (вблизи момента 22:00 UT) в интервале энергий протонов 10-60 МэВ при дифференциальном показателе их спектра $s = 2.5$. По данным измерений на КА «Прогноз-2», тепловая энергия плазмы солнечного ветра в интервале 22:00–22:40 UT флуктуировала в диапазоне 3×10^3 – 10^4 эВ/см³, а плотность кинетической энергии плазмы сохранялась почти постоянной на уровне $\sim 3 \times 10^4$ эВ/см³. Напряжённость магнитного поля к 22:40 UT достигла ~ 50 нТ = 5×10^{-4} Гс, а его плотность энергии составила $w_B \approx 10^{-8}$ эрг/см³. Если спектр протонов имел тот же показатель 2.5 до энергий $E_p = 5$ МэВ, то получим плотность их энергии $w_p \approx 2 \times 10^{-8}$ эрг/см³. При всей неопределённости и ограниченности этих оценок, из их сравнения видно, что в отдельные периоды плотность энергии ускоренных солнечных частиц могла превышать плотность энергии ММП. Наконец, при взаимодействии сильных МГД волн с быстрыми частицами влияние последних на структуру фронта также может быть значительным.

7.4. Теория переноса солнечных космических лучей

Изложенное выше не оставляет сомнений в том, что траектория отдельной частицы в межпланетном пространстве не может быть вычислена из-за случайного характера мелкомасштабного магнитного поля. Описание движения частиц должно носить вероятностный характер: систему частиц удобно описывать функциями распределения $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$, удовлетворяющими кинетическим уравнениям. Кинетические уравнения, однако, сложны, и их решения удастся получить в аналитической форме только для некоторых простых случаев. Вместе с тем, для широкого класса задач оказывается возможным упростить эти уравнения.

Если размеры системы достаточно велики и частицы успевают сильно рассеяться, так что распределение их по направлениям становится близким к изотропному, то можно использовать диффузионное приближение. Оно получается, если разложить функцию распределения $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ в ряд по сферическим гармоникам от углов вектора \mathbf{p} и ограничиться двумя первыми членами разложения (Долгинов и Топтыгин, 1966):

$$f(r, p, t) = \frac{1}{4\pi} [n(r, p, t) + \frac{3}{v^2} vJ(r, p, t)] \quad (7.6)$$

Здесь $n(r, p, t)$ – концентрация (плотность), а $J(r, p, t)$ – плотность потока (интенсивность) частиц с заданным значением абсолютной величины импульса. Уравнение переноса для плотности частиц n имеет вид (Топтыгин, 1983):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla_\alpha \kappa_{\alpha\beta} \nabla_\beta n - \mathbf{u} \cdot \nabla n + \frac{p}{3} \frac{\partial n}{\partial p} \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (7.7)$$

Первый член в правой части описывает диффузию частиц (κ – коэффициент диффузии в координатном пространстве) в анизотропной среде (индексы α и β), второй член – их конвекцию из-за движения рассеивающих центров (магнитных неоднородностей) со скоростью \mathbf{u} . Последнее слагаемое ответственно за изменение энергии частиц,

взаимодействующих с движущейся средой. Уравнение переноса, эквивалентное (7.7), можно записать в другой форме, если вместо плотности частиц в фазовом пространстве ввести их плотность на единичный интервал кинетической энергии E . Тогда получим:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla_{\alpha} \kappa_{\alpha\beta} \nabla_{\beta} n - \nabla \bullet (un) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial E} (aEn) \nabla \bullet u \quad (7.8)$$

При распространении частиц в стационарном неоднородном магнитном поле (каковым можно считать ММП) кинетическое уравнение принимает вид (Топтыгин, 1983):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cos \theta \frac{\partial f}{\partial z} + \frac{v}{2B} \frac{\partial B}{\partial z} \sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} - \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} b_s(z, \theta) \sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} - \kappa_{\perp}(z, v) \left\{ \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right\} = \delta(z - z_0) \delta(x) \delta(y) S(t) Q(\theta) \quad (7.9)$$

Здесь f есть функция распределения, усреднённая по возможным реализациям магнитного поля (необходимость усреднения вызвана тем, что функция распределения быстро осциллирует в пространстве и времени). Правая часть уравнения (7.9) содержит источник ускоренных частиц: функция $S(t)$ описывает временную зависимость источника, а $Q(\theta)$ – временную. Координата z должна отсчитываться вдоль силовой линии регулярного магнитного поля (т.е. вдоль архимедовой спирали), b_s – это коэффициент диффузии по питч-углу θ , а κ – поперечный коэффициент диффузии. Уравнение (7.9) содержит также слагаемое $(v/2B)(\partial B/\partial z) \sin \theta (\partial f/\partial \theta)$, учитывающее фокусирующее действие убывающего магнитного поля (уменьшение питч-угла частицы при удалении от Солнца). Этот эффект важен, в частности, для анализа времён прихода к Земле первых частиц СКЛ. При этом длина фокусировки L характеризует пространственные вариации среднего (сглаженного) магнитного поля. На длине L модуль ММП B уменьшается в e раз:

$$(1/L) = (-1/B)(\partial B/\partial z) \quad (7.10)$$

Эффективность рассеяния можно охарактеризовать коэффициентом диффузии κ в координатном пространстве. В этом контексте следует отметить, что явление диффузии, которое занимает центральное место в проблеме переноса частиц, было сначала открыто эвристически в середине 1950-ых годов в результате анализа ряда больших событий СКЛ. Лишь в середине 1960-ых годов уравнение диффузии было выведено теоретически из уравнения движения частиц в неоднородном магнитном поле (см., например, Топтыгин, 1983). Спустя еще около 10 лет было показано, что диффузионные решения являются решениями низшего порядка общего кинетического уравнения переноса частиц в приближении Фоккера-Планка. Если принимать во внимание решения более высоких порядков, то становятся существенными ряд не-диффузионных эффектов (когерентное распространение, дисперсия частиц по скоростям, экспоненциальный спад интенсивности частиц при фокусированной диффузии и др.).

Если рассматривать межпланетную среду как однородную и рассеивающую частицы СКЛ с транспортным пробегом L , а Солнце – как мгновенный точечный источник N ускоренных частиц с мощностью $f(t)$, то концентрация частиц $n(r, t)$ на расстоянии r от Солнца определится уравнением:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \kappa(E) \Delta n + f(t) \quad (7.11)$$

где $\kappa(E) = (1/3)vA(E)$ – это коэффициент диффузии для частиц со скоростью v и энергией E . При $f(E, t) = N(E)\delta(t)$ получим простейшее решение уравнения диффузии:

$$n(r, t, E) = \frac{N(E)}{8[\pi\kappa(E)t]^{3/2}} \exp[-r^2/4\kappa(E)t] \quad (7.12)$$

Из формулы (7.12) можно видеть, что временной профиль интенсивности СКЛ на орбите Земли имеет вид диффузионной «волны», несимметричной относительно t , с максимумом при $t_{\max} = r^2/6\kappa = r^2/2v\Lambda$. Из-за экспоненциального множителя в (7.12), концентрация частиц быстро уменьшается с расстоянием и сложным образом зависит от времени. При $t \geq r^2/4\kappa$ экспоненциальный множитель в (7.12) не играет особой роли, а концентрация частиц начинает падать приблизительно по закону $n \sim t^{-3/2}$ (см. рис.7.3). Такой временной ход и является самым существенным признаком реализации трёхмерной диффузии в изотропной неограниченной среде.

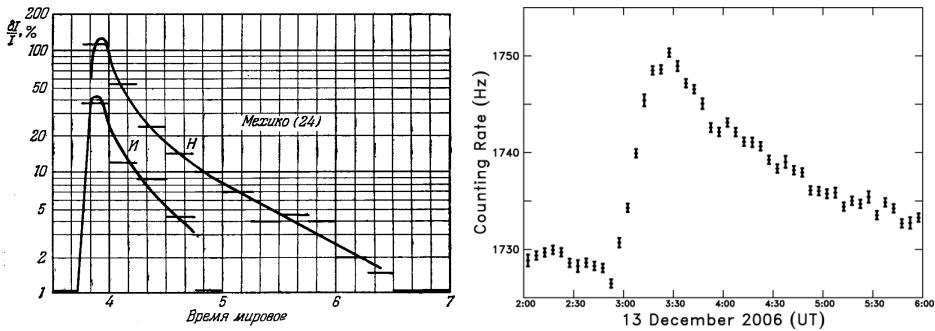


Рис.7.3. Временные профили интенсивности релятивистских СКЛ (протонов) по наблюдениям на поверхности Земли: Слева – 15-мин. данные наблюдений на станции Мехико 23 февраля 1956 г. (И – ионизационная камера, Н – нейтронный монитор); справа – 5-мин. данные мюонного детектора IceTop на станции Южный Полус 13 декабря 2006 г.

Реальная картина переноса быстрых заряженных частиц в межпланетном пространстве может сильно отличаться от идеализированного диффузионного приближения. Тем не менее, простейшая модель диффузии уже к середине 1960-ых годов позволила выявить такую важную особенность, как зависимость транспортного пробега от энергии частиц. Были получены первые оценки числа ускоренных протонов N в источнике, энергетический спектр, возможная длительность их генерации и ряд других ключевых характеристик СКЛ. Как выяснилось впоследствии, при более углублённом анализе необходимо учитывать также конвекцию, фокусировку и адиабатическое изменение энергии быстрых частиц. Эти не-диффузионные эффекты требуют уже кинетического подхода, который успешно реализуется в настоящее время не только в релятивистской области, но и в диапазоне умеренных и малых энергий (вплоть до $E_p \sim 1$ МэВ).

7.5. Ударные волны и перенос солнечных частиц

Как уже было отмечено в разделе 5.7, энергичные солнечные частицы могут иметь разные источники на Солнце или вблизи него, причем их абсолютные потоки, временные профили интенсивности, спектры и угловые характеристики будут меняться от события к событию. Отчасти эти вариации будут определяться взаимным расположением источника частиц и точки наблюдения. Если источником является ударная волна, связанная с СМЕ, то на орбите Земли будет наблюдаться отчётливая асимметрия в форме временных профилей (рис.7.5), в зависимости от того, находится ли источник на западной или восточной гелиодолготе по отношению к СМЕ и ударной волне. Такая картина была

получена по данным, накопленным примерно за 20 лет наблюдений для 235 протонных событий с интенсивностью выше 10^{-2} (см² ср с МэВ)⁻¹ в диапазоне энергий 1-23 МэВ (для протонов).

Предположим, что наблюдатель видит СМЕ от западного источника (W53°). В этот момент точка наблюдения хорошо связана с носовой частью ударной волны, которая пока находится вблизи Солнца. К моменту, когда ударная волна достигнет орбиты Земли (1.0 а.е.), наблюдатель окажется на 53° от её носовой части по направлению к восточному флангу волны. В результате он попадает на силовые трубки, которые со временем оказываются связанными с более слабым источником частиц, так что их интенсивность неуклонно уменьшается. Это уменьшение неизбежно вытекает из самой геометрии процесса, даже если скорость и степень сжатия всех частей ударной волны не меняются со временем. Точка магнитного соединения наблюдателя с фронтом волны при этом смещается в восточном направлении.

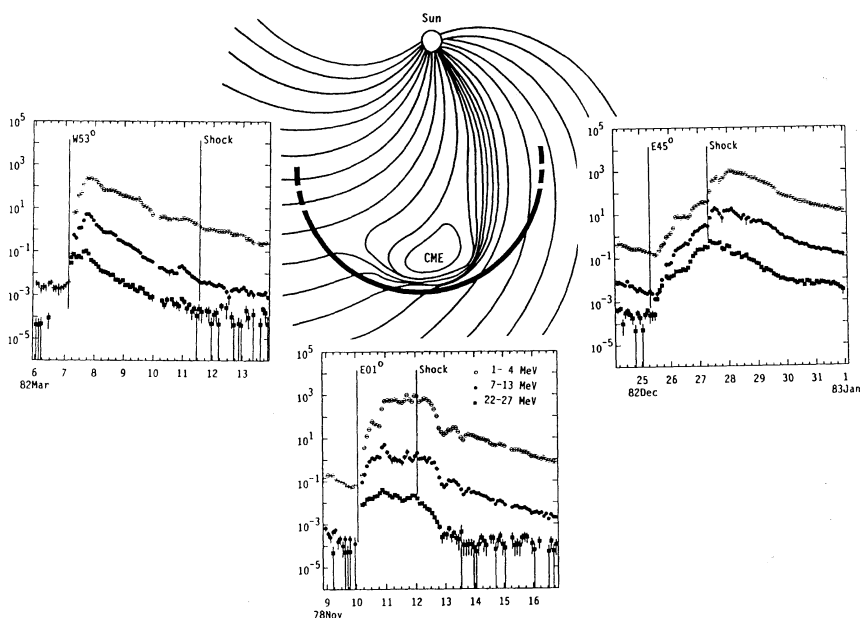


Рис.7.4. Типичные временные профили интенсивности энергичных солнечных частиц на орбите Земли для трёх протонных событий, наблюдаемых на различных гелиодолготах по отношению к положению СМЕ и ударной волны (Reames, 1995). Видна асимметрия профилей в зависимости от положения источника: слева – западная долгота W53°, справа – восточная долгота E45°, в центре рисунка – источник расположен на долготе E01° (вблизи центра солнечного диска).

Наблюдатель вблизи центра (E01°) может видеть медленную начальную фазу события, поскольку в этот период он связан с западным флангом волны. Однако, если СМЕ имеет большую протяжённость по долготе, то в точке наблюдения будет виден плоский временной профиль, соответствующий почти постоянному ускорению. Непосредственно за фронтом интенсивности падают на порядок величины или более по мере того, как наблюдатель погружается в собственно СМЕ, где многие силовые линии все ещё могут оставаться связанными с Солнцем обоими своими концами.

Наконец, рассмотрим случай, когда наблюдатель находится на западном фланге волны (E45°). В этом случае интенсивности могут начать медленный рост по мере того, как волна приближается к основанию силовой линии наблюдателя в короне, далеко к западу от источника частиц. Интенсивности нарастают по мере того, как точка соединения

смещается к востоку по направлению к носу волны. Однако, пиковые интенсивности будут достигнуты только после того, как наблюдатель пересечёт фронт, в 45° к западу от носа волны, и когда он, в конечном счёте, окажется на силовых линиях, которые свяжут его с носом ударного фронта *сзади*. Разумеется, и СМЕ, и фронт волны могут иметь нерегулярные искажения формы. Однако, представляется достаточно очевидным, что наиболее эффективно частицы будут ускоряться вблизи центральной («носовой») части волны, где она является наиболее сильной, а скорость, скорее всего, наибольшей.

7.6. Энергичные частицы и генерация волн в межпланетной плазме

Как показано выше (раздел 7.3), в некоторых протонных событиях плотность энергии СКЛ на орбите Земли может быть сравнима или даже превышать плотность энергии ММП. В таких случаях, в соответствии с формулой (7.1), необходимо уже учитывать коллективное взаимодействие ансамбля энергичных частиц с окружающим магнитным полем. Эти обстоятельства послужили основанием для гипотезы о том, что большие потоки солнечных протонов могут порождать в межпланетной среде дополнительные возмущения (т.е. свою собственную турбулентность, например, альфвеновские волны). Такие возмущения называют самогенерирующимися волнами (СГВ или **SGW – self-generating waves**).

Поскольку взаимодействие «волна-частица» считается причиной рассеяния частиц, то вновь образованные волны, в свою очередь, будут изменять условия переноса солнечных частиц. Важным следствием этого факта, с теоретической точки зрения, может оказаться зависимость транспортного пробега СКЛ от времени. Далее, будут претерпевать значительные изменения коэффициент питч-угловой диффузии, а также временные профили интенсивности и анизотропии солнечных протонов. Тем самым, в принципе возникает возможность в самих данных наблюдений найти признаки влияния СГВ. Временные профили протонных событий, однако, подвержены воздействию многих других факторов (например, длительность испускания и фокусировка ускоренных частиц, адиабатические изменения их энергии в межпланетной среде, зависимость коэффициента диффузии от энергии частиц и расстояния до Солнца и т.п.). Потому выделить вклад СГВ на этом фоне представляется крайне сложной задачей.

Другой путь подтвердить генерацию дополнительной турбулентности – это прямой поиск СГВ по данным о флуктуациях параметров межпланетной плазмы. Из формулы (7.12) вытекает, что поиски волн, генерируемых ускоренными протонами, следует вести поближе к Солнцу, где их поток должен быть максимальным. Попытки найти СГВ во время протонных событий предпринимались рядом исследователей, в частности, по данным наблюдений на КА *Helios 1* и *Helios 2* в интервале расстояний от Солнца ~ 0.31 – 0.93 а.е. Однозначных результатов, однако, при этом не было получено. Возможно, на указанных расстояниях эффект генерации СГВ маскируется другими явлениями и факторами межпланетной среды. Например, осталось неясным, как сказывается на предполагаемом эффекте зависимость модуля ММП (4.1) от расстояния до Солнца. Кроме того, следует отметить, что исследованные случаи не принадлежали к наиболее мощным протонным событиям.

Между тем, если генерация СГВ имеет место, то должен существовать ещё один вполне наблюдаемый эффект, а именно – самоограничение, или самонасыщение потока СКЛ (**streaming-limited saturation**) за счёт дополнительного рассеяния протонов на волнах альфвеновского типа. Видимым проявлением этого эффекта будет плато в области максимума временного профиля. На рис.7.5 приведены профили интенсивности протонов с энергиями 8.7-14.5 МэВ, 39-82 МэВ и 110-500 МэВ по данным наблюдений на КА *GOES* в 1989-1992 гг. для шести больших протонных событий. Пунктирными горизонтальными линиями показаны ожидаемые предельные значения интенсивности самонасыщения.

Данные для первых двух интервалов энергии свидетельствуют о том, что указанные события практически достигают номинальных пределов насыщения. Для интервала 110-500 МэВ предельные значения интенсивности были достигнуты (или превышены) только в четырёх событиях сентября-октября 1989 г. При этом профили для события 19-22 октября 1989 г. оказались весьма схожими при всех энергиях, даже в области > 100 МэВ.

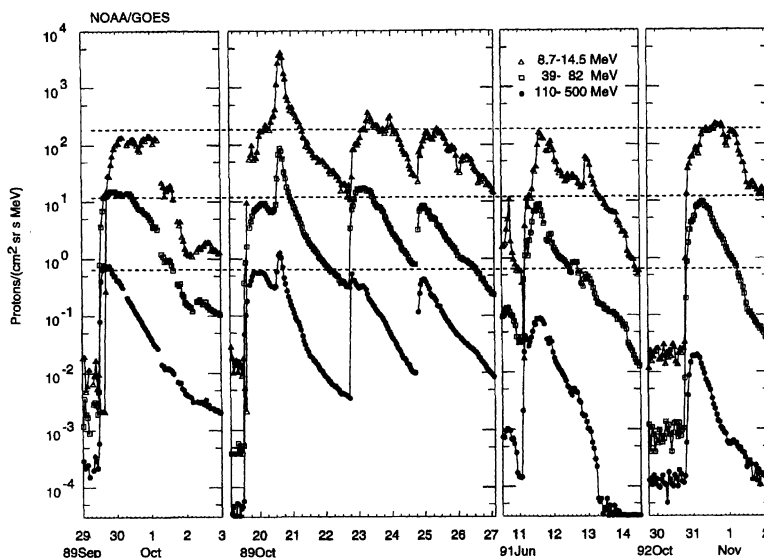


Рис.7.5. Временные профили интенсивности протонов для шести больших СПС (сентябрь-октябрь 1989 г., июнь 1991 г. и октябрь-ноябрь 1992 гг.) по измерениям на борту КА GOES в 1989-1992 гг. (Reames and Ng, 1998). Пунктирными линиями показаны предельные потоковые интенсивности в трёх энергетических каналах от 8.7 до 500 МэВ.

Такое поведение интенсивности может указывать на связь эффекта самоограничения с ускорением частиц на ударных волнах, генерируемых СМЕ. При увеличении скорости ударной волны частицы высокой энергии начинают вести себя подобно частицам меньших энергий. Важно отметить, что понятие ограничения (насыщения) потока неприменимо к интенсивности частиц вблизи самого ударного фронта. Ударная волна является источником ускоренных частиц, которые затем должны двигаться вдоль силовых линий ММП и, при достаточной интенсивности - дополнительно турбулизовать межпланетную плазму, тем самым создавая предпосылки для возникновения эффекта самоограничения потока.

7.7. Перенос частиц в крупномасштабных магнитных структурах

В отличие от ближайших окрестностей Солнца, на расстояниях ~ 1 а.е. (во внутренней гелиосфере) ценная информация о физике и динамике гелиосферной плазмы может быть получена из изучения так называемых Форбуш-понижений интенсивности ГКЛ, свойств СМЕ и распространения СКЛ в межпланетном магнитном поле. Представляет также большой интерес возможное ускорение частиц на неоднородностях межпланетной плазмы (плазменной турбулентности) и ударных волнах, особенно в случае так называемых «супер-событий» с огромными потоками ускоренных частиц. Иногда их называют «анормальными» протонными событиями, по аналогии с уединёнными океанскими волнами-«отшельниками», которые образуются крайне редко, но имеют гигантские

амплитуды (десятки метров). Описание таких событий на основе строгой теории переноса частиц становится невозможным, так что единственным методом их исследования становится численное моделирование.

Протонные супер-события в межпланетном пространстве оказываются обычно связанными с выбросами корональной массы и несколькими ударными фронтами. В частности, в августе 1972 г. на орбите Земли наблюдались две сходящиеся ударные волны, которые сопровождалась очень интенсивным и длительным возрастанием потока энергичных частиц. Для объяснения этого необычного явления был предложен механизм Ферми первого порядка для ускорения частиц между сходящимися межпланетными ударными волнами. Оценки показали, что такой механизм обладает достаточным темпом и высокой эффективностью ускорения. Впоследствии были идентифицированы другие аналогичные периоды с очень большой интенсивностью частиц, когда наблюдались множественные ударные волны, порождёнными выбросами корональной массы, а также другие протонные события с высокой интенсивностью частиц между парами ударных волн. Хорошо известны супер-события, которые наблюдались вблизи Земли 14 июля 1959 г., 4 августа 1972 г., 19 октября 1989 г. и 14 июля 2000 г. Уединённые протонные события были зафиксированы во внутренней гелиосфере и на других расстояниях от Солнца: 4 ноября 1980 г. на космическом аппарате *Helios 1* (0.5 а.е.) и в марте 1991 г. на КА *Ulysses* (2.5 а.е.).

Эти необычные протонные события не могут быть результатом простого сжатия среды между двумя сходящимися ударными волнами: хотя расстояние между сходящимися волнами будет уменьшаться $\sim r$ по мере движения волн от Солнца, поперечное сечение потоковой трубки будет увеличиваться как $\sim r^2$, что приведёт, в конечном счёте, к увеличению объёма между волнами. На рис.7.6 показаны возможные геометрические конфигурации для пар ударных волн и ММП.

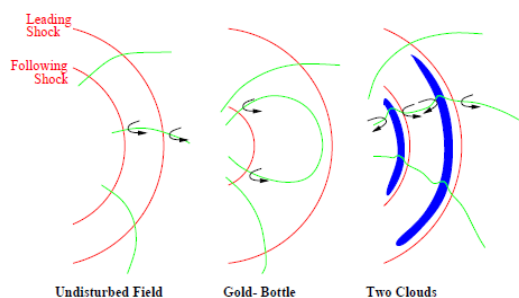


Рис.7.6. Возможные магнитные конфигурации для ускорения энергичных частиц в межпланетной среде между двумя сходящимися ударными волнами, генерированными Солнцем (Kallenrode and Cliver, 2001).

Слева на рис.7.6 показан простейший случай: две сходящиеся волны и номинальная Архимедова спираль ММП (Солнце находится слева). Частицы, приходящие к волне из области вверх по потоку солнечного ветра, частично отражаются, поскольку сжатие магнитного поля перпендикулярно ударному фронту создаёт магнитное «зеркало». Поэтому частицы могут быть «выметены» волной. Однако, невозможно представить себе отражение частиц, приближающихся к фронту из области вниз по потоку, поскольку далее они подвергаются воздействию расходящегося поля. Таким образом, хотя ударные волны будут «сгребать» частицы, никакого их накопления в объёме между фронтами происходить не будет, т.е. ускорение Ферми первого порядка не реализуется.

Чтобы избежать этой проблемы, была предложен механизм, связанный с магнитной «бутылкой Голда» (средняя часть рис.7.6): большая магнитная петля вытягивается перед

фронтом, и некоторые частицы, находящиеся в среде вверх по течению, имеют шанс (в зависимости от их питч-углов) отражаться вперед и назад вдоль силовой линии. По мере расширения волны длина силовой линии в области выше по течению уменьшается, и частицы ускоряются в процессе Ферми первого порядка. Хотя иногда, действительно, наблюдались большие петли, простирающиеся за пределы 1 а.е., эта конфигурация, по-видимому, не является единственно возможной для объяснения супер-событий, в особенности после того, как типичное супер-событие наблюдалось на КА *Ulysses* на расстоянии 2.5 а.е. от Солнца.

Численное моделирование (симуляция) процессов, касающихся проблемы разделения двух популяций частиц в областях вверх и вниз по течению в магнитном облаке, представляет собой трудную задачу. Однако, после анализа всех особенностей супер-событий можно предложить сценарий, изображённый в правой части рис.7.6. В этом сценарии частицы многократно отражаются между отстающей волной (частицы с малыми питч-углами, проходящие фронт вблизи облака) и магнитным облаком позади ведущего ударного фронта. Соответствующая численная модель (Kallenrode and Cliver, 2001) для заданной магнитной конфигурации позволяет симулировать эффект пары СМЕ/фронт на две популяции частиц. Результаты такого моделирования позволяют сделать несколько важных выводов: (1) магнитное облако, следующее за ведущим фронтом, крайне важно для создания высокой интенсивности частиц; (2) ударные фронты должны сходиться (сближаться) для того, чтобы создать увеличение интенсивности; (3) необходимо присутствие замыкающего облака, чтобы понизить интенсивность частиц после прохождения пары ударных волн.

7.8. Солнечные частицы на больших расстояниях от Солнца

Как следует из раздела 5.7, ускорение солнечных частиц на ударных волнах в межпланетном пространстве сильно усложняет интерпретацию протонных событий в рамках строгой теории переноса частиц, изложенной выше. Действительно, в отличие от идеализированного случая с точечным мгновенным источником на Солнце (7.11), при наличии ударной волны источник ускоренных частиц становится распределённым вдоль ударного фронта (см. рис.5.8). Кроме того, его мощность меняется с течением времени. Особенно трудно предсказывать поведение потоков частиц с энергиями $\sim 10\text{--}30$ МэВ на значительных расстояниях от Солнца (за пределами земной орбиты). Ниже мы кратко рассмотрим радиальную зависимость потоков СКЛ и их связь с положением источника на Солнце и спиральной структурой ММП.

При экстраполяции потоков протонов на другие гелиоцентрические расстояния r исходят из предположения, что диффузией поперёк ММП можно пренебречь. В то же время объём силовой магнитной трубки при удалении от Солнца уменьшается по законам классической геометрии. В данном случае для экстраполяции можно использовать степенную функцию вида $\sim r^{-3}$. Оценки, основанные на учете поперечной диффузии, дают зависимость $\sim r^{-3.3}$. Аналогичный радиальный градиент для потоков солнечных протонов получается из сравнения данных КА *Voyager* и околоземных спутников. Имеющиеся данные о радиальном градиенте довольно ограничены, однако в целом можно принять, что за пределами орбиты Земли (при $r \geq 1$ а.е.) интенсивность солнечных протонов меняется по степенному закону от $\sim r^{-3}$ до $\sim r^{-4}$. Для расстояний $r < 1$ а.е., соответственно, можно принять градиент в пределах от $\sim r^{-3}$ до $\sim r^{-2}$.

С точки зрения космической погоды, временные профили потоков протонов с $E_k \sim 10\text{--}30$ МэВ, к сожалению, часто искажаются за счёт многих факторов, особенно из-за влияния межпланетных ударных волн. В частности, область захвата частиц вокруг ударного фронта может оказаться областью наибольшей интенсивности ускоренных частиц, если ускорение на ударной волне продолжается при ее удалении от Солнца. Если же волна затухает с расстоянием, то этого эффекта ожидать не следует. Кроме того, на расстояниях

> 1а.е. может происходить взаимодействие или слияние различных «переходных» волн, и начинают играть роль коротящие ударные волны, которые доускоряют некоторые солнечные частицы, оставшиеся от переходных волн.

Обычно для простоты предполагают, что максимально возможный поток солнечных протонов должен наблюдаться в точке, которая «хорошо связана» магнитной силовой линией ММП с местоположением источника частиц на диске Солнца. Иными словами, энергичные солнечные частицы в определённой точке наблюдения на расстоянии r от Солнца будут иметь максимальную интенсивность тогда, когда их источник будет расположен на западной гелиодолготе

$$\Phi = \Omega r / u = 51.4r \tag{7.13}$$

Здесь средняя скорость солнечного ветра u принята равной 450 км/с, скорость углового вращения Солнца $\Omega = 360/27$ °/сутки, а гелиодолгота Φ выражена в градусах. Чтобы достичь точки наблюдения, частицы должны пройти расстояние L

$$L = \int \sqrt{(1 + r^2 \Omega^2) / u^2} \, dr \tag{7.14}$$

При указанных выше значениях u и Ω получим $L = 1.32$ а.е. для орбиты Земли. Если наблюдатель (космический аппарат) находится у Земли, то наиболее благоприятно расположенный источник будет иметь гелиодолготу соединения $\Phi = 51^\circ$ к западу от линии «Солнце-Земля». При радиальном удалении от орбиты Земли угол закрученности архимедовой спирали ММП будет увеличиваться. Поэтому в других точках наблюдения (например, на орбите Марса) область благоприятных долгот будет располагаться уже вблизи $\Phi = 78^\circ$ и т.д. При полётах КА к другим планетам (Венера, Юпитер и т.д.) соответствующие значения L и Φ будут сильно отличаться (Таблица 7.1). В Таблице 7.1 приведены также отношение величины ММП в точке наблюдения B к его величине на орбите Земли B_0 и время T (в минутах), за которое протоны с энергией 100 МэВ, двигаясь с пичч-углами $\theta \approx 0^\circ$ вдоль силовых линий ММП, достигнут расстояния r (а.е.) от Солнца.

Таблица 7.1. Параметры соединения некоторых планет с Солнцем (Kahler, 2001)

Планета	r (а.е.)	Φ (°)	L (а.е.)	T (мин)	B/B_0
Венера	0.72	37	0.77	15	1.69
Земля	1.00	51	1.32	26	1.00
Марс	1.52	78	1.91	37	0.55
Астероиды	2.77	142	4.63	90	0.264
Юпитер	5.20	268	13.67	265	0.134

Когда межпланетный корабль с космонавтами (астронавтами) удаляется от орбиты Земли в сторону внешних планет, то долгота магнитного соединения на диске Солнца перемещается к западу. Но даже для марсианского наблюдателя область соединения всё ещё остаётся на видимой части диска вблизи западного лимба, т.е. имеется аналогия с ситуацией для земного наблюдателя. Однако уже в поясе астероидов и далее единственным признаком взрывных процессов на Солнце для наблюдателя на борту КА будут только мощные СМЕ за западным лимбом, тогда как на видимом диске проявления солнечной активности могут полностью отсутствовать. За орбитой Марса также существенно увеличиваются длина проходного пути L и время движения частиц T за счёт закручивания силовых линий ММП преимущественно в азимутальном направлении.

Рассеяние солнечных частиц на магнитных неоднородностях ММП приводит к значительному уменьшению их максимальной интенсивности при удалении от Солнца. Дополнительное уменьшение интенсивности происходит за счёт расходимости силовых

линий ММП. Для популяции частиц, ограниченных трубкой силовых линий с магнитным потоком $B \times A$ (где B – напряжённость магнитного поля, A – площадь поперечного сечения трубки), уменьшение интенсивности частиц с расстоянием должно следовать закону изменения B . Эмпирически установлено, что вблизи Солнца величина B изменяется приблизительно как r^{-2} , а на расстояниях порядка нескольких астрономических единиц эта зависимость близка к r^{-1} . Именно с учётом такой радиальной зависимости ММП были вычислены отношения B/B_0 (см. последнюю колонку Таблицы 7.1). На расстоянии орбиты Юпитера, например, интенсивность протонов с энергией 100 МэВ должна уменьшаться в 7-8 раз по сравнению с их интенсивностью вблизи орбиты Земли.

Как уже упоминалось в разделе 2.6, для всестороннего изучения Солнца, планет, межпланетной среды и гелиосферы в целом практическая космонавтика широко использует гравитационные маневры КА в поле тяжести различных планет солнечной системы. Такие маневры планируют применить, в частности, при осуществлении первого пилотируемого полёта к Марсу (возможно, уже в следующем десятилетии). Поскольку радиальное расстояние до Марса составляет ~ 1.5 а.е., то поток солнечных частиц вблизи его орбиты будет составлять примерно 1/3 от их потока вблизи Земли. Отсюда может возникнуть впечатление, что проблема прогнозирования радиационной опасности для орбиты Марса не намного отличается от похожей проблемы для орбиты Земли. Однако следует иметь в виду, что полноценная экспедиция на Марс будет длиться более двух лет (полет туда и обратно). Всё это время межпланетный корабль будет двигаться по сложной, извилистой траектории, маневрируя между Венерой, Землёй и Марсом, пересекая различные силовые трубки ММП, и попадая, соответственно, в различные радиационные условия. При этом вероятность «сюрприза» (т.е. появления СПС в отсутствие видимой активности на диске Солнца) на орбите Марса будет существенно больше, чем на орбите Земли.

Наблюдения на орбите Земли показывают, что около 20% всех регистрируемых СПС не связаны визуально с наблюдаемыми солнечными вспышками. Это наводит на мысль, что происхождение многих СПС, не имеющих источников-вспышек на видимой части диска, связано с залимбовой активностью Солнца. Для иллюстрации эффекта на рис.7.7 приведено гелиодолготное распределение 48 так называемых GLEs (or Ground Level Enhancements), наблюдавшихся на поверхности Земли в 1956-1991 гг.

Из 48 событий с релятивистскими протонами 10 СПС (GLE) имели своим источником, по-видимому, вспышки за западным лимбом Солнца. Если рассмотреть весь ряд GLE (70 событий за период 1942-2006 гг.), то таких залимбовых источников окажется не менее 12. Примерно такой же вид имеет распределение не-релятивистских СПС.

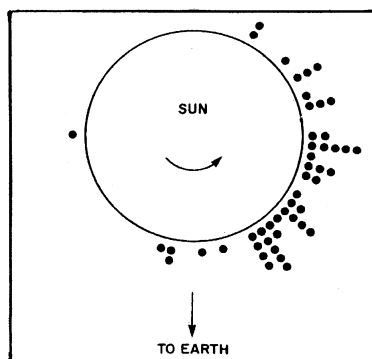


Рис.7.7. Долготное распределение возможных источников СКЛ по диску Солнца для 48 событий типа GLE по наземным наблюдениям за период 1956-1991 гг. (Shea and Smart, 1993).

Имеются, однако, сведения о том, что источники СПС от ударных волн распределены по-другому, с максимумом распределения на гелиодолготе около 30°W . По аналогии с этим, следует ожидать, что на орбите Марса около половины детектируемых событий будут связаны с источниками на невидимой стороне Солнца. Оценим область «благоприятных гелиодолгот» для Марса. При удалении Марса на 1.5 а.е. от Солнца время перемещения солнечного ветра со скоростью 400 км/с составит около 6 земных суток. За это время Солнце повернётся к западу на $\sim 86^{\circ}$, что по существу соответствует западному лимбу Солнца, если смотреть с Марса. Принимая, что распределение солнечных протонных вспышек является симметричным по гелиодолготе, можно заключить, что примерно половина вспышек-источников СПС будет невидимой для марсианского наблюдателя. Это обстоятельство требует принимать специальные меры для мониторинга и прогнозирования радиационной обстановки вдоль траектории межпланетного корабля (см. раздел 11.3).

8. ЭНЕРГИЧНЫЕ ЧАСТИЦЫ В ГЕОСФЕРЕ

*Gutta cavat lapidem - Капля точит камень.
P. Ovidius Naso*

Как известно, ионосфера и нейтральная атмосфера Земли подвергается постоянному воздействию энергичных заряженных частиц внеземного происхождения, прежде всего – галактических космических лучей, а временами – и частиц, ускоренных на Солнце. Кроме того, в магнитосфере Земли всегда присутствуют частицы радиационных поясов (РПЗ). Это корпускулярное окружение Земли, наряду с электромагнитным излучением Солнца, играет огромную роль в физике околоземного пространства и в солнечно-земных связях в целом. Ниже коротко рассматриваются некоторые эффекты, обусловленные воздействием энергичных частиц на различные слои ионосферы и атмосферы.

В последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в понимании геофизических эффектов космических лучей, особенно солнечного происхождения, так что для иллюстрации этих эффектов, как и в предыдущей главе, мы снова обратимся к СКЛ. Их воздействие приводит к таким явлениям, как поглощение коротких радиоволн в ионосфере (эффект РСА в полярных шапках Земли), опустошение озонового слоя (O_3), усиление проводимости в глобальной электрической цепи (ГЭЦ) атмосферы. При этом наблюдаются также изменения параметров шумановских резонансов в волноводе «Земля-ионосфера» и ухудшение прозрачности атмосферы. Кроме того, на высотах стратосферы, и особенно в нижней атмосфере (тропосфере), идут процессы генерации некоторых космогенных изотопов-радионуклидов (радиоуглерода ^{14}C и радиоактивных изотопов ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl). Здесь же образуются многочисленные соединения азота, в том числе нитраты NO_x (т.е. окись и двуокись азота - NO и NO_2 , соответственно). Нельзя исключить также, что прямо или косвенно (через глобальную электрическую цепь, ГЭЦ) СКЛ могут влиять на динамику чисто тропосферных (метеорологических) явлений (например, завихрённость атмосферы и т.п.).

8.1. Атмосфера Земли и космические лучи

Космические лучи (в основном ГКЛ) занимают огромный диапазон энергий, охватывающий 15 порядков величины (от $\sim 10^6$ до $\sim 10^{21}$ эВ). Солнце также является источником космических лучей, причём потоки СКЛ после мощных солнечных вспышек могут достигать очень больших значений. Однако характерная величина их энергии обычно не превосходит 10^9 - 10^{10} эВ. Поэтому разделение космических лучей на галактические и солнечные отражает существо дела, поскольку как характеристики, так и источники СКЛ и ГКЛ, совершенно различны.

Воздействие космических лучей частиц на околоземное пространство происходит по двум основным каналам: ионизация ионосферы-атмосферы и ядерные взаимодействия с веществом нижней атмосферы (тропосферы), - в основном, с атомами азота и кислорода, которые являются основными составляющими атмосферы Земли. Оба эти процесса сильно зависят, прежде всего, от энергии первичных космических частиц, а также от плотности газа в различных слоях атмосферы, т.е. от высоты взаимодействия. Например, несколько десятилетий назад был открыт и хорошо изучен эффект поглощения радиоволн на частотах ~ 30 МГц в полярных шапках Земли (РСА). Эффект РСА полностью обусловлен дополнительной ионизацией атмосферы на высотах 30-110 км во время вторжения солнечных протонов с энергиями 10-30 МэВ. Аналогично, процесс ионизации является причиной массового образования ионов окиси азота NO , а также окислов NO_2 ,

NO_3 , N_2O_5 , HNO_3 на высотах примерно 15 км и выше (рис.8.1). При этом, в случае прихода СКЛ, основное вторжение солнечных протонов с энергиями меньше 100 МэВ происходит на высоких широтах (в пределах авроральной зоны).

В отличие от этого, генерация космогенных изотопов, например, связана с ядерными взаимодействиями первичных космических лучей в атмосфере ниже уровня 30 км. При этом в атмосфере рождаются каскады большого числа различных вторичных частиц (рис.8.2). Вторичные частицы затем поглощаются с ростом плотности атмосферы, часть из них достигает поверхности Земли, а наиболее энергичные (например, мюоны) могут проникать на значительные глубины (до нескольких километров).

Для понимания особенностей воздействия ионизирующей радиации на атмосферу важно отметить, что современная атмосфера состоит, в основном, из азота (78-79%) и кислорода (20-21%). Эти газы, как известно, отличаются высокой химической активностью, чем и объясняется их исключительная роль в физике атмосферы (см., например, раздел 8.4). Другие газы составляют не более 1%. Первоначальная атмосфера Земли, по-видимому, была похожа по составу на протопланетную туманность и близка к современным газовым атмосферам планет-гигантов. Затем она была утеряна и заменена на газы, выделившиеся из земной коры. Не исключено, что на формирование современной атмосферы значительное влияние оказали кометы, планетезимали и космическая пыль. Считается также, что почти весь кислород атмосферы имеет биогенное происхождение.

В структуре атмосферы отчётливо выделяются несколько слоёв (рис.8.1). Основные погодные явления формируются в приземном слое под названием «тропосфера», где постоянно движутся нисходящие и восходящие воздушные потоки. Давление воздуха на вершине тропосферы составляет всего 10% от давления на поверхности Земли (на уровне моря). Между тропосферой и стратосферой имеется тонкий переходный слой, именуемый «тропопаузой».

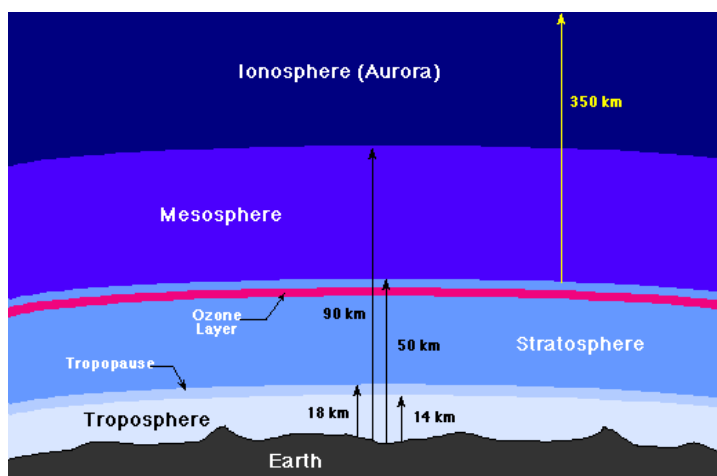


Рис.8.1. Схема строения атмосферы Земли
(<http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/earth/atmosphere.html>).

Над тропосферой расположена стратосфера, где преобладают горизонтальные воздушные течения. Тонкий озоновый слой в верхней стратосфере имеет высокую концентрацию озона, который образуется и варьирует по механизму, предложенному выдающимся английским геофизиком С. Чепменом восемьдесят лет назад (см. подробнее раздел 8.5). Озоновый слой поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца и защищает поверхность Земли, её биосферу от опасного избыточного облучения. Выше тропосферы

находятся обширные слои мезосферы и ионосферы (или термосферы), где многие атомы являются ионизированными (O^+ , N^+ , NO^+ , He^+ , H^+ и другие), т.е. потерявшими часть своих электронов. Структура и свойства ионосферы определяются в основном вертикальным распределением концентрации свободных электронов. От степени ионизации ионосферы зависит, в частности, распространение радиоволн на большие расстояния. Ионосфера также является средой, где генерируются полярные сияния. Структура и динамика ионосферы очень чувствительны к уровню солнечной активности.

Как уже отмечалось, при вторжении в атмосферу Земли, первичные космические лучи разрушают ядра наиболее распространенных в атмосфере элементов – азота и кислорода – и порождают каскадный процесс, в котором участвуют все известные в настоящее время элементарные частицы (рис.8.2, справа), в частности, такие вторичные частицы, как протоны и нейтроны, мезоны, электроны, а также γ -кванты и нейтрино. Путь, пройденный частицей космических лучей в атмосфере до столкновения, принято характеризовать количеством вещества в граммах, заключенного в столбе сечением 1 cm^2 , т.е. выражать пробег частиц в г/см^2 вещества атмосферы. Это значит, что после прохождения толщи атмосферы $x \text{ г/см}^2$ пучком протонов с первоначальной интенсивностью I_0 количество протонов, не испытавших столкновения, будет равно $I = I_0 \exp(-x/\lambda)$, где λ – средний пробег частицы. Для протонов, которые составляют большинство первичных космических лучей, пробег λ в воздухе равен примерно 70 г/см^2 . Первое столкновение с атмосферой протоны испытывают в среднем на высоте 20 км ($x \approx 70 \text{ г/см}^2$). Толщина атмосферы на уровне моря (у.м.) эквивалентна $\approx 1030 \text{ г/см}^2$, т.е. соответствует примерно 15 ядерным пробегам для протонов. Отсюда следует, что вероятность достичь поверхности Земли, не испытав столкновений, для первичной частицы ничтожно мала. Поэтому на поверхности Земли космические лучи обнаруживаются лишь по слабым эффектам ионизации, создаваемой вторичными частицами.

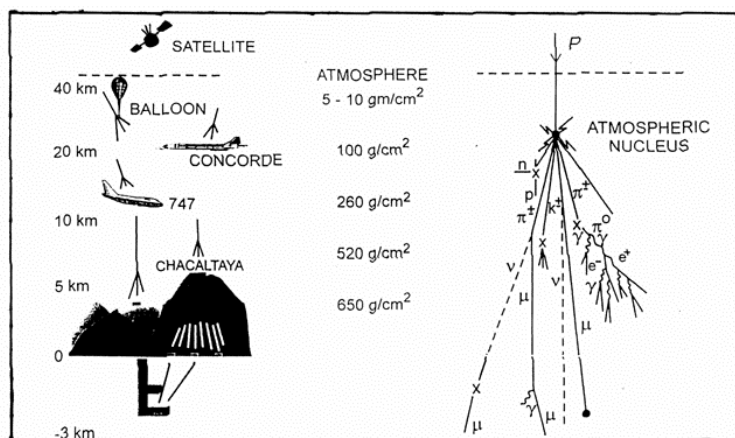


Рис.8.2. Первичные космические лучи в космосе, каскад вторичных космических лучей в земной атмосфере и жёсткие вторичные мюоны на различных подземных глубинах (Shea and Smart, 2000).

Поскольку по своим энергиям частицы космических лучей различаются в $\sim 10^{15}$ раз, то для их изучения приходится применять весьма разнообразные методы и приборы (рис.8.2, слева). При этом широко используется, например, аппаратура, установленная на спутниках и космических ракетах. В атмосфере Земли измерения проводятся с помощью малых шаров-зондов и больших высотных аэростатов, на ее поверхности используются различные наземные установки (детекторы). Некоторые из них достигают размеров около 3000 квадратных километров (например, Обсерватория «Проекта Оже» в Аргентине),

другие расположены либо высоко в горах, либо глубоко под землей, либо на больших глубинах в океане, куда проникают только вторичные частицы высоких энергий.

Непрерывную регистрацию космических лучей на поверхности Земли уже почти 60 лет осуществляет мировая сеть станций для изучения вариаций космических лучей – стандартные нейтронные мониторы и мюонные телескопы. Уникальную информацию о ГКЛ и СКЛ дают наблюдения на больших (не-стандартных) установках для изучения широких атмосферных ливней (ШАЛ). За пределами атмосферы изучение космических лучей, как одного из основных факторов космической погоды, проводится на регулярной основе с помощью спутников и межпланетных зондов (вплоть до границ гелиосферы). Ценную информацию о частицах высокой энергии солнечного и галактического происхождения даёт радиохимический анализ содержания изотопов, которые образуются космическими лучами в метеоритах, лунном реголите и в других образцах внеземного вещества.

Разделить изотопы, образованные солнечными и галактическими частицами, удаётся благодаря различию их энергетических спектров. Поток СКЛ богаче частицами малой энергии. По этой причине СКЛ могут проникать в вещество лишь на незначительную глубину. При этом они теряют свою энергию главным образом на ионизацию атомов мишени, а не на образование изотопов. Частицы же ГКЛ расходуют основную долю энергии на ядерные взаимодействия, причём в глубоких слоях мишени. Таким образом, количество изотопов будет по-разному зависеть от глубины слоя в мишени при облучении солнечными и галактическими частицами. Указанное различие энергетических спектров ГКЛ и СКЛ приводит к существенно разным профилям ионизации в атмосфере.

8.2. Ионизация и проводимость атмосферы

Как видно из Таблицы 8.1, потоки космических лучей являются единственным источником ионизации в атмосфере на высотах $h = 3-35$ км. Тем самым космические лучи определяют почти все электрические свойства атмосферы: образование ионов, электрическую проводимость воздуха, формирование гроз, возникновение молний и т.д. Атмосферное электричество играет важную роль в изменениях погоды и климата. Потоки космических лучей модулируются солнечной активностью. Таким образом, мы имеем следующую цепочку: вариации солнечной активности → модуляция потока космических лучей → изменения в цепи атмосферного электричества и → изменения погоды и климата.

Таблица 8.1. Среднегодовые значения скорости образования ионов в атмосфере Земли для различных природных источников ионизации (Ermakov and Stozhkov, 2003).

Источник ионизации	Образование ионов, пар/с
Естественная радиоактивность ($h < 3$ км)	$< 10^{24}$
Галактические космические лучи (по всей атмосфере)	$\sim (10^{27} - 10^{28})$
СКЛ, выпадение частиц (спорадические явления)	$\sim (10^{26} - 10^{27})$
УФ- и рентгеновское излучения Солнца ($h > 50$ км)	$\sim 10^{28}$
Солнечный ветер (ионосфера)	$\sim 10^{26}$
Молнии (районы грозовой активности, $h < 10$ км)	$\sim (10^{27} - 10^{28})$

В этой цепочке после мощных «солнечных бурь» - генерации вспышек и выбросов коронального вещества, в дополнение к модуляции ГКЛ, - появляется ещё один агент - солнечные космические лучи, вызывающие в атмосфере ряд интересных эффектов. Расчёты высотных профилей ионизации для конкретных солнечных событий проводились многими авторами при различных предположениях о спектре СКЛ и особенностях химических процессов на уровне стратосферы. Для примера на рис.8.3 приведены

результаты подобных расчётов для двух выдающихся событий СКЛ. Серия кривых слева и в центре демонстрирует вклад в ионизацию от частиц с энергиями 433 МэВ (жесткость 1 ГВ) и 3.63 ГэВ (жесткость 4.48 ГВ). Видно, что при малых энергиях на одних и тех же высотах вклад СКЛ в ионизацию преобладает над вкладом от ГКЛ примерно на два порядка.

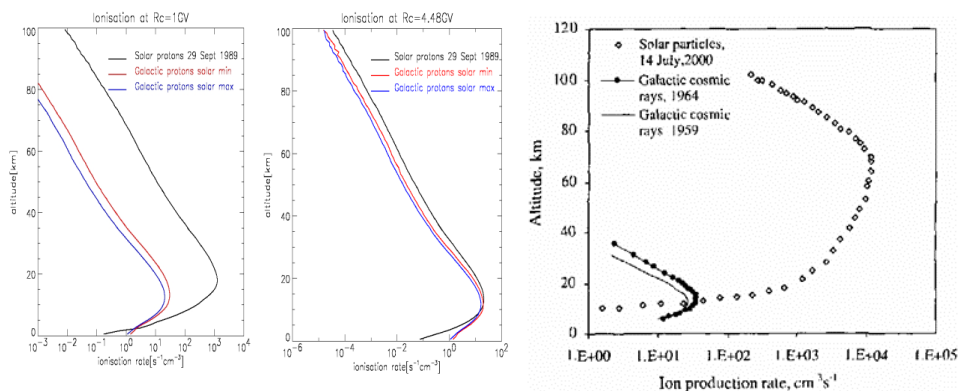


Рис.8.3. Скорость образования ионов в полярной атмосфере за счет СКЛ: слева - во время GLE 29 сентября 1989 г. (Bern Model: <http://cosray.unibe.ch/~laurent/planetocosmics>, Desorgher *et al.*, AOGS 2004), справа - во время GLE 14 июля 2000 г. (Quack *et al.*, 2001), в сравнении с ионизацией от ГКЛ в минимуме и максимуме солнечной активности (Neher, 1971; Bazilevskaya, 2005).

Справа на рис.8.3 приведены результаты расчётов профиля ионизации с учетом всего спектра СКЛ, зарегистрированных во время события 14 июля 2000 г. Как известно, скорость образования ионов зависит от интенсивности частиц и плотности воздуха. Из-за быстро спадающего спектра СКЛ более интенсивные потоки вторгающихся солнечных частиц приходят в высокие широты, при этом плотность воздуха с высотой уменьшается. В результате, максимум скорости ионизации от СКЛ наблюдается в полярных широтах в интервале высот 20-80 км (в зависимости от спектра частиц в конкретном событии) и составляет 10^3 - 10^4 $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, тогда как в случае ГКЛ максимум достигается на высоте ~ 12 км и составляет всего ~ 30 $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$. При этом вклад от ГКЛ несколько меняется от максимума к минимуму солнечной активности.

8.3. Генерация космогенных изотопов

Как известно, понимание климатических изменений (трендов) в далёком прошлом и их предсказание на будущее требует анализа совокупности различных астрофизических и геофизических данных. В этой связи представляют большой интерес, в частности, данные о долговременных вариациях ГКЛ и частоты событий СКЛ в зависимости от уровня солнечной активности. Прямые методы, однако, не позволяют определить характеристики космофизических, геофизических и экологических процессов на больших временных интервалах (исключением могут служить, вероятно, лишь вариации числа солнечных пятен, которые наблюдаются с 1749 г.).

Чтобы решать отмеченные проблемы трендов, необходимо использовать не прямые методы получения данных-заместителей (**proxy data**) от возможных «свидетелей-очевидцев» прошлого. Иными словами, надо научиться извлекать информацию из таких природных резервуаров («архивов»), где данные о прошлых явлениях не только были зарегистрированы, но и сохранились в своем первоначальном виде. Одним из таких «свидетелей» являются космогенные радиоактивные изотопы (радионуклиды). Они

образуются в веществе Луны и планет, в метеоритах и космической пыли, в земной атмосфере и океанах, а также на поверхности Земли под действием или влиянием космических лучей. Схема генерации космогенных изотопов, их источники и земные «хранилища» показаны на рис.8.4.

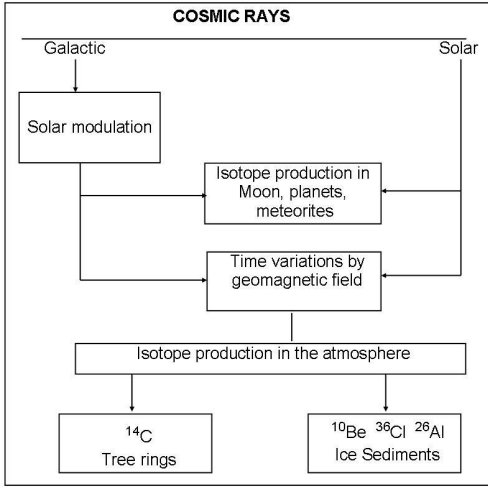


Рис.8.4. Схема генерации космогенных изотопов в атмосфере Земли и их хранения в природных резервуарах (Кочаров, 1991).

Как видно из рис.8.4, генерация космогенных изотопов в атмосфере Земли зависит от интенсивности потоков ГКЛ, которые, в свою очередь, подвергаются модуляции при изменении уровня солнечной активности и геомагнитной возмущённости. Свой вклад в образование таких изотопов вносят солнечные космические лучи. К настоящему времени наиболее детальные данные о вариациях космических лучей в прошлом получены при изучении изотопов радиоуглерода ^{14}C и бериллия ^{10}Be . Некоторые свойства наиболее важных космогенных изотопов приведены в Таблице 8.2.

Таблица 8.2. Свойства основных космогенных изотопов в атмосфере Земли.

Изотоп	Период полураспада (год)	Ядерная мишень	Скорость генерации, (атом/см ² с)
^{10}Be	$(1.52 \pm 0.05) \times 10^6$	N, O	0.018
^{14}C	5370 ± 40	N	2.00
^{36}Cl	$(3.01 \pm 0.02) \times 10^5$	Ar	0.0019

Радиоуглерод образуется в реакции захвата вторичных тепловых нейтронов ядрами азота:



Изотопы ^{10}Be и ^{36}Cl появляются в результате реакций расщепления (дробления) ядер азота ^{14}N , кислорода ^{16}O , аргона ^{40}Ar и других элементов атмосферы вторичными частицами космических лучей (в основном протонами p и нейтронами n). Каналы таких реакций весьма разнообразны. Это можно видеть на примере генерации радиоактивного хлора. Примерно две трети изотопа ^{36}Cl в атмосфере генерируются в реакции расщепления:



где ^4He – ядро атома гелия (альфа-частица). Оставшаяся треть образуется в другой реакции расщепления:



Эти реакции приводят к накоплению ^{36}Cl в атмосфере в среднем со скоростью от 12 до 20 атомов ^{36}Cl в секунду на 1 м^2 . При ядерных взаимодействиях вторичных космических лучей с атомами аргона в атмосфере образуется также радиоактивный алюминий ^{26}Al , но в весьма незначительном количестве. Основная его доля генерируется в поверхностных породах на кремнии ^{28}Si , а также заносится на Землю из внеземного пространства. Период полураспада ^{26}Al составляет $(0.71 \pm 0.02) \times 10^6$ лет.

Изотопы ^{14}C и ^{10}Be быстро окисляются, соответственно, до состояния двуокиси углерода CO_2 и окиси бериллия BeO , которые затем через аэрозоли и осадки постепенно вовлекаются в различные геохимические и геофизические процессы. Радиоактивный углерод, кроме того, участвует в процессе обмена веществ – в глобальном углеродном цикле на Земле, включая биосферу. Последний факт представляет особый интерес, так как углерод обладает свойством накапливаться и храниться в кольцах деревьев и в любых других (в том числе – и в ископаемых) остатках биосферы (в гумусе). Другие космогенные изотопы накапливаются в полярных (многолетних) льдах и в донных отложениях озёр и океанов.

Из данных Таблицы 8.2 следует, что содержание космогенных изотопов в различных природных средах может служить хорошим геохронометром прошлых астрофизических и геофизических событий на соответствующих временных интервалах. Иными словами, изучение их содержания может дать уникальную информацию о поведении космических лучей, активности Солнца и других аспектах солнечно-земных связях в далёком прошлом. Действительно, уже сейчас изотопы ^{10}Be и ^{14}C представляют собой своеобразные нейтронные мониторы; их данные позволяют реконструировать вариации ГКЛ с разрешением в 1 год и отношением сигнала к шуму 9:1 (на шкале в 100 лет), по меньшей мере, на 500-600 лет назад в прошлое. Космогенные данные свидетельствуют, например, что интенсивность ГКЛ была аномально высокой, а солнечная активность – соответственно, аномально низкой не только в период известного минимума Маундера (1645-1715 гг.), но и в течение почти всего позднего Средневековья (1428-1715 гг.).

Комбинируя данные о содержании ^{10}Be в образцах льда и ^{14}C в кольцах деревьев, можно восстановить временной ход вариаций космических лучей почти на 10 000 лет в прошлом. По данным о ^{14}C в будущем, возможно, удастся продвинуться назад во времени до 40 000 лет, а использование данных о ^{10}Be позволит заглянуть в прошлое на 1 млн. лет до нашей эры... Для сравнения отметим, что по данным об изотопном составе метеоритов были получены указания о том, что в период 300-900 млн. лет назад интенсивность ГКЛ могла быть в среднем в 3 раза ниже современной. Все эти сведения представляют большой интерес не только для солнечно-земной физики, но и для геохронологии, для изучения вариаций геомагнитного поля и изменений климата в прошлом, для понимания эволюции биосферы и – через дендрохронологию и археологию – даже для изучения истории земной цивилизации.

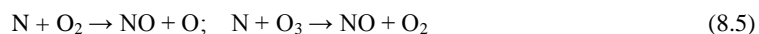
8.4. Образование нитратов

Другим важным «свидетелем» прошлых событий в системе «Солнце-Земля» являются окислы азота, точнее – некоторые конечные продукты азотного цикла в атмосфере (нитраты). К окислам относят двойные соединения азота с кислородом – от NO до N_2O_5 – или смесь из нескольких подобных составляющих. Среди природных соединений азота

важнейшее место в физике и химии верхней атмосферы (аэрономии) занимают молекулы семейства NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$). Строго говоря, из-за тесной связи между реакциями, к этому семейству следует отнести всю цепочку соединений так называемого «нечетного азота» ($\text{N} + \text{NO} + \text{NO}_2 + \text{NO}_3, 2\text{N}_2\text{O}_5 + \text{BrONO}_2 + \text{ClONO}_2 + \text{HO}_2\text{NO}_2 + \text{HNO}_3$). Круговорот азота на Земле в целом имеет огромное значение для физики атмосферы и эволюции биосферы. Ниже будет показано, в частности, что именно окислы $\text{NO} + \text{NO}_2$ активно участвуют в разрушении озона в верхней атмосфере.

Источники окислов NO_x в атмосфере в целом хорошо известны, хотя точно определить вклад каждого из них трудно. Молниевые разряды, сжигание ископаемого топлива, испарение почвы, горение биомасс и окисление аммиака – вот главные источники NO_x в тропосфере. В верхней атмосфере основными источниками NO_x становятся окисление N_2O в комбинации с фотолизом (фотодиссоциацией) и фотоионизацией молекул N_2 коротковолновым излучением Солнца ($\lambda \leq 310$ нм). С другой стороны, дополнительным источником NO в стратосфере служат возбуждение, ионизация и диссоциация атомов O_2 и N_2 под действием быстрых вторичных электронов, которые, в свою очередь, генерируются в атмосфере первичными галактическими и солнечными космическими лучами (рис.8.2). Возможны и другие причины ионизации атмосферы (например, выпадение энергичных частиц РПЗ в зонах полярных сияний). Однако для понимания механизмов солнечно-земных связей именно вклад ГКЛ и СКЛ представляет наибольший интерес.

Генерация NO под влиянием космических лучей – это довольно сложный процесс, подающийся, однако, численному моделированию. Ниже мы приводим лишь последние звенья из цепочки соответствующих реакций, в которых окись азота NO рождается при взаимодействии как уже ионизованных, так и нейтральных, но возбуждённых атомов N с кислородом:



Поскольку основная доля частиц ГКЛ и СКЛ приходят на высокие геомагнитные широты ($\geq 60^\circ$), то и генерация NO (8.4)-(8.5) преобладает в полярных областях Земли. Ионизация за счёт космических лучей может приводить к существенным изменениям в химическом составе полярной стратосферы в целом. В частности, благодаря ионизации окружающего воздуха и последующей диссоциации O_2 и N_2 , энергичные частицы ГКЛ и СКЛ, проникающие в атмосферу, облегчают и усиливают образование «нечетного азота». В этом смысле можно говорить о своеобразном «химическом канале» воздействия космических лучей на земную атмосферу.

Как показали модельные расчёты, скорость образования NO_x является весьма чувствительной к потоку энергичных солнечных частиц. Это можно видеть на рис.8.5, где приведены результаты расчётов генерации NO для трёх солнечных протонных событий (СПС) в прошлом, в сравнении с плавными вариациями его содержания NO_x в ходе 11-летнего цикла ГКЛ. Расчёты сделаны в двух крайних предположениях - с учётом ($P_N = 1$) и без учёта ($P_N = 0$) образования NO на возбуждённых атомах азота. Обращает на себя внимание, прежде всего, общее сходство кривых генерации NO с кривыми ионизации для ГКЛ на рис.8.3, которые достигают максимума на высоте 12-15 км. При этом максимум фоновой концентрации NO_x от земных источников находится на высоте около 30 км. С другой стороны, максимум образования NO частицами СКЛ, в зависимости от спектра частиц и мощности протонного события, очевидно, может заметно варьировать.

В атмосфере соединения азота NO_x , в конечном счёте, окисляются до состояния азотной кислоты HNO_3 , которая вместе с осадками попадает на поверхность Земли, морей и океанов. В условиях полярной ночи, участники цепочки-семейства NO_x являются долгоживущими соединениями, так что некоторые из них, например, азотная кислота

HNO_3 , могут эффективно переноситься вниз и накапливаться в полярных снегах (льдах). В результате именно во льдах Антарктиды и Гренландии происходит «замораживание» и многолетнее хранение нитратов. Таким образом, полярные льды служат надёжным природным резервуаром, из которого можно черпать важные сведения для геофизики и солнечно-земной физики.

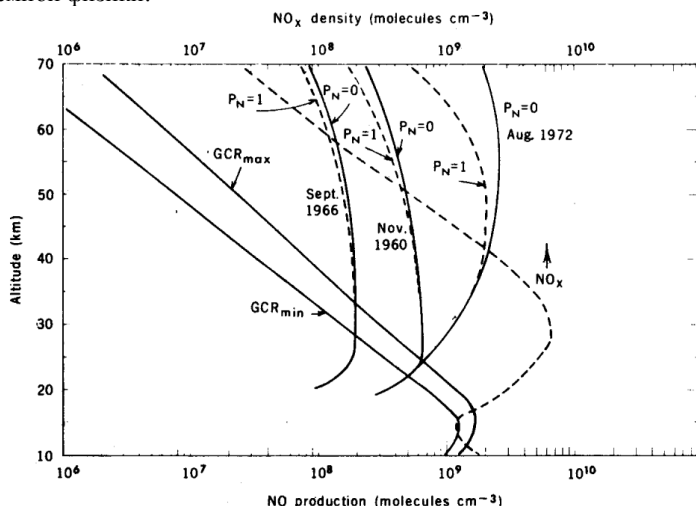


Рис.8.5. Объёмная генерация окисла NO в атмосфере Земли (cm^{-3}) за счёт СКЛ во время СПС в ноябре 1960, сентябре 1966 и августе 1972 гг. (нижняя шкала), рассчитанная для высот между 70 и 20 км (Crutzen *et al.*, 1975). Отдельно показаны мощность образования NO за счёт ГКЛ в минимуме и максимуме солнечной активности, а также ожидаемое **фоновое** распределение концентрации окислов NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) (верхняя шкала).

Исходя из приведенных данных, можно было ожидать, что в кернах полярного льда могут быть обнаружены «нитратные сигналы» (т.е. увеличения концентрации NO_x), свидетельствующие о выдающихся прошлых событиях в системе «Солнце-Земля». В конце 1980-ых годов это предположение было тщательно проверено учеными Канзасского университета (США). И действительно, в образцах антарктического льда с возрастом до ~200 лет были найдены отчётливые 11- и 22-летние вариации содержания NO. Эти вариации имели близкое сходство с изменениями содержания ^{14}C в кольцах деревьев за последние ~1200 лет. Более того, оказалось, что в нитратных данных можно даже выделить эффекты от отдельных, достаточно мощных солнечных вспышек. В частности, были обнаружены аномально большие скачки концентрации NO_x (рис.8.6), которые удалось связать с реально наблюдавшимися протонными событиями в августе 1972 и июле 1946 гг. Был также отмечен пик, связанный с очень мощной («белой») вспышкой в июле 1928 г. В последнем случае данных по СКЛ ещё не было (их наблюдения начались лишь в 1942 г.).

Эти первые указания на возможный вклад СКЛ в генерацию NO_x были подтверждены количественными расчётами скорости переноса соединений азота в атмосфере на основе реальных (измеренных) спектров солнечных протонов. Например, было показано, что в августе 1972 г. скорость образования окислов азота составила 1.5×10^{15} молекул на 1 cm^2 в столбе воздуха от поверхности Земли до высоты 37 км. Этого оказалось достаточно, чтобы объяснить наблюдавшийся пик NO_x . После этого не осталось сомнений, что существенная доля молекул NO_x в изученных образцах льда была образована в химических реакциях, стимулированных ионизацией атмосферы космическими лучами.

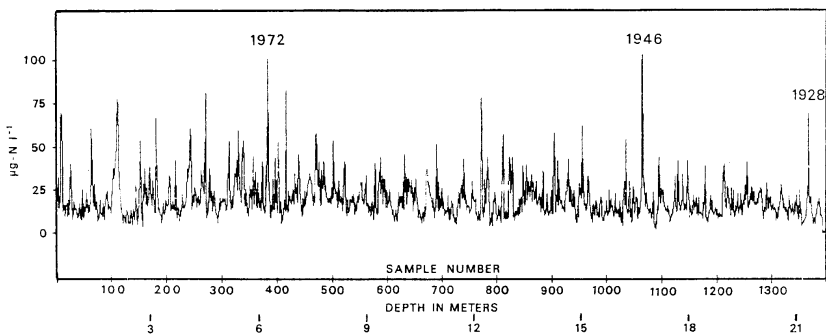


Рис.8.6. Профили концентрации нитратов в пробах льда, взятых из шельфового ледника Росса, Антарктида (Dreschhoff and Zeller, 1990). Ось x соответствует реальной глубине ниже поверхности ледника; по оси y показаны значения концентрации нитратов в миллиграммах на единицу полной длины керна. Отчётливо видны, по крайней мере, три статистически значимых пика, соответствующих мощным солнечным вспышкам, которые наблюдались в 1928, 1946 и 1972 гг.

Впоследствии та же группа учёных распространила свои исследования на Гренландию. Были изучены образцы льда с возрастом, перекрывающим конец 19-го и начало 20-го столетий. По совокупности данных о содержании нитратов в образцах, извлечённых из ледников Антарктиды и Гренландии, были не только подтверждены эффекты мощных СПС, наблюдавшихся в 20-ом веке, но и обнаружен пик концентрации NO_x , связанный с исторической «белой» вспышкой 1 сентября 1859 г. Более того, была зафиксирована аномалия (скачок) содержания, связанная с загадочным Тунгусским явлением 30 июня 1908 г. Таким образом, «нитратный метод» оказался очень полезным орудием для исследования гелио-геофизических процессов. При этом образование окислов азота, очевидно, является частью физического механизма, который связывает вторжение СКЛ в стратосферу с процессами в тропосфере.

8.5. Образование и динамика озонового слоя

С генерацией нитратов в атмосфере связана другая интересная проблема, а именно – поведение концентрации озона во время солнечно-геофизических возмущений (в частности, во время солнечных вспышек). Ниже кратко описан механизм образования озона, а также явление истощения (опустошения) озонового слоя.

Как уже отмечалось, механизм образования озона O_3 и динамики его содержания впервые предложил С.Чепмен в начале 1930-х годов. Суть этого механизма состоит в следующем. На высотах 20–45 км молекула кислорода O_2 под действием солнечного ультрафиолета ($\lambda \leq 242$ нм) распадается на два атома (фотолиз). Образовавшиеся атомы быстро прилипают к молекулам кислорода, давая молекулы озона:



По современным представлениям, этот процесс происходит на высотах более 30 км, поскольку ниже этой высоты коротковолновое солнечное излучение практически не проникает (Ларин, 2009). В свою очередь, молекула озона под действием УФ-излучения также подвергается фотолизу (фотораспаду), образуя 1 новый атом и 1 новую молекулу кислорода. Атомарный кислород затем объединяется с другой молекулой озона, образуя две новые молекулы кислорода:



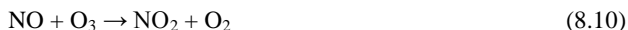
Таким образом, если говорить на языке химических реакций, молекула O_3 и атом O образуют систему частиц так называемого «нечётного кислорода» O_x .

Из (8.6)-(8.7) видно, что если бы после образования молекул O_3 можно было «выключить» Солнце, то накопленный озон сохранялся бы. Такой механизм действует в естественных условиях. Так, при отсутствии солнечного УФ-излучения (например, ночью) его содержание в атмосфере практически не меняется, а озон, образовавшийся в тропической стратосфере (где много солнечного света), процессами глобальной циркуляции переносится к полюсам, где в условиях полярной ночи происходит его накопление и сохранение. Именно этим и объясняется накопление озона в стратосфере Арктики и Антарктики в течение полярной зимы.

Схема Чепмена просуществовала без изменений до середины 1960-х годов, когда была создана теория цепных процессов разрушения озона с участием водородных (OH), азотно-окисных (NO_x) и галоидных (хлор-бром-йод, Cl-Br-I) соединений, которые попадают в атмосферу в основном из промышленных выбросов. Однако основа этих новых механизмов осталась «чепменовской».

Из всего сказанного следует, что основной реакцией гибели частиц O_x в стратосфере является реакция (8.9). Действие всех других антропогенных и естественных соединений, способных разрушить атмосферный озон, обусловлено исключительно ускорением этой реакции. Это ускорение связано с существованием более быстрых путей гибели нечётного кислорода, параллельных основной реакции. Быстрые пути связаны с реакциями типа $\text{X} \rightarrow \text{XO} + \text{O}$, где $\text{X} = \text{OH}, \text{NO}, \text{Cl}, \text{Br}$ и др. Для примера рассмотрим цепной механизм разрушения стратосферного озона при участии окиси азота NO , образуемой при вторжении СКЛ в реакции типа (8.4)-(8.5).

Солнечные протоны обеспечивают энергию для протекания эндотермической реакции, где NO действует как катализатор:



На этой стадии частицы NO сохраняются, а частицы O_3 и O гибнут. В конечном итоге, как и в случае (8.9), получаем две молекулы кислорода:



При этом некоторая доля частиц NO тоже гибнет в процессах типа



Длина цепи процесса и число разрушенных молекул озона определяются отношением скорости продолжения цепи к скорости гибели частиц X . Динамика содержания озона в верхней атмосфере важна по двум причинам. Во-первых, вариации озонного слоя влияют на величину потока солнечного УФ-излучения, достигающего поверхности Земли и опасного для биосферы; во-вторых, изменения содержания озона влияют на колебания температуры на высотах стратосферы. В свою очередь, эти колебания воздействуют на распространение и торможение волн, идущих снизу, из тропосферы, т.е. волн Россби и внутренних гравитационных волн, которые тесно связаны с циркуляцией тропосферы.

Определённое понижение содержания озона, связанное с приходом СКЛ, было впервые зарегистрировано в ракетных экспериментах 2 ноября 1969 г. на высоте около 52

км. С тех пор подобные эффекты регулярно регистрируются различными методами, в том числе по наблюдениям с борта космических аппаратов. Так, в августе 1972 г. на борту американского ИСЗ «Нимбус-4» проводились измерения так называемого обратного рассеяния солнечного УФ-излучения от озонового слоя. После вспышек 4 и 7 августа наблюдалось крупномасштабное понижение содержания озона в стратосфере над северной полярной шапкой Земли в интервале широт 75°N-80°N (рис.8.7). Эффект уменьшался в интервале широт от 55°N до 65°N и полностью отсутствовал в тропической зоне. Подобные эффекты, но гораздо меньшей амплитуды, отмечались также в южном полушарии в условиях местной зимы. Данные за 7 дней до события на рис.8.7 были использованы в качестве базовых для построения двух сплошных кривых. Теоретическая штриховая кривая была получена в предположении, что понижение концентрации озона спустя 4 недели после СПС было вызвано каталитическим эффектом окисла азота NO, образованного энергичными солнечными протонами (см. реакции (8.10)-(8.12)).

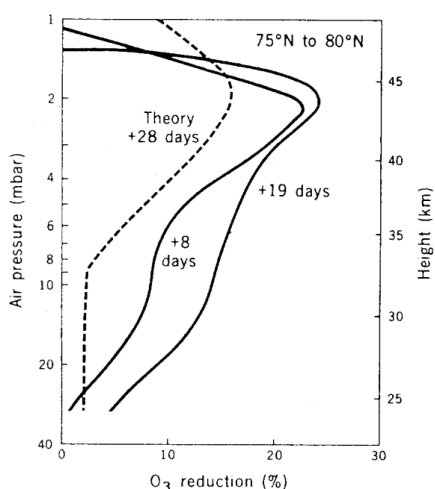


Рис.8.7. Динамика уменьшения парциального давления O_3 в зависимости от давления воздуха (или высоты) для двух 7-дневных периодов, центрированных к 8-му и 19-му дням после протонного события 4 августа 1972 г. (сплошные кривые). Штриховая кривая – это расчётное уменьшение содержания O_3 к 1 сентября 1972 г., спустя 28 дней после вспышки (Heath *et al.*, 1977).

Подсчитано, что за полное время двух мощных протонных событий 4-7 августа 1972 г. суммарный поток энергии в форме СКЛ в полярной стратосфере составил $\sim 6 \times 10^{-2}$ Дж/см². Эти события сопровождались значительным (>20%) понижением содержания озона на высоких широтах в стратосфере, выше уровня с остаточным давлением воздуха 4 мбар (рис.8.7). Разумеется, суммарная энергия быстрых солнечных протонов, проникающих в атмосферу Земли во время отдельных СПС, не сравнима с энергией, поступающей от Солнца в виде электромагнитного излучения (солнечная постоянная $Q = 1360$ Вт/м²). Это означает, что энергии СКЛ совершенно недостаточно для поддержания, например, типичного стратосферного возмущения. Эта диспропорция, однако, становится менее резкой, если иметь в виду, что геомагнитное поле концентрирует основной поток СКЛ в высоких широтах, где эффекты электромагнитного излучения минимальны, особенно в условиях локальной зимы. Поэтому естественно ожидать, что возможные метеорологические эффекты от СКЛ будут проявляться более отчётливо как раз на высоких широтах и будут более выраженными в зимний период. Как упоминалось выше, именно такая ситуация и наблюдалась после двух СПС в августе 1972 г.

Эффекты истощения (опустошения) озонового слоя Земли после солнечных вспышек наблюдались во многих других случаях, например, в сентябре-октябре 1989 г., в мае 1990 г., в октябре 2003 г., в декабре 2006 г. Наряду с хорошо изученным явлением РСА, упомянутым выше, истощение озонового слоя является одним из самых достоверных атмосферных эффектов СКЛ. Далее мы рассмотрим еще несколько примеров менее (и/или плохо) изученных, и/или только предполагаемых (ожидаемых), атмосферных эффектов космических лучей в цепочке солнечно-земных связей. Среди таких эффектов особое место занимает несомненное воздействие СКЛ на глобальную электрическую цепь (ГЭЦ).

8.6. Глобальная электрическая цепь

Проблема глобального атмосферного электричества (или глобальной электрической цепи) существует уже около 100 лет. Впервые идею ГЭЦ выдвинул С.Т.Р. Уилсон (1922). В современной схеме атмосферного электричества предполагается, что между ионосферой и поверхностью Земли имеется определённая разность потенциалов, которая порождает электрический ток, направленный вниз в областях с хорошей погодой. При этом ионосфера по определению является сильно проводящей средой, а в стратосфере и тропосфере необходимые для переноса тока заряды обеспечиваются за счёт ионизации воздуха космическими лучами (см. Таблицу 8.1) и молниевыми разрядами. Замыкание ГЭЦ происходит через несколько участков (рис.8.8) с различными значениями электрического сопротивления (ионосфера, стратосфера, тропосфера, поверхность Земли). Главным генератором атмосферного электричества считаются, в общем, грозы в областях с ненастной погодой. В деталях картина формирования грозовых облаков, разделения зарядов в атмосфере и генерации молний оказывается довольно сложной (см. ниже).

Экваториальные и низкие широты отличаются меньшими изменениями проводимости за счет вторжения энергичных частиц, чем высокие или полярные широты. Главный генератор электричества - тропические грозы, создающие ионосферный потенциал порядка 250 кВ над большей частью Земли. В полярных областях потенциалы «день-ночь» и «полюс-полюс» создаются за счет взаимодействия «солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера».

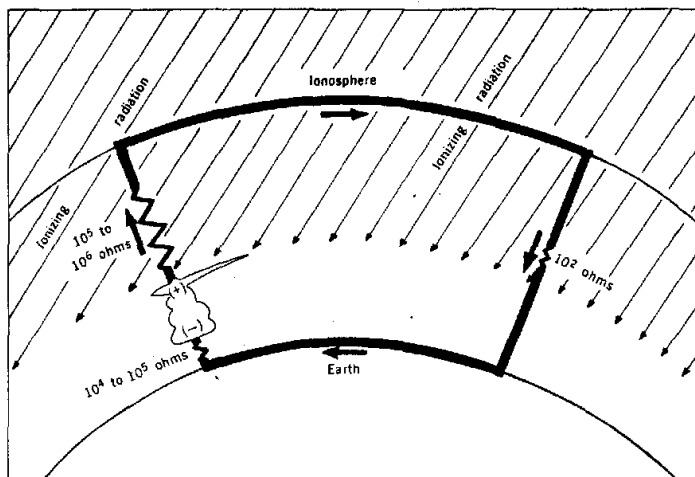


Рис.8.8. Простейшая схема глобальной электрической цепи (ГЭЦ) в атмосфере Земли (Markson, 1978) с несколькими элементами с различным сопротивлением (ионосфера, стратосфера, тропосфера, поверхность Земли) и потоками ионизирующей радиации.

Сердце атмосферной электрической машины - грозовое облако, точнее, совокупность одновременно "работающих" полутора тысяч гроз, распределенных в нижней части атмосферы - тропосфере. Грозовое облако живет не так уж долго - от часа до нескольких часов. Но на смену одним грозам приходят другие, формирующиеся в тропосфере по соседству. Наблюдения с борта спутников показывают, что частота грозовых разрядов над поверхностью океана в среднем на порядок ниже, чем над континентами в тропиках. Одна из причин такой асимметрии - в интенсивной конвекции в континентальных областях, где суша эффективно прогревается солнечным излучением.

Быстрый подъем прогретого насыщенного влагой воздуха способствует образованию мощных конвективных облаков, в верхней части которых температура ниже - 40°C . В результате формируются частицы льда, снежной крупы, града, взаимодействие которых на фоне быстрого восходящего потока и приводит к разделению зарядов. Над океанами высота облаков в среднем ниже, чем над континентами, и процессы электризации менее эффективны. В последнее время обсуждается и другой фактор - различие в концентрациях аэрозолей над океаном и континентами. Так как аэрозоли служат ядрами конденсации, необходимыми для образования частиц в переохлажденном воздухе, их обилие над сушей повышает вероятность сильной электризации облака (рис.8.9). Количественный анализ этого фактора требует детальных экспериментов, которые только начинаются.

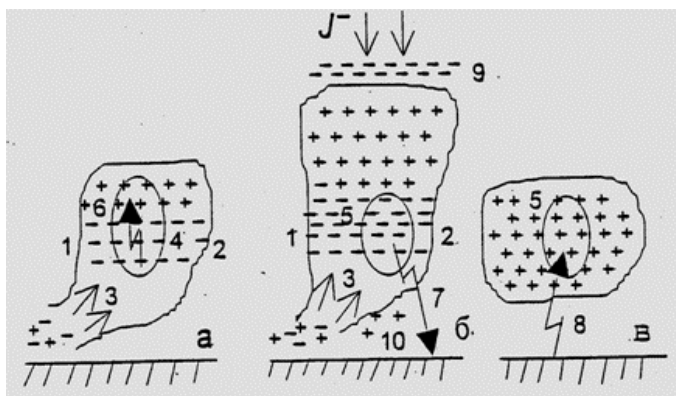


Рис.8.9. Различные фазы жизни грозового облака: (а) – формирование; (б) – фаза зрелости; (с) – фаза деградации. Цифрами обозначены: 1 – область тёплого фронта; 2 – область холодного фронта; 3 – восходящий поток влажного ионизованного воздуха; 4 и 5 – широкие атмосферные ливни (ШАЛ) вторичных космических частиц, генерированных первичными ГКЛ с энергиями $E \geq 10^{14}$ и 10^{15} эВ, соответственно; 6 – электрические разряды внутри облака; 7 и 8 – разряды, направленные вниз и вверх, соответственно; 9 – отрицательно заряженный экранирующий слой; 10 – положительный заряд у основания облака; J – ток из отрицательных ионов, текущий из ионосферы к вершине облака (Ермаков и Стожков, 2003).

Среди других характеристик облака на рис.8.9 упоминается возможное участие в грозовом разряде космических лучей высокой и сверхвысокой энергии $E \geq 10^{14} - 10^{15}$ эВ. Согласно одной из современных гипотез, молниевые разряды вызываются так называемыми «широкими атмосферными ливнями» (ШАЛ) заряженных вторичных частиц, которые рождаются первичными частицами ГКЛ с энергией $E > 10^{14}$ эВ при их взаимодействии с ядрами земной атмосферы (В.И. Ермаков, 1992; Ю.И. Стожков, 2003). Альтернативная гипотеза допускает, что молниевые разряды вызываются лавинами энергичных электронов, которые образуются (ускоряются) в сильных электрических полях грозового облака (А.В. Гуревич и др., 1999). В обоих случаях заряженные частицы (ШАЛ или электроны) играют роль спускового механизма для генерации молнии. Обе

гипотезы в настоящее время интенсивно разрабатываются теоретически и проверяются экспериментально.

8.7. Космические лучи – триггер тропосферных процессов?

Около 20 лет назад М.И. Пудовкин и О.М. Распопов (Ленинград) предложили общую, довольно сложную схему возможного влияния космически лучей галактического и солнечного происхождения на тропосферу (рис.8.10). При всей условности этой схемы, из неё можно видеть, что основное (энергетическое) воздействие на земную атмосферу Солнце оказывает своим электромагнитным излучением (95%), тогда как на остальные воздействия остаётся не более 5%. При этом ГКЛ и СКЛ выглядят как «боковая ветвь» этого влияния. Вместе с тем, уже на уровне средней и нижней атмосферы (см. рис.8.1) авторы допускают прямые физические и химические взаимодействия энергичных солнечных частиц (протонов) и ГКЛ с частицами атмосферы. В нижней атмосфере как раз и вступает в действие, по-видимому, основной фактор, связанный с космическими лучами, а именно – появление свободных зарядов в ионизированном воздухе. Свободные заряды (особенно отрицательные ионы) могут служить ядрами конденсации водяного пара, что способствует образованию облаков и, в конечном счёте, приводит к изменению прозрачности атмосферы. Иными словами, как отмечено на схеме, атмосфера становится «серым фильтром» для электромагнитного излучения Солнца. Все эти процессы развиваются на фоне вариаций уровня солнечной активности (включая изменения мощности солнечного ветра), которая определяет частоту событий и потоки СКЛ, а также модулирует интенсивность ГКЛ (например, в ходе 11-летнего цикла).

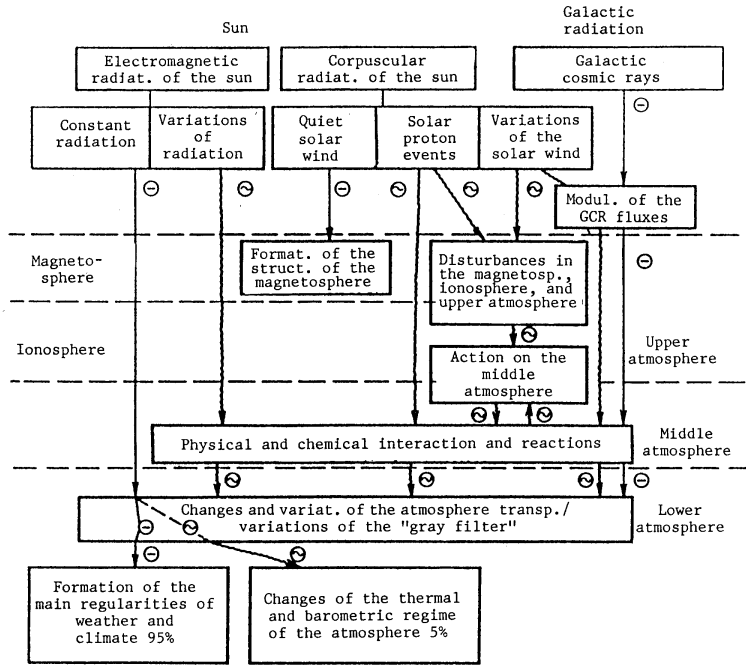


Рис.8.10. Схема влияния солнечной активности и космических лучей (ГКЛ и СКЛ) на тропосферные процессы (М.И. Пудовкин и О.М. Распопов, 1992).

Уже на этом примере можно видеть сложный, «многоэтажный» (многозвенный) характер воздействия солнечной активности на земную тропосферу. Очевидно,

космические лучи играют роль посредника и/или триггера в передаче энергии солнечных возмущений в атмосферу Земли. Рассмотрим в общих чертах схему возможного триггерного механизма, в основе которого лежит усиление слабого воздействия космических лучей на мощные тропосферные процессы. Схема такого «двухкаскадного усилителя» показана на рис.8.11. Его идея сводится к изменению отражательной способности (альбедо) Земли по отношению к солнечному электромагнитному излучению под влиянием космических лучей.

С течением времени альбедо изменяется. Наиболее заметно изменяются альбедо облачности и непосредственно земной поверхности. При этом главное влияние на климат Земли оказывают вариации альбедо облачного покрова, с которыми прямо связаны вариации альбедо земной поверхности. Так, с увеличением облачного покрова понижается температура приземного воздуха, что приводит к увеличению снежного (ледового) покрова и, соответственно, альбедо поверхностного слоя Земли, и наоборот.

На схеме рис.8.11 (слева) «входным сигналом» усилителя служит ионизация от космических лучей, которая через дополнительную конденсацию водяного пара приводит к усилению облачности. Это приводит к увеличению облачного альбедо, а затем и альбедо земной поверхности. Иными словами, образование облаков регулирует альбедо атмосферы (отражение солнечного света обратно в космос), т.е. поступление солнечной энергии к поверхности Земли. Очевидно, «выходным сигналом» усилителя могут быть различные явления погоды и климата. Механизм возникновения одного из таких явлений становится понятным из правой части рис.8.11.

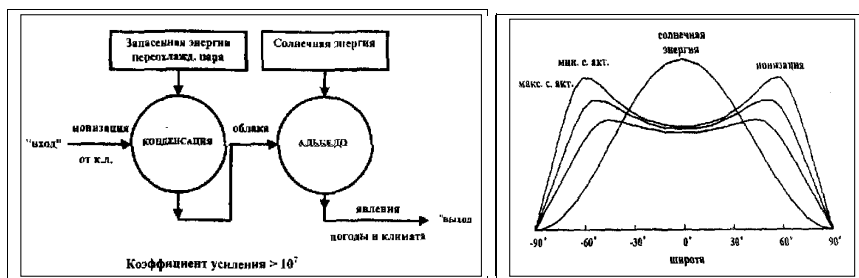


Рис.8.11. Механизм влияния ГКЛ на тропосферные процессы (Г.Ф. Крымский, 2002). Слева - «двухкаскадный усилитель» воздействия ионизации на альбедо атмосферы. Справа - широтное распределение поступления солнечной энергии, определяющей парообразование, с максимумом на экваторе. Широтный ход ионизации, создаваемой космическими лучами, имеет два максимума, амплитуда и положение которых несколько меняется в ходе 11-летнего цикла СА.

Действительно, широтное распределение ионизации в атмосфере (двугорбая кривая с максимумами на широтах около $\pm 60^\circ$) совершенно не похоже на широтный ход поглощения солнечной энергии (света), имеющий максимум на экваторе. Различие двух широтных распределений должно способствовать возникновению и поддержанию меридиональной циркуляции воздуха в атмосфере, т.е. перемещению воздушных масс преимущественно вдоль географического меридиана (от экватора к полюсам).

Каков должен быть коэффициент усиления в такой схеме? Сравнивая потоки энергии, поставляемой в атмосферу Земли солнечной радиацией («солнечная постоянная» $\approx 1.36 \times 10^3 \text{ Вт/м}^2$) и галактическими космическими лучами ($\approx 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$ при энергии частиц $E > 0.1 \text{ ГэВ}$), получим коэффициент усиления $k \approx 1.36 \times 10^8$. Впервые оценку $k > 10^7$ получили Tinsley and Deen (1991). Как следует из рис.8.11, величина k может меняться при переходе от максимума к минимуму солнечной активности, которая существенно модулирует поток ГКЛ. Что касается конкретных физических моделей, связывающих образование облаков с космическими лучами, то в настоящее время наиболее обоснованные из них опираются на

две различные гипотезы. Одна из них допускает, что за счёт ионизации атмосферы космическими лучами возрастает число ядер конденсации, на которых образуются капельки воды будущего облака. Во второй гипотезе считается, что ионизация воздуха космическими лучами модулирует всю цепь электрического тока «ионосфера-Земля». Это, в свою очередь, влияет на свойства облака через воздействие зарядовых эффектов на замораживание капель.

В этой области уже проводятся или планируются серьёзные натурные и лабораторные эксперименты на микрофизическом уровне. Для примера упомянем один из них – очень масштабный эксперимент под названием CLOUD (Cosmics Leaving Outdoor Droplets); он уже осуществляется с ноября 2009 г. в международном Центре ядерных исследований (CERN) в Швейцарии (J. Kirkby *et al.*). В эксперименте используются аэрозольная камера диаметром 4 м и цилиндрическая диффузионная камера (её обычно называют камерой Вильсона) диаметром 0.5 м, которые подвергаются облучению ускоренными протонами от ускорителя (Proton Synchrotron at CERN), причём пучок протонов имитирует поток ГКЛ на любой высоте и широте. Камеры заполнены воздухом и водяным паром, а также содержат небольшие добавки редких газов и аэрозоли, они способны работать при любой температуре и давлении, которые могут иметь место в реальной земной атмосфере. Это первый случай, когда ускоритель частиц высокой энергии используется для целей атмосферной физики. Основная цель эксперимента – проверка механизмов конденсации водяного пара в присутствии космических лучей. Ожидаемые результаты могут сильно изменить понимание погодных явлений и причин изменений климата.

8.8. Другие атмосферные эффекты космических лучей

Как следует из сказанного выше, ГКЛ и СКЛ не могут претендовать на роль основного фактора в системе солнечно-земных связей. Но их роль и вклад в проблему солнечно-земных связей оценены и поняты пока явно недостаточно, особенно если речь идёт не о причинно-следственных аспектах, а о физических механизмах. Ниже на примере СКЛ мы приводим дополнительные свидетельства в пользу реального физико-химического воздействия ионизации на состояние земной атмосферы. Кроме хорошо изученных эффектов истощения озонового слоя, образования нитратов и космогенных изотопов, рассмотренных выше, необходимо отметить, в частности, возмущения в ГЭЦ, вариации параметров шумановских резонансов в волноводе «Земля-ионосфера» и ухудшение прозрачности атмосферы после вторжения потоков СКЛ. Статистически был выявлен также эффект воздействия СКЛ на завихрённость атмосферы в северном полушарии Земли...

Вклад ГКЛ и СКЛ, их относительная роль в цепочке солнечно-земных связей остаются пока недостаточно исследованными. Но важно подчеркнуть, что как раз наблюдения атмосферных эффектов СКЛ ставят проблему на реальную основу, особенно в части понимания физических механизмов наблюдаемых и ожидаемых (предполагаемых) эффектов. Для примера приведём данные о возмущениях в глобальной цепи атмосферного электричества после мощных солнечных вспышек. На рис.8.12 показано, как изменялась плотность электрического тока «воздух-Земля» над Южным полюсом по измерениям в стратосфере во время выдающего солнечного события 22 ноября 1977 г. (Cobb, 1978). Это почти классическое протонное событие было чётко зафиксировано в широком диапазоне энергий – от ~10 МэВ (на спутниках) до нескольких ГэВ (по наблюдениям на поверхности Земли, на нейтронных мониторах). Соответствующая вспышка в 09:45 UT с гелио-координатами N24°, W40° была умеренно-сильной (балл 2В), поток протонов с энергией >10 МэВ также был умеренным ($\geq 330 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{sr}^{-1}$), однако геофизические эффекты вспышки проявились достаточно наглядно. Например, типичное поглощение коротких радиоволн в полярной шапке (эффект PCA) началось уже в 11:00 UT, достигло максимума около 14:00 UT, затем продолжалось в течение 3.5 суток.

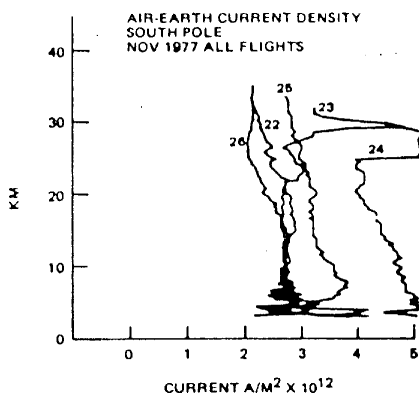


Рис.8.12. Вариации плотности электрического тока «воздух-Земля» по измерениям над Южным полюсом после вторжения в полярную стратосферу большого потока СКЛ от вспышки 22 ноября 1977 г. (Cobb, 1978).

Из рис.8.12 видно, что накануне вспышки плотность тока имела обычный высотный профиль, а уже 23 и особенно 24 ноября плотность тока резко возросла (примерно в два раза на высотах 25-30 км). Затем она стала довольно быстро уменьшаться и к 26 ноября вернулась практически к исходному (довспышечному) уровню. Ещё более детально было изучено поведение параметров ГЭЦ во время события 16 февраля 1984 г., когда удалось измерить одновременно полную проводимость атмосферы, вертикальное электрическое поле и вертикальную плотность тока (Holzworth *et al.*, 1987). Особенно чутко реагировали на вторжение СКЛ полная проводимость и величина вертикального тока. Особенно сильные флуктуации параметров электрического поля в стратосфере наблюдались во время большого протонного события 20 января 2005 г. В частности, было отмечено сильное увеличение вертикальной проводимости одновременно с резким возрастанием потока энергичных протонов у Земли. После максимума потока протонов в течение нескольких часов наблюдались также внезапные скачки величины вертикального электрического поля (Kokorowski *et al.*, 2006).

Из этих примеров видно, что воздействие СКЛ на цепь атмосферного электричества поддаётся обнаружению путём прямых наблюдений (измерений). Существуют, однако, эффекты СКЛ, которые могут быть выявлены только путём статистического анализа. К ним относятся, в частности, вариации параметров так называемых резонансов Шумана в волноводе, образуемом двумя проводящими оболочками – ионосферой и поверхностью Земли. Шумановские резонансы (ШР) – это резонансные электромагнитные волны в полости «Земля-ионосфера» с основной частотой около 8 Гц и модами более высокого порядка, разнесёнными примерно на 6 Гц. После их предсказания и теоретического обсуждения В. Шуманом (1952) они широко изучались в течение нескольких десятилетий. В настоящее время принято считать, что молниевые разряды от облака к поверхности Земли в процессах глобальной грозовой активности являются главными источниками возбуждения ШР.

Поскольку СКЛ, как мы видели, меняют условия проводимости в волноводе Земля-ионосфера, то во время солнечных протонных событий (СПС) следует ожидать заметных вариаций в параметрах ШР. Такие вариации действительно были обнаружены по наблюдениям во время двух больших СПС в октябре 1989 г. и марте 1991 г. На рис.8.13 представлены результаты анализа методом наложения эпох для 9 СПС 22-ого цикла солнечной активности (слева) и для 24 солнечных электронных событий (СЭС) за период

1994-1995 гг. (справа). Видно, что во время СПС параметры ШР (частота, затухание, амплитуда) колеблются примерно вдвое сильнее, чем во время СЭС.

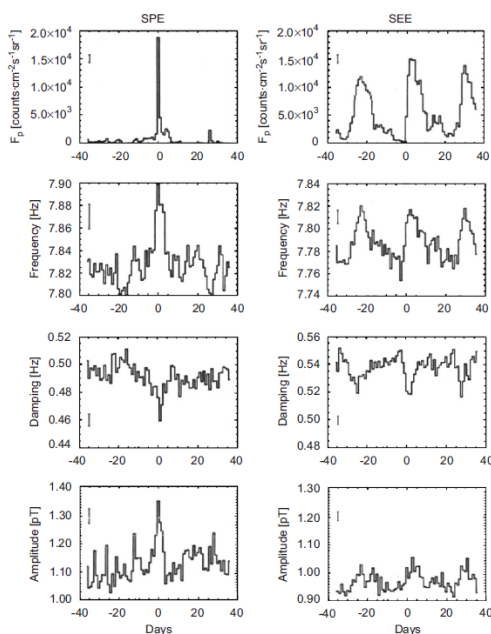


Рис.8.13. Вариации параметров шумановских резонансов в волноводе «Земля-ионосфера» во время солнечных протонных (слева) и электронных (справа) событий. Первый сверху ряд – потоки энергичных протонов и электронов; второй, третий и четвёртый ряды – частота, затухание и амплитуда ШР, соответственно (Schlegel and Fullekrug, 1999).

Метод наложенных эпох позволил также выявить изменения в поведении циклонических вихрей в атмосфере над Северной Атлантикой. Область Арктического фронта в Северной Атлантике вблизи юго-восточного побережья Гренландии является одним из наиболее циклоногенных мест земной атмосферы. Этот район уже давно представляет особый интерес для исследования солнечно-атмосферных связей как район интенсивного формирования и развития внетропических циклонов, которые сильно влияют на погоду средних широт. Ранее было показано, что циклоническая активность определённо подвержена воздействию различных гелио-геофизических явлений. Однако физический механизм, ответственный за эти воздействия, остаётся неясным. В частности, было выдвинуто предположение (см. выше), что циркуляция воздуха в нижней атмосфере может быть тесно связана с частицами СКЛ и ГКЛ с энергиями от ~ 0.1 до нескольких ГэВ. Недавно Веретененко и Тейль (2005), анализируя данные аэрологического зондирования, обнаружили значительное понижение атмосферного давления вблизи Арктического фронта Северной Атлантики, которое оказалось в корреляции с потоками солнечных протонов с энергией >90 МэВ (рис.8.14).

Для анализа вариаций давления и индекса завихрённости, предположительно связанных с вторжением потоков СКЛ было отобрано 48 СПС за период 1980-1996 гг. Были рассмотрены среднесуточные значения высоты геопотенциала для главных уровней давления в тропосфере (300 и 500 мб). Пунктирной линией на рис.8.14 показан средний уровень завихрённости по всем дням, а точечные линии соответствуют одной, двум и трём стандартным отклонениям σ . Видно отчётливое (выше 3σ) усиление относительной завихрённости вблизи побережья Гренландии во время СПС. Это может служить

свидетельством того, что вторжения СКЛ могут участвовать в генерации циклонов и её усиливать.

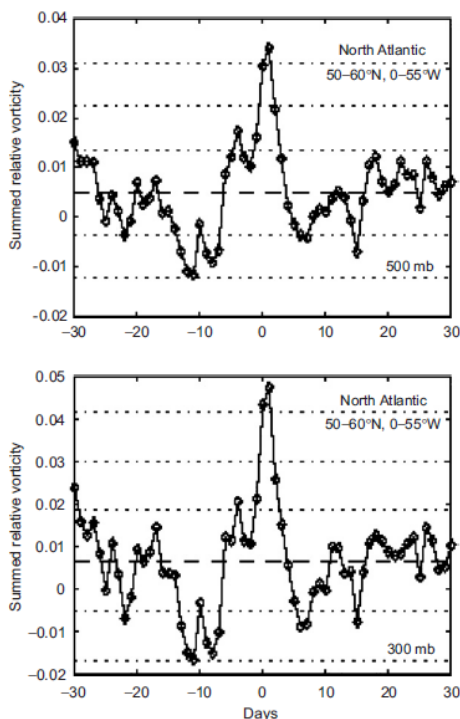


Рис.8.14. Средние значения сумм относительной «завихрённости» (в единицах с^{-1}) на различных высотах над Северной Атлантикой в зимние периоды 1980-1996 гг. во время солнечных протонных событий. Использованы данные для 48 СПС, в качестве нулевого дня выбран день начала события (Веретененко и Тейль, 2005).

Сложнее всего обстоит дело с подтверждением принципиально важного эффекта — изменения прозрачности атмосферы под действием космических лучей. Как было продемонстрировано многими исследователями, большие магнитосферные возмущения, связанные с солнечными вспышками, сопровождаются определёнными изменениями состояния нижней атмосферы. Как правило, возмущения атмосферы в своём развитии проходят две стадии. Начальная («ранняя») стадия сопровождается усилением зональной циркуляции и уменьшением температуры воздуха в высокоширотной стратосфере; «поздняя» стадия примечательна тем, что температура стратосферы увеличивается, а зональная циркуляция становится слабее.

После некоторых энергичных солнечных явлений (мощные вспышки, ударные волны, СМЕ) протонное событие и геомагнитное возмущение могут перекрываться во времени. В подобном случае эффекты от СКЛ и от магнитосферных электронов, высвобождаемых в во время геомагнитного возмущения, можно выделить и отличить друг от друга благодаря временной задержке геомагнитного возмущения относительно момента прихода солнечных протонов. Их основная масса приходит к орбите Земли спустя 1-10 часов в зависимости от энергии протонов, между тем как главная фаза геомагнитного возмущения наступает гораздо позже (обычно в пределах 24-36 часов после солнечного события). Как раз на этой второй стадии большую роль играют магнитосферные электроны.

Описанная выше общая физическая концепция влияния солнечной активности на нижнюю атмосферу и климат (рис.8.10) базировалась на обширных данных, накопленных,

в частности, российской сетью актинометрических станций. В комбинации с данными о глобальном распределении облачности, были найдены синхронные изменения плотности облачности после мощных солнечных вспышек. Отсюда, в противофазе с плотностью облачности, были найдены изменения солнечной инсоляции S_0 на поверхности Земли («метеорологической» солнечной постоянной). Далее авторы указанной концепции приняли во внимание, что космические лучи фактически являются единственным агентом, который управляется солнечной активностью и может влиять на физико-химические процессы в нижней атмосфере, включая изменения облачного покрова. Наконец, было выдвинуто предположение, что изменение потока солнечной энергии, поступающей в нижнюю атмосферу (т.е. изменчивость прозрачности атмосферы) обусловлена вариациями потоков СКЛ и ГКЛ, которые модулируются солнечной активностью.

При таких предпосылках группе М.И. Пудовкина в 1993-1997 гг. удалось найти некоторые наблюдательные свидетельства в пользу предлагаемой связи. Так, было показано, что первая стадия атмосферного возмущения после мощной солнечной вспышки обусловлена солнечными протонами с энергией $E > 90$ МэВ, тогда как вторая связана с форбуш-понижением потока ГКЛ. При этом оказалось, что при понижении потока ГКЛ солнечная инсоляция S_0 на поверхности Земли возрастает, т.е. атмосфера становится более прозрачной. Отсюда разумно предположить, что при вторжении дополнительного потока СКЛ должен иметь место противоположный эффект, т.е. уменьшение прозрачности. Методом наложения эпох некоторые свидетельства такого эффекта были получены (рис.8.15).

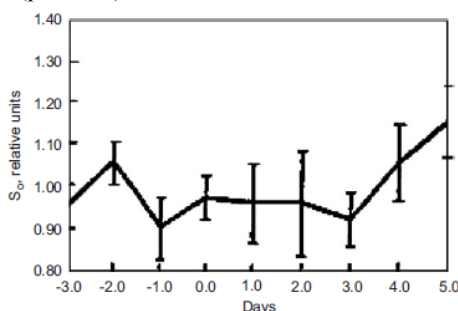


Рис.8.15. Вариации солнечной инсоляции S_0 («метеорологической» солнечной постоянной) на поверхности Земли во время солнечных протонных событий за период 1980-1980 гг. (Пудовкин и др., 1997). Точка $t = 0$ соответствует дню начала события; вертикальные линии показывают среднеквадратичные отклонения измеренных значений S_0 .

Трудность исследования ожидаемого атмосферного эффекта СКЛ состоит в том, что протоны с энергией $E > 90$ МэВ приходят в основном в полярные зоны Земли, где условия для актинометрических наблюдений не очень благоприятны. Поэтому первые попытки найти эффект (Ролдугин и Вашенюк, 1994) по данным обсерваторий Мурманск и Архангельск для 6 отдельных СПС привели к неопределённым результатам. М.И. Пудовкин и др. (1997), подвергли анализу актинометрические данные субавроральной обсерватории Оленёк (широта 68.5°). При этом были выделены пять интервалов длительностью 9 дней каждый, когда метеоусловия позволяли ежедневно измерять величину S_0 . За 1980-1984 гг. было выбрано 5 СПС, удовлетворяющих необходимым условиям. Как видно из рис.8.15, величина S_0 уменьшается на 5-10% в ходе протонного события. К сожалению, из-за малой статистики событий и большого разброса значений S_0 оказалось невозможным получить статистически значимую величину dS_0 . Тем не менее, тенденция S_0 к уменьшению в ходе события прослеживается достаточно отчётливо. Следует отметить, однако, что две последние точки на рис.8.15 выпадают из этой тенденции, вероятно, из-за недостаточного временного разрешения. Очевидно, по той же

причине двухступенчатая вариация прозрачности, упомянутая ранее, также не видна на данном рисунке.

Хотя приведенные результаты не являются достаточно убедительными, солнечные протонные события, скорее всего, вызывают эффект понижения атмосферной прозрачности, вероятно, в комбинации с вкладом других космофизических факторов во время геофизических возмущений. В этой связи упомянем серьёзные свидетельства того, что изменения плотности тока в ГЭЦ приводят к изменениям в свойствах облаков (Tinsley et al., 2004). Поскольку вторжение СКЛ определённо вызывает усиление вертикального электрического тока через атмосферу, то вполне разумным выглядит предположение о том, что воздействие СКЛ на облака реализуется в промежуточной форме через ГЭЦ. Таким образом, вклад СКЛ и ГКЛ в систему солнечно-земных связей следует признать весьма важным, по крайней мере, как часть физического механизма, который определённо влияет на количество солнечной энергии, поступающей в нижнюю атмосферу. Вместе с тем, было бы заведомым преувеличением приписывать космическим лучам слишком большую роль в иерархии возможных физических агентов в системе «Солнце-Земля» (глава 9).

9. ИЕРАРХИЯ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Невозмутимый строй во всем,
Созвучье полное в природе, -
Лишь в нашей прозрачной свободе
Разлад мы с нею сознаем.
Ф.И. Тютчев

Энергия солнечных возмущений на сложном пути от Солнца к Земле проходит через межпланетную среду и несколько невидимых земных оболочек - магнитосферу, ионосферу и атмосферу. Этим объясняется одна из главных особенностей системы солнечно-земных связей (СЗС) - их «многоэтажность» (опосредованность). Иными словами, в цепочке физических процессов, связывающих Солнце с Землёй, имеется определённая структура, последовательность во времени и пространстве, т.е. существует своеобразная иерархия СЗС. Это неизбежно приводит к другой важнейшей особенности – нелинейному характеру солнечно-магнитосферных, солнечно-атмосферных и солнечно-биосферных связей. Простейшая схема СЗС приведена на рис.9.1.

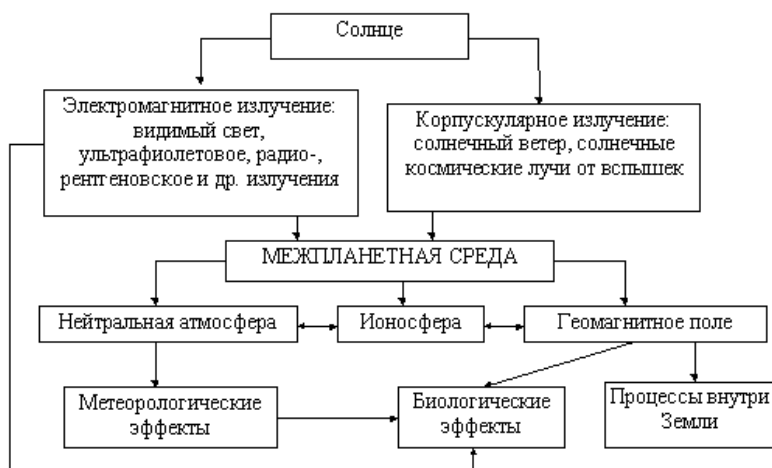


Рис.9.1. Простейшая схема солнечно-земных связей

Среди основных эффектов в цепочке солнечно-земных связей, на наш взгляд, следует выделить, прежде всего, влияние на магнитосферу и ионосферу, солнечно-тропосферные связи и гелиобиологию (Солнце и биосфера). Определённый интерес представляет влияние солнечной активности на вращение Земли (Солнце и литосфера). Принципиально важен вопрос о возможном воздействии резонансной структуры Солнечной Системы на солнечную активность и солнечно-планетные связи в целом. Наконец, фундаментальное значение имеют энергетический и информационный аспекты солнечно-земных связей (теории и модели физических механизмов).

Из содержания предыдущих глав ясно, насколько многогранна и богата физическими идеями проблема солнечно-земных связей и солнечно-земная физика в целом. В рамках небольшого учебного пособия невозможно сколько-нибудь подробно изложить даже основные результаты исследований, наблюдений и экспериментов. Поэтому ниже мы приведём лишь отдельные, наиболее яркие примеры выявленных связей, уделяя основное внимание их возможным физическим механизмам.

9.1. Экстремальные солнечные события и магнитные бури

Начнём наше рассмотрение с наиболее известных солнечных и геофизических возмущений – мощных солнечных вспышек и больших магнитных бурь. Совсем недавно выяснилось (благодаря анализу старых магнитных данных), что 2 сентября 1859 г. была зарегистрирована магнитная буря, которая оказалась самой большой за всю историю инструментальных наблюдений. Её причиной была исторически первая наблюдавшаяся солнечная вспышка 1 сентября 1859 г. Эта вспышка, как теперь ретроспективно полагают, сопровождалась выбросом мощного магнитного облака (СМЕ), которое и стало непосредственной причиной бури с рекордным понижением геомагнитного индекса $D_{ST} \approx -1760$ нТ (об индексах геомагнитной возмущённости см. раздел 9.3). Эта величина согласуется с уменьшением горизонтальной составляющей геомагнитного поля $\Delta H = 1600 \pm 10$ нТ на обсерватории Колаба (Индия) в местный полдень (рис.9.2). Во время бури были отмечены искрения в аппаратах телеграфной связи в Европе, Америке и Австралии. Среди других геофизических эффектов в этом событии наблюдались также обширные полярные сияния, причём на довольно низких широтах (например, на Гавайских островах и в Сантьяго, Чили).

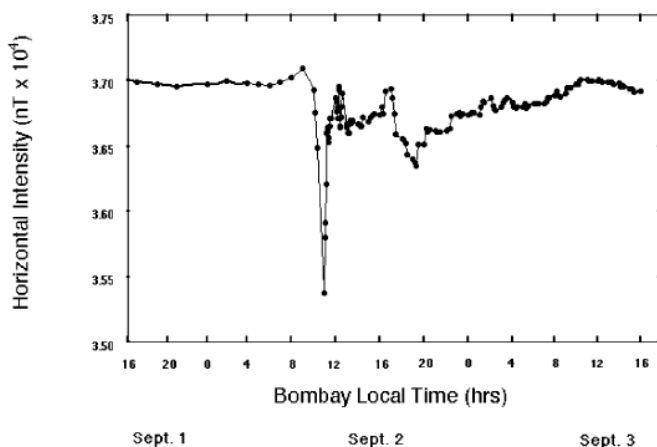


Рис.9.2. Магнитограмма, полученная во время исторического гелио-геофизического возмущения 1-2 сентября 1859 г. на обсерватории Колаба (Бомбей, Индия). Tsurutani *et al.*, 2003.

По современным оценкам (например, Tsurutani *et al.*, 2003), энергия вспышки 1 сентября 1859 г. и скорость соответствующего СМЕ были крайне большими, но не уникальными. В наше время иногда регистрируются другие энергичные события (они получили название «экстремальных») с более высокими параметрами, так что буря такого порядка может случиться вновь. По своим характеристикам экстремальные события (вспышки, бури и т.п.) находятся на высокоэнергичных «хвостах» их энергетическим распределений. Эмпирические данные для таких энергичных «хвостов», однако, являются чрезвычайно скудными (отрывочными), так что форма хвостовых распределений не может быть достоверно установлена. Следовательно, и вероятности появления подобных энергичных событий не могут быть оценены с какой-либо разумной точностью. Кроме того, пока остаются неясными «механизмы насыщения» для экстремальных событий (ЭС), т.е. нет достаточного понимания физических процессов, лежащих в основе наиболее мощных вспышек, бурь и т.п. Солнце и магнитосфера имеют конечные размеры, магнитные поля на Солнце и в магнитосфере также ограничены, так что какой-то «эффект обрезания» при энерговыведении должен иметь место. Даже если можно теоретически показать, что ЭС подчиняются логнормальному распределению, то отсюда ещё не

следует, возможны или нет, скажем, вспышки с энергией $>10^{34}$ эрг или магнитные бури с $D_{ST} < -1760$ нТ.

Следует признать, что эмпирическая статистика для экстремальных солнечных вспышек (ЭСС) с энергией $>10^{32}$ эрг и экстремальных магнитных бурь с $D_{ST} < -400$ нТ остаётся довольно скудной. Хвосты их распределений остаются по существу неизвестными, так что уверенно можно строить распределения только для вспышек и бурь в области умеренных и малых энергий, где количество наблюдаемых событий статистически значимо. Во всяком случае, согласно недавним исследованиям (Kane et al., 1995), установленный ранее канонический «верхний предел» для вспышек $\sim 10^{32}$ эрг может быть нарушен «с большим запасом». Это было продемонстрировано на примере гигантской вспышки 1 июня 1991 г. балла $>X12$. Её полная энергия могла составить от $\leq 2 \times 10^{33}$ до $\sim 10^{34}$ эрг, в зависимости от предполагаемого механизма энерговыделения (нетеплового или теплового). Ресурсы одной активной области (АО) представляются уже недостаточными для генерации такой огромной энергии. Поэтому авторы не исключают, что подобная вспышка может быть связана уже не только с локальной, но и глобальной триггерной нестабильностью короны. С другой стороны, недавно была предложена интересная эмпирическая методика для оценки вероятности больших солнечных вспышек (Ишков, 1998, 1999). Методика опирается на определённый физический параметр – скорость изменения (всплывания) нового магнитного потока. Если величина потока достаточно велика ($\sim 10^{13}$ Вебер), а скорость его изменения превышает 10^9 Вебер/с, то в данной АО с большой вероятностью можно ожидать больших вспышек. Параметры, включённые в предлагаемую методику (площадь АО, изменение конфигурации пятен, поведение их полярности и др.) вполне доступны наблюдениям.

Таким образом, для проверки ряда гипотез о механизмах генерации экстремальных солнечных событий (ЭСС) уже имеются серьёзные наблюдательные предпосылки. Вместе с тем, до чёткого понимания физических механизмов ЭСС, по-видимому, ещё далеко. Уже более двух десятилетий продолжается дискуссия об относительной роли вспышек и СМЕ в геофизических возмущениях, о методах их предсказания, а отсюда – и о механизмах их генерации на Солнце. Исследования показывают, что однозначной связи между мощностью вспышек, скоростью и величиной магнитного поля СМЕ, и интенсивностью последующей магнитной бури (МБ), по-видимому, нет. Однако исследователи МБ определённо сходятся во мнении, что наиболее сильные магнитные бури связаны действительно связаны с мощными солнечными вспышками. Это означает, что сильные МБ и большие вспышки имеют общую причину – магнитное пересоединение на Солнце.

Что касается частоты подобных событий, то время наших инструментальных наблюдений солнечной активности пока сильно ограничено (150-250 лет). Поэтому нет полной уверенности в том, что нам уже удалось зафиксировать какое-то ЭС (вспышку или бурю) на пределе его «насыщения». Может ли Солнце генерировать вспышки с энергией на уровне $\sim 10^{38}$ – 10^{39} эрг? Скорее всего – нет!.. Однако энергия $\sim 10^{35}$ эрг представляется достижимой для нашего Солнца. Ясно одно: эффекты последующей экстремальной магнитной бури (ЭМБ) могут быть катастрофическими. Теперь мы перейдём к описанию статистических свойств и физических характеристик другого выдающегося явления в системе солнечно-земных связей – магнитной бури (МБ).

9.2. Основные характеристики магнитных бурь

Магнитные бури представляют собой сильные возмущения магнитного поля Земли, резко нарушающие плавный суточный ход элементов земного магнетизма. Бури наблюдаются одновременно на всей Земле. В низких и средних широтах изменения магнитного поля бури в среднем составляют: для индукции $\delta B = (1-2) \times 10^{-7}$ Тл, для напряжённости $\delta H = (0.08-0.16)$ А/м. Максимальные значения их соответственно равны 5×10^{-7} Тл и 0.4 А/м. С ростом геомагнитной широты амплитуды магнитных возмущений

увеличиваются и достигают наибольших значений в авроральной зоне (62-67° геомагнитной широты) Продолжительность МБ различна: от нескольких часов до нескольких суток. Количество бурь зависит от солнечной активности, оно растёт с увеличением СА. В течение одного месяца может наблюдаться от 0 до 8 МБ. По степени интенсивности МБ подразделяются на очень большие, большие, умеренные и малые. Чем больше интенсивность МБ, тем реже она наблюдается.

Хотя ни одна буря не повторяет другую, магнитные бури обнаруживают общие характерные черты. На рис.9.3 приведен пример «классической» магнитной бури со всеми особенностями и элементами её временной структуры: **1. Внезапное начало** магнитной бури SC (Sudden Commencement), или SSC - Sudden Storm Commencement. Некоторые бури начинаются внезапным возрастанием горизонтальной компоненты H на 15-20 нТл на всей Земле за время 1-2 мин. **2. Начальная фаза.** В пределах 1 ч после SC H -компонента возрастает и остаётся на уровне 30-50 нТл больше, чем до бури. Во многих бурях начальная фаза отсутствует. **3. Главная фаза.** Непрерывное уменьшение H обычно на 100-200 нТл в течение нескольких часов. **4. Фаза восстановления.** После достижения минимального значения H -компонента медленно, приблизительно экспоненциально, возвращается к норме. **5. Нерегулярные флуктуации.** Наблюдаются по всем трём компонентам МБ. Они обладают широким спектром периодов: от долей минуты до нескольких часов (~3 ч).

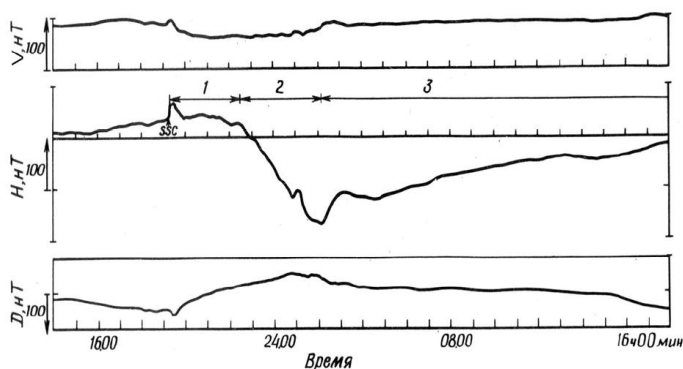


Рис.9.3. Типичная вариация в геомагнитном поле во время магнитной бури, наблюдавшаяся 5-6 июня 1967 г. (время всемирное) на среднеширотной обсерватории Гонолулу (Гавайские о-ва, геомагнитная широта 21° с.ш.): 1 - начальная фаза; 2 - главная фаза; 3 – фаза восстановления.

Характеристики 3-5 могут повторяться несколько раз в различном виде (сильнее или слабее, с чередованием). В высоких геомагнитных широтах такие повторения проявляются в виде полярных магнитных суббурь. В низких геомагнитных широтах они видны в резких уменьшениях аperiодической вариации (индекса D_{ST}). На всех фазах бури наблюдаются специфические геомагнитные пульсации.

Магнитосфера Земли представляет собой «тупое препятствие» для плазмы солнечного ветра (рис.9.4). При сверхзвуковом обтекании этого препятствия в его лобовой части (в подсолнечной области) на расстоянии около 10-12 земных радиусов R_E образуется стоячая ударная волна (**bow shock**). В антисолнечном направлении силовые линии магнитосферы вытягиваются в форме «хвоста» (**magnetotail**), который можно проследить до расстояния около $1000R_E$. Внешняя граница магнитосферы называется магнитопаузой (**magnetopause**) и может иметь толщину 100-200 км. Положение магнитопаузы зависит от плотности потока (количества движения) частиц солнечного ветра. В отдельные сильно возмущённые периоды она может приближаться до расстояний 6.6-8.0 земных радиусов.

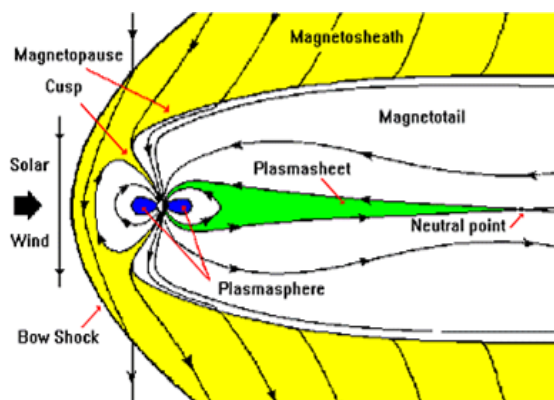


Рис.9.4. Идеализированная двумерная (плоская) модель земной магнитосферы и простейшая схема её обтекания солнечным ветром.

Область, окружающая магнитопаузу, содержит плазму солнечного ветра после ударной волны и называется магнитослоем (**magnetosheath**), или переходной областью. Геомагнитное поле на высоких широтах имеет довольно сложную структуру. Наиболее примечательная особенность полярной магнитосферы – это полярные углубления - каспы (**cusp**). Касп представляет собой воронкообразную область слабого магнитного поля вокруг нейтральной точки, где вдоль силовых линий геомагнитного поля становится возможным прямое проникновение солнечного ветра вплоть до верхней атмосферы. Размер полярного каспа с дневной стороны – от 2 до 5°, или ≈ 1200 км в его верхней части и 12 км – у поверхности Земли. С ночной стороны имеется другая область, которую называют полярным каспом в хвосте магнитосферы. Этот касп очерчивает границу овала полярных сияний в ночном секторе. Между этими двумя каспами расположена область, называемая полярной шапкой (**polar cap**).

На ночной стороне магнитосферы имеется обширный плазменный слой (**plasmasheet**), который имеет особую нейтральную точку (**neutral point**), где происходит пересоединение силовых линий северного и южного полушарий Земли. Ближе всего к поверхности Земли, над ионосферой, примерно на высоте ≥ 1000 км, находится плазмосфера (**plasmasphere**) - область холодной плазмы ионосферного происхождения с высокой плотностью. Она простирается до $3R_E$ (а иногда – и до $7R_E$). В этой области силовые линии дипольного магнитного поля и находящаяся на них плазма вращаются вместе с Землёй.

Кроме плазмосферы, в ловушке, создаваемой геомагнитным полем, эффективно удерживается небольшая группа очень энергичных частиц, образующих радиационные пояса (**radiation belts**) Земли (РПЗ). РПЗ были открыты в 1958 г.: внутренний пояс протонов – в экспериментах на американских ИСЗ *Explorer-1*, -3, внешний электронный пояс – в экспериментах на третьем советском спутнике. РПЗ состоят, в основном, из электронов и протонов с энергией от ~ 100 кэВ до нескольких сотен МэВ. Эти энергичные частицы имеют весьма разнообразное происхождение - солнечный ветер, ГКЛ и СКЛ, аномальная компонента ГКЛ и даже ионосфера Земли (подробнее см. раздел 9.3). Частицы РПЗ заполняют практически всю область дипольного/квазидипольного магнитного поля в магнитосфере Земли.

С точки зрения физики магнитных бурь важно то, что эти частицы как раз и служат основой механизма МБ. Возмущения магнитосферы, как известно, обусловлены вариациями потоков солнечной плазмы из активных областей Солнца. Впереди усиленного потока солнечного ветра идёт межпланетная ударная волна. Если она достигает магнитосферы Земли, то это проявляется в виде внезапного начала МБ SSC.

Сжатие магнитосферы проявляется на Земле в виде начальной фазы МБ. Ответной реакцией магнитосферы является усиление так называемого кольцевого тока и, как следствие, – уменьшение горизонтальной составляющей геомагнитного поля на средних и низких широтах.

Кольцевой ток существует даже в спокойные периоды (без бури) благодаря дрейфу захваченных протонов с энергиями в десятки-сотни кэВ. Этот спокойный кольцевой ток течет на расстоянии от 2,5 до 4 R_E . Он представляет собой эффективный ток, создаваемый протонами, дрейфующими к западу, и электронами, дрейфующими к востоку в дипольном поле Земли. Дрейфовое движение происходит главным образом благодаря градиентной силе ΔB и проявляется как направленный к западу ток.

Типичное уменьшение от десятков нТ до ~ 200 нТ продолжается от нескольких часов до суток и более. Величина D_{ST} -индекса довольно точно представляет интенсивность главной фазы бури. Уменьшение поля в главной фазе объясняется усилением спокойного кольцевого тока. Недавними спутниковыми экспериментами твердо установлено, что кольцевой ток существует на расстояниях от 3-5 R_E в течение главной фазы. Это происходит из-за проникновения в магнитосферу новых частиц или ускорения имеющейся в ней плазмы до энергий порядка тысяч эВ. Эти процессы, в свою очередь, обусловлены пересоединением силовых линий межпланетного и геомагнитного полей и флуктуациями размеров магнитосферы при взаимодействии с усиленным потоком солнечной плазмы. В результате внутри магнитосферы формируется кольцевой ток бури. Усиленный ток, текущий в западном направлении, порождает магнитное поле, направленное противоположно геомагнитному, и таким образом ослабляет его (главная фаза МБ).

При этом магнитное поле кольцевого тока почти полностью компенсирует эффект сжатия на границе магнитосферы. По оценке А. Ковтюха (МГУ), эффект сжатия реальной геомагнитосферы у поверхности Земли ослабляется почти в 10 раз. Тем самым кольцевой ток служит своеобразным буфером: он уменьшает эффект «космической бури», защищая Землю и её биосферу от резких скачков магнитного поля. Если бы не кольцевой ток, биологическим системам пришлось бы приспосабливаться к гораздо менее комфортным, быстро меняющимся условиям резких перепадов магнитного поля, атмосферного давления и погоды. В этом смысле можно говорить даже об экологическом значении кольцевого тока в период магнитных бурь.

Фаза восстановления геомагнитных бурь связана с распадом кольцевого тока, т.е. с началом диффузии захваченных частиц в магнитосфере. Основные механизмы потери частиц - кулоновское рассеяние и зарядовый обмен протонов с нейтральным водородом: т.е. реакции типа $H^+ + H \leftrightarrow H + H^+$. Для объяснения как распада тока, так и микропульсаций, наблюдаемых во время существования кольцевого тока, недавно были привлечены различные плазменные неустойчивости. Резкие изменения магнитосферно-ионосферных токовых систем проявляются на поверхности Земли в виде нерегулярных магнитных возмущений.

Магнитосферные бури связаны с корональными выбросами масс (СМЕ) и солнечными вспышками, и вызываются поступлением высокоскоростной солнечной плазмы (см. раздел 3.4) и связанной с ней ударной волны (УВ) в окрестность Земли. Некоторые геомагнитные бури имеют 27-дневную повторяемость из-за возвращения активных солнечных областей после оборота Солнца. Магнитные бури имеют ярко выраженную 11-летнюю зависимость и в годы минимума солнечной активности практически отсутствуют.

Для более полного понимания физики магнитосферы следует отметить, что МБ является составной частью комплексного геофизического процесса – **магнитосферной бури**. Это понятие включает в себя собственно магнитную бурю, магнитосферные суббури, а также **полярные сияния (aurora polaris)**, ионосферные возмущения, рентгеновское и низкочастотное излучения. Из этих глобальных геофизических возмущений, как известно, наиболее эффектно проявляются полярные сияния (рис.9.5).

По своей природе полярные сияния – это оптическое свечение верхних слоев атмосферы (в основном, возбуждённых атомов азота и кислорода) при её бомбардировке авроральной радиацией – потоками частиц из авроральной магнитосферы с энергией от сотен эВ до сотен кэВ. Эти частицы ускоряются во время магнитосферных суббурь. Некоторая доля этих частиц, высыпаясь в атмосферу, и вызывает полярные сияния.

Установлено, что форма полярных сияний и их динамика находятся в тесной связи со специфическими электродинамическими явлениями, происходящими в магнитосфере, – магнитосферными суббурями. Во время суббурь магнитосфера приходит в неустойчивое состояние. Возвращение в состояние с меньшей энергией носит взрывной характер и сопровождается высвобождением за 1 ч энергии $\sim 10^{22}$ эрг, что и вызывает свечение атмосферы (авроральную суббурю).

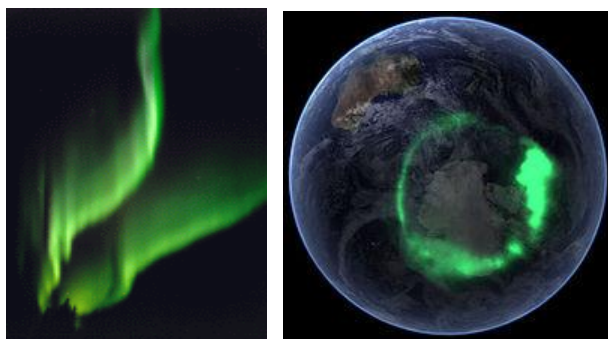


Рис.9.5. Слева – фотография типичного полярного сияния. Справа - овал полярных сияний над Антарктидой по наблюдениям над южной полярной шапкой 11 сентября 2005 г. с борта ИСЗ IMAGE (NASA). В верхнем левом углу видна Австралия.

Авроральная магнитосфера – это область магнитосферы Земли, проектирующаяся на зону полярных сияний, или **авроральную зону**. Термин «**суббуря**» был введен в 1961 г. С.-И. Акасофу для обозначения возмущений длительностью ~ 1 ч как раз в зоне сияний. В авроральной магнитосфере динамическая конкуренция магнитных полей земного диполя и внешних источников создает условия для развития взрывных неустойчивостей – магнитосферных суббурь. Таким образом, полярные сияния являются результатом сложного взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем.

При взаимодействии быстрых электронов с атомами и молекулами атмосферы генерируется рентгеновское тормозное излучение электронов. Тормозные фотоны с энергией свыше 20 кэВ проникают в атмосферу на высоту 25-30 км. Полярные сияния испускают также **инфразвуковые волны** с периодами от 10 до 100 сек, которые сопровождаются колебаниями атмосферного давления с амплитудой от 1 до 10 дин/см².

Во время МБ возникают значительные помехи в коротковолновой связи, происходит разогрев верхней атмосферы с передачей теплоты вниз, в тропосферу, что способствует развитию в ней циркуляционных движений и возникновению циклонов. Некоторые частоты геомагнитных пульсаций близки к частотам сердечных сокращений, поэтому они во время МБ могут отрицательно влияют на состояние больных (см. главу 10).

9.3. Энергетика магнитосферы

В этом разделе мы обсудим вопросы, связанные с энергетикой магнитной бури. Главный интерес в этой проблеме представляют механизм и скорость поступления энергии солнечного ветра внутрь магнитосферы, а также роль отдельных компонент межпланетного магнитного поля в процессах передачи энергии солнечных возмущений

магнитосфере. По имеющимся оценкам, средняя скорость (мощность) поступления энергии солнечного ветра в магнитосферу составляет около 3×10^{18} эрг/с = 3×10^{11} Вт. При этом полная энергия большой магнитной бури может достигать 2×10^{24} эрг (напомним, для сравнения, что при большой солнечной вспышке выделяется полная энергия $\sim 2 \times 10^{32}$ эрг).

Сложность проблемы при взаимодействии «солнечный ветер-магнитосфера» состоит в том, что магнитосфера может отбирать только часть энергии, поступающей от солнечного ветра. Иными словами, необходимо решить двоякую задачу – найти эффективный физический механизм, а также оценить его к.п.д. - коэффициент передачи энергии. Ниже мы рассматриваем наиболее важные физические гипотезы и эмпирические факты, дающие общие представления о геоэффективности солнечного ветра.

Поток кинетической энергии солнечного ветра, падающий на одно полушарие Земли в отсутствие магнитного поля, естественно описывать формулой (Olsson *et al.*, 2004):

$$W_{sw} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \rho V_{sw}^3 \right) (\pi R_E^2) \quad (9.1)$$

где V_{sw} – скорость солнечного ветра; R_E – средний радиус Земли (6371 км); ρ – массовая плотность частиц в солнечном ветре. В этой формуле первый множитель $\frac{1}{2}$ появился из-за того, что рассматривается только одно полушарие; поток энергии определяется только параметрами солнечного ветра, а величина межпланетного магнитного поля (ММП) явно не входит. До последнего времени параметр W_{sw} не часто использовался при обсуждении энергетики магнитосферы. Однако, как недавно выяснилось путём численного МГД-моделирования (Palmroth *et al.*, 2004), он довольно хорошо коррелирует с полной энергией, поступающей в ионосферу, для тех случаев, когда вариации передачи энергии подчиняются параметрам плазмы солнечного ветра, а не изменениям направления ММП. Может показаться странным, что масштабом длины в определении W_{sw} является земной радиус. Хотя размеры планеты Земля, казалось бы, не должны иметь большого значения при определении количества энергии солнечного ветра, поступающей в магнитосферу, они важны при определении количества энергии, поступающей в ионосферу, поскольку «площадь контакта» Земли с её плазменным окружением пропорциональна R_E^2 . Используя параметр W_{sw} , можно обсудить интересный вопрос: служит ли средний чистый эффект магнитосферы (**the average net effect?**) только для защиты Земли от потока энергии солнечного ветра, или же он предназначен скорее действовать как «антенна» и усиливать получаемую входную энергию?

С другой стороны, ещё в 1981 г. для описания эффективной энергетической связи между солнечным ветром и магнитосферой С.-И. Акасофу предложил использовать эмпирический эpsilon-параметр:

$$\varepsilon = 4\pi l_0^2 \mu_0^{-1} V_{sw} B^2 \sin^4(\theta/2) \quad (9.2)$$

где $l_0 = 7R_E$ – эффективный радиус магнитосферы; B – модуль межпланетного магнитного поля (ММП); μ_0 – безразмерная магнитная проницаемость среды; θ есть угол поворота ММП относительно плоскости эклиптики. Он определяется как полярный угол между направлением ММП в проекции на плоскость y - z и осью z в системе GSM (Geocentric Solar Magnetospheric System). В декартовых координатах можно разложить вектор ММП на три составляющие (4.4). Тогда соответствующие выражения для компонент ММП и угла θ примут вид:

$$B_r^2 = B_y^2 + B_z^2 \quad \theta = \tan^{-1}(B_y/B_z) \quad (9.3)$$

и теперь в формуле (9.2) вместо модуля B межпланетного поля можно использовать величину его поперечной составляющей V_{tr} . Из (9.2)-(9.3) видно, что параметр Акасофу

проявляет зависимость от соотношения всех трёх компонент ММП. Как выяснилось недавно, особая роль в передаче энергии принадлежит B_z -компоненте ММП (см. ниже). Параметром ϵ пользуются довольно часто, и во многих случаях он даёт разумную оценку полной энергии, поступающей внутрь магнитосферы. Вместе с тем, ряд исследователей считают, что следует принимать во внимание вязкое взаимодействие (трение) между солнечным ветром и магнитосферой. Расходуемую при этом некоторую долю энергии нужно затем учитывать при оценке полного энергетического баланса магнитосферы. Предпринимались также усилия найти другие параметры, которые при описании передачи энергии дают лучшую корреляцию с авроральными измерениями. Однако этот путь не привёл к более точной оценке величины передаваемой энергии.

Геоэффективность солнечного ветра, т.е. эффективность передачи его энергии в магнитосферу Земли максимальна при отрицательной (южной) ориентации и при больших величинах B_y . Физическая суть эффекта состоит в том, что южная B_y -компонента вызывает магнитное пересоединение с геомагнитным полем в дневной области магнитопаузы. Это, в свою очередь, приводит к быстрой инжекции магнитной энергии и частиц внутрь магнитосферы. Если ситуация с $B_y < 0$ сохраняется больше 30-60 минут, можно с большой вероятностью ожидать развития магнитосферной суббури. Южная компонента ММП B_y вызывает усиление крупномасштабного электрического поля конвекции, направленного на запад поперек хвоста магнитосферы, что сопровождается усиленной накачкой энергии в магнитосферу. Типичная величина B_y , эффективная для развития суббури, составляет от 4 до 8 нТ. Во время сильных магнитных бурь в высокоскоростных потоках солнечного ветра B_y возрастает на порядок. В связи с этим упомянем ещё одну трудность, связанную с оценкой геоэффективности возмущений солнечного ветра различного масштаба.

Само название «высокоскоростной поток» указывает на то, что о свойствах потока судят, преимущественно, по такой характеристике, как его скорость V . Плотности при этом отводится второстепенная роль, поскольку динамическое давление солнечного ветра $D = m_p n V^2$ (m_p - масса протона; n – концентрация протонов) пропорционально квадрату скорости. Параметру D уделяется большое внимание, поскольку известно, что начала магнитных бурь ассоциируются с резкими изменениями динамического давления. В спокойном солнечном ветре скорость $V \sim 250 \div 400$ км/с, $n \approx 1 \div 10$ см⁻³, а в основном теле высокоскоростного потока n бывает даже ниже своего среднестатистического значения. Из этого обычно делается вывод о том, что скорость вносит главный вклад как в величину, так и в изменение динамического давления солнечного ветра. По этой причине для анализа геоэффективности набегающего потока солнечного ветра, помимо параметра D , часто используют параметр Акасофу - величину потока поступающей энергии (9.2), в которую плотность просто не входит. Однако детальный анализ плазменных данных за 1995 г. (минимум солнечной активности) и 2000 г. (максимум активности) показал, что роль плотности солнечного ветра сильно преуменьшена (Хабарова, 2003).

Действительно, коэффициент корреляции между концентрацией протонов солнечного ветра и его динамическим давлением за 1995 г. оказался в десять раз больше, чем между скоростью (или квадратом скорости) и динамическим давлением. Для года максимума солнечной активности обнаружено, что влияние изменений плотности на динамическое давление осталось таким же; влияние скорости возросло, но оно все равно существенно меньше связи между n и D . Коэффициент корреляции между плотностью и скоростью меньше, но обратная зависимость между n и V сохраняется и для года максимума 11-ти летнего цикла. Таким образом, основной вклад в величину динамического давления вносит скорость, но изменения D определяются преимущественно его плотностью, а не скоростью.

Для описания уровня магнитной возмущённости на Земле к настоящему времени разработана сложная система индексов, каждый из которых характеризует флуктуации геомагнитного поля различных временных масштабов. В частности, уже упоминавшийся

индекс магнитной бури D_{ST} (в единицах нТ, часовой или суточный) представляет собой максимальное отклонение горизонтальной компоненты от спокойного уровня на контрольной цепочке из четырёх геомагнитных станций: Гонолулу, Сан-Хуан (США), Какиока (Япония), Херманус (Южная Африка). Эти обсерватории равномерно распределены по долготе и не подвергаются воздействию авроральной и экваториальной электроструй. Этот индекс является одним из наиболее популярных при исследовании эффектов космической погоды.

Локальные возмущения в авроральной зоне характеризуются индексом K ; он пропорционален суммарной мощности магнитного возмущения на данной магнитной станции за трехчасовой интервал суббури. Глобальный индекс K_p и производный от него эквивалентный амплитудный индекс A_p (в единицах нТ) используются для оценки геомагнитной активности в авроральной зоне в целом. Планетарный индекс K_p выводится из K -индексов нескольких специально отобранных магнитных обсерваторий. K -индекс основан на полулогарифмическом масштабе и подбирается таким образом, чтобы наибольшие и наименьшие значения вариации магнитного поля на данной станции были представлены соответственно величинами $K = 9$ и $K = 0$. Трёхчасовой K_p -индекс получается осреднением K -индексов, измеренных на 12 обсерваториях. Приблизительная связь между индексами K_p и A_p задается Таблицей 9.1.

Таблица 9.1. Эмпирическая связь между двумя основными индексами (K_p и A_p) магнитной активности.

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

С 1972 г. в геомагнетизме и солнечно-земной физике используется новый индекс Майо (Mayaud, 1972), который включает эффекты суточных и годовых вариаций геомагнитного поля. Он обозначается aa и определяется как среднее из трёхчасовых K -индексов, преобразованных в амплитуду поля, для двух антиподальных обсерваторий – Гринвич и Мельбурн. Они располагают данными, начиная с 1867 г. Индекс aa оказался наилучшим для изучения долгопериодных вариаций геомагнитного поля.

9.4. Динамика захваченной радиации в магнитосфере Земли

Некоторые особенности физики солнечно-земных связей можно наглядно увидеть на примере радиационных поясов Земли. К настоящему времени удалось установить, по крайней мере, основные источники частиц в радиационной оболочке Земли. Вскоре после обнаружения РПЗ (1958 г.) исторически первой возникла гипотеза об «альбедном» происхождении частиц в поясах. Действительно, при взаимодействии протонов и ядер ГКЛ с атмосферой рождаются многочисленные вторичные частицы, в том числе быстрые нейтроны. Часть нейтронов летит вверх и при распаде рождает электроны и протоны, которые захватываются геомагнитной ловушкой. Этот механизм и называют альбедным. Он вносит основной вклад в потоки протонов с $E > 20\text{--}30$ МэВ и электронов с $E \sim 0.1\text{--}1$ ГэВ внутреннего РПЗ.

Значительно позже, когда стали известны многие детали взаимодействия «солнечный ветер-магнитосфера», выяснилась возможность проникновения частиц солнечного ветра внутрь магнитосферы (через полярные каспы). Тогда и было показано, что большинство частиц РПЗ имеет солнечное происхождение; ранее они входили в состав солнечного ветра. Ускорение частиц до значительных энергий происходит уже в самой магнитосфере. Кроме того, на границах диапазонов по E и L , в которых существуют РПЗ, значительный вклад вносится другими источниками (подробнее см. М.И. Панасюк, 2006).

В частности, определённый вклад в потоки высокоэнергичных ионов с $Z > 1$ РПЗ на $L = 2-3$ вносят аномальные космические лучи, состоящие из однократно заряженных ионов с $E/M_i \sim 10-20$ МэВ (Adams *et al.*, 1991). На малых высотах они попадают в плотные слои экзосферы, теряют электроны и становятся захваченными. Протоны СКЛ с $E > 1$ МэВ, рождённые во время солнечных вспышек, захватываются в геомагнитную ловушку на $L \sim 7-8$ и также входят в состав РПЗ. В диапазоне до нескольких сотен кэВ, примыкающем к кольцевому току, нужно учитывать ионосферный источник (ускоренные ионосферные ионы). Таким образом, фактически РПЗ представляют собой открытую динамическую систему, которая взаимодействует как с внешними факторами, так и с «подстилающей поверхностью» в виде ионосферы...

Механизм захвата частиц в геомагнитную ловушку можно иллюстрировать рис.9.6 для случая, когда частицы (космические лучи) попадают в магнитосферу извне. Видно, что частицы высокой энергии (1) движутся по сравнительно простым орбитам. Из-за присутствия твёрдого тела Земли некоторые траектории заканчиваются (прерываются) на земной поверхности. С уменьшением энергии (жёсткости) частиц их орбиты становятся более сложными и образуют промежуточные петли. Если петли пересекают поверхность Земли, то их траектории также прерываются. При малых энергиях частицы имеют замкнутые траектории (15), т.е. оказываются захваченными в магнитосфере.

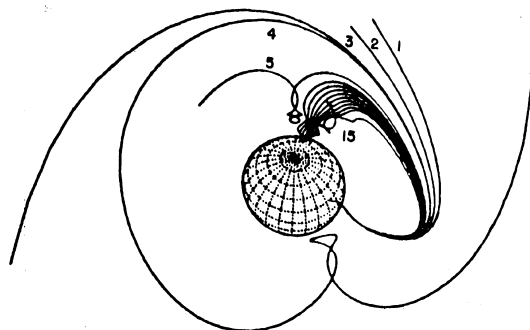


Рис.9.6. Траектории частиц космических лучей в магнитосфере Земли. В зависимости от энергии частиц, их траектории пронумерованы цифрами – от 1 (частицы высокой энергии или жёсткости) до 15 (частицы малой энергии). Частицы малых энергий (низких жесткостей) имеют замкнутые траектории, т.е. оказываются захваченными в магнитосфере (Smart and Shea, 1994).

Движение захваченных частиц с энергией $E \leq 1$ ГэВ в магнитосфере Земли можно описать суперпозицией трех квазипериодических движений - ларморовским вращением вокруг силовой линии (**spiraling**) с периодом T_1 , качаниями (**bouncing**) от полюса к полюсу и отражениями между магнитными (зеркальными) пробками (**mirror points**) с периодом T_2 и дрейфовым вращением (**drifting**) вокруг Земли (переходом с одной силовой линии на другую) с периодом T_3 . Каждое из этих периодических движений может быть адиабатическим, если в данной области магнитосферы характерное время изменения магнитного поля много больше периода вращения частицы данной энергии. При этом пространственные неоднородности поля должны быть достаточно малыми на характерных размерах вращения.

Каждому из трёх периодических движений частицы в магнитосфере отвечает свой адиабатический инвариант: μ – магнитный момент, т.е. магнитный поток («густота силовых линий») через ларморовскую окружность, J – интеграл продольного действия и Φ – магнитный поток, охватываемый дрейфовой траекторией частицы (рис.9.7). Благодаря сохранению инвариантов μ и J , траектория дрейфа частицы вокруг Земли определяется

однозначно. Адиабатический инвариант - параметр, характеризующий движение частицы и остающийся практически постоянным при медленном изменении физических условий, определяющих её существование в данной области пространства. При движении захваченной частицы в геомагнитной ловушке сохраняются её магнитный момент μ (первый адиабатический инвариант, эрг/Гс) и интеграл продольного действия J (второй адиабатический инвариант):

$$\mu = \frac{E}{B} \sin^2 \alpha \quad J = p \int \sqrt{1 - B/B_3} ds. \quad (9.4)$$

Здесь E , p и α – энергия, импульс и локальный питч-угол частицы; B – магнитное поле в вершине силовой линии; $B(3)$ – магнитное поле в точке отражения частицы. Интеграл продольного действия J (аналог момента количества движения, произведение энергии на время) вычисляют путём интегрирования вдоль магнитной силовой линии между точками отражения частицы.

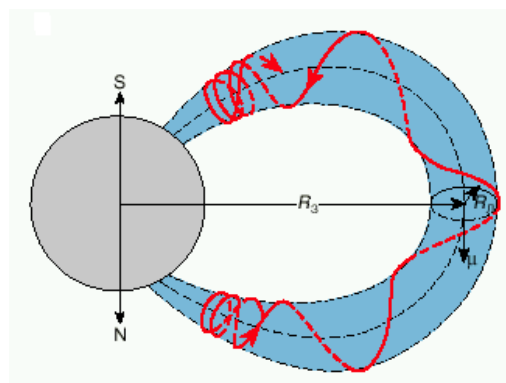


Рис.9.7. Движение захваченных частиц в магнитосфере Земли: ларморовское вращение вокруг силовой линии (**spiraling**) с периодом T_1 ; качания (**bouncing**) от полюса к полюсу и отражения между магнитными (зеркальными) пробками (**mirror points**) с периодом T_2 ; дрейфовое вращение (**drifting**) вокруг Земли (переход с одной силовой линии на другую) с периодом T_3 : http://www.kosmofizika.ru/spravka/ad_invars.htm

Частицы с разными энергиями E и питч-углами $\alpha(0)$, инжектированные в какой-то точке ловушки, постепенно заселяют замкнутую тороидальную поверхность – дрейфовую оболочку. Меридиональное сечение этой оболочки совпадает с силовыми линиями магнитного поля, а экваториальное – с линиями постоянной индукции поля (в дипольном поле они представляют собой окружности). Совокупность дрейфовых траекторий частиц с различными p и α в конечном счёте заполняет некоторый слой толщиной порядка ларморовского радиуса. Этот слой называют обычно L -оболочкой, и трёхмерное движение частицы сводится к двумерному (в координатах $\{L, B\}$). Поэтому экспериментальные распределения частиц РПЗ наиболее просто и естественно описываются и систематизируются в координатах $\{L, B\}$ Мак-Илвайна, где L – безразмерный параметр дрейфовой оболочки, B – локальная индукция магнитного поля. Для дипольного магнитного поля, которым описывается большая часть (сердцевина) геомагнитной ловушки, L есть расстояние от вершин силовых линий до центра Земли в земных радиусах (безразмерная величина).

Характерной особенностью движения заряженных частиц в геомагнитной ловушке является тройная периодичность: каждую захваченную частицу можно рассматривать как быстро крутящийся ларморовский волчок, который, плавно покачиваясь вдоль силовых

линий, периодически оборачивается вокруг Земли. Дрейф вокруг Земли по долготе для частиц с разными знаками заряда происходит в противоположных направлениях (электроны движутся на восток, протоны – на запад). Дрейф в магнитном поле имеет несколько разновидностей; в магнитосфере определяющими являются градиентный дрейф и дрейф из-за кривизны силовых линий.

Особо следует сказать о третьем инварианте движения частицы $\Phi = BS$, который представляет собой поток геомагнитного поля (в единицах $\text{Гс} \times \text{см}^2$) через экваториальную плоскость вне данной L -оболочки ($S = 1 \text{ см}^2$). Иными словами, третий адиабатический инвариант – это магнитный поток через дрейфовую траекторию. При деформациях дрейфовой оболочки дрейфовая траектория следует за изменениями оболочки. Если величина $B/(dB/dt)$ близка к периоду дрейфа частицы T_3 вокруг Земли, то третий инвариант сохраняться не будет. При этом, однако, величина $B/(dB/dt) > \{T_1, T_2\}$, так что первые два инварианта μ и J сохраняются. Магнитное поле на данной L -оболочке будет меняться, при этом $E/B = \text{const}$ вследствие сохранения μ , и частица может перейти на другую L -оболочку с соответствующим изменением энергии E . Если величина $B/(dB/dt) \sim \{T_1, T_2\}$, то ларморовское движение частицы и ее колебания между точками отражения нельзя считать независимыми движениями. При этом нарушаются μ и J , экваториальный питч-угол частицы изменяется, и она может попасть в конус потерь и высыпаться в атмосферу.

Ведущий центр частицы качается вдоль силовой линии магнитного поля, отражаясь (меняя направление своего движения) в так называемых зеркальных точках (m). Положение этих точек симметрично относительно плоскости геомагнитного экватора и зависит только от экваториального питч-угла $\alpha(0)$ частицы – угла между векторами магнитного поля и скорости частицы в вершине силовой линии: $B_m = B_0/\sin^2 \alpha_0$, где B_m – индукция поля в точке отражения частиц, а B_0 – в вершине той же силовой линии (в экваториальной плоскости). Величина B_m/B_0 не зависит от энергии, массы и заряда частицы и называется пробочным отношением. По мере приближения частицы к зеркальной точке угол α между векторами магнитного поля и скорости частицы (локальный питч-угол) увеличивается и в момент отражения достигает 90 градусов. Траектория частицы с $\alpha_0 = 90$ градусов лежит в плоскости геомагнитного экватора. С уменьшением α_0 точки отражения приближаются к Земле. При достаточно малых α_0 частица попадает в так называемый конус потерь (см. ниже) и гибнет в верхних слоях атмосферы.

Если точка отражения частицы находится ниже 100 км, велика вероятность атмосферных потерь. Питч-угол в вершине силовой линии для частицы, которую считают погибшей в атмосфере, называется критическим и определяется формулой

$$\sin^2 \alpha_{\text{кр}} = \frac{B_0}{B_m} \quad (9.5)$$

где B_0 и B_m – напряженности магнитного поля в вершине силовой линии и на высоте 100 км, соответственно. Область питч-углов меньше критического называют *конусом потерь*. Конус потерь лишь приблизительно оценивает реальные потери частиц при питч-угловой диффузии, поскольку граница атмосферы – понятие условное, высота ее колеблется (в частности, в зависимости от уровня солнечной активности), поглощение частиц не абсолютно и т.д. Для дипольного поля величина конуса потерь определяется из выражения

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{(L^3(4-3/L))^{1/2}} \quad (9.6)$$

В реальной магнитосфере напряженность поля на экваторе на больших расстояниях меньше дипольного и соответственно, конус потерь меньше. На малых высотах (< 1500

км) наблюдаются значительные аномалии геомагнитного поля (отклонения от дипольного поля). Над отрицательными аномалиями зеркальные точки частиц понижаются. В итоге частицы попадают в более плотные слои атмосферы с большей вероятностью, чем вне аномалий, что уменьшает времена их жизни. Наиболее значительное влияние на потоки частиц оказывает обширная Южно-Атлантическая аномалия (ЮАА), показанная на рис.9.8. В этой области величина магнитного поля на уровне моря падает до значения, ожидаемого для высоты ~ 1000 км при отсутствии аномалий.

Такая геомагнитная «впадина» позволяет космическим лучам, частицам РПЗ и другим заряженным частицам проникать в атмосферу на более низкие высоты. В частности, внутренний РПЗ в этой области опускается на самую низкую высоту по отношению к поверхности Земли. За счёт этого «опускания» ЮАА опустошает оболочки с $L < 1.1$ в течение одного дрейфового периода. Так как ЮАА располагается на низких широтах и имеет отрицательный знак, то в этом районе происходит не только опускание зеркальных точек частиц, но и провисание дрейфовых оболочек к Земле. Радиальные градиенты потоков на $L < 2$, соответствующих этой аномалии, очень велики, и такое провисание приводит к значительному росту потоков частиц от границ к центру аномалии на заданной высоте.

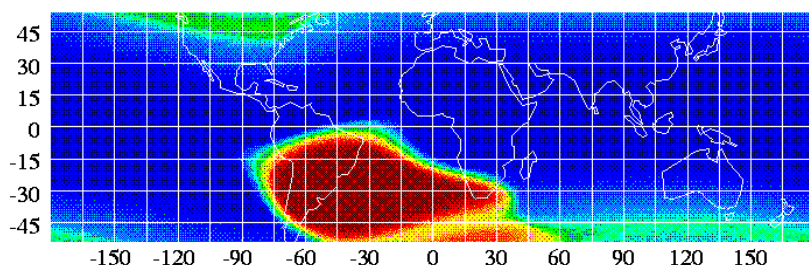


Рис.9.8. Аномалия распределения фона заряженных частиц на высоте около 560 км над Южной Атлантикой по измерениям на ИСЗ *ROSAT* (NASA) в 2002 г. (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/>).

Основной («геометрической») причиной ЮАА считают несовпадение центра геомагнитного диполя с географическим центром Земли. Однако законченной физической модели для описания её свойств пока не создано, и картина её поведения в целом остаётся предметом дискуссий. Не исключено, что само существование ЮАА и её динамика во времени и в пространстве отражают фундаментальный процесс инверсии геомагнитного поля. С прикладной точки зрения, ЮАА представляет большой интерес для астрономических ИСЗ и других КА, которые имеют орбиты с высотой несколько сотен километров. На таких орбитах спутники периодически проходят через аномалию, каждый раз в течение нескольких минут подвергаясь сильному радиационному облучению за счёт протонов внутреннего РПЗ. При этом *Международная Космическая Станция (МКС)* с наклоном орбиты 51.6° , например, должна иметь дополнительную защиту в связи с этой проблемой, а космическая обсерватория *Hubble Space Telescope* не может проводить наблюдения в период прохождения через ЮАА. Космонавты, пролетающие над районом аномалии, неоднократно сообщали о своеобразных «падающих звёздах» (световых вспышках) в поле зрения космонавтов (см. раздел 10.4). Отмечались также нарушения (сбои и отказы) в работе аппаратуры (электроники) на борту ИСЗ, пересекающих ЮАА.

9.5. Солнечные «сигналы» в атмосфере и литосфере

Кроме традиционных, хорошо известных и бесспорных связей, в системе «Солнце-Земля» имеется ряд малоизученных вопросов, которые остаются принципиально важными.

Их изучение представляется перспективным, поскольку они, иногда с неожиданной стороны, открывают новые аспекты СЗС и позволяют лучше понять их механизм. К таким вопросам относятся, в частности, долгопериодные изменения высоты геопотенциала при вариации уровня солнечной активности (СА). Геопотенциал $\Phi(h)$ – это работа, совершаемая при поднятии единицы массы воздуха в поле силы тяжести Земли от исходного уровня с давлением P_0 на высоту h с давлением P_1 . Для примера на рис.9.8 показаны среднегодовые значения геопотенциальной высоты поверхности с давлением 30 hPa (в единицах гектопаскаль) над областью вблизи Гавайских островов в субтропической зоне Тихого океана. Приведены также его 3-летние скользящие средние значения в сопоставлении с уровнем солнечной активности. В качестве индекса СА использован поток солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см за 3.5 солнечных цикла. Коэффициент корреляции между значениями $\Phi(h)$ и данными о солнечной активности достигает 0.75.

Как оказалось, приведенные значения геопотенциала $\Phi(h)$ являются мерой среднего значения температуры атмосферы ниже уровня ~24 км. Как видно из рис.9.8, температура варьирует в фазе с потоком солнечного радиоизлучения в течение 3.5 солнечных циклов. Амплитуда вариаций свидетельствует о том, что нижняя атмосфера в максимуме цикла оказывается на 0.5-1.0 К теплее, чем в минимуме. Если учесть пространственные и временные масштабы явления, то следует признать, что амплитуда эффекта - это весьма сильный отклик нижней атмосферы на «солнечный сигнал». Из данных рисунка не ясно, однако, является ли этот эффект локальным или глобальным, и как эта температурная аномалия меняется с высотой. Тем не менее, долгопериодные вариации значения геопотенциала служат независимым подтверждением СЗС на уровне нижней атмосферы.

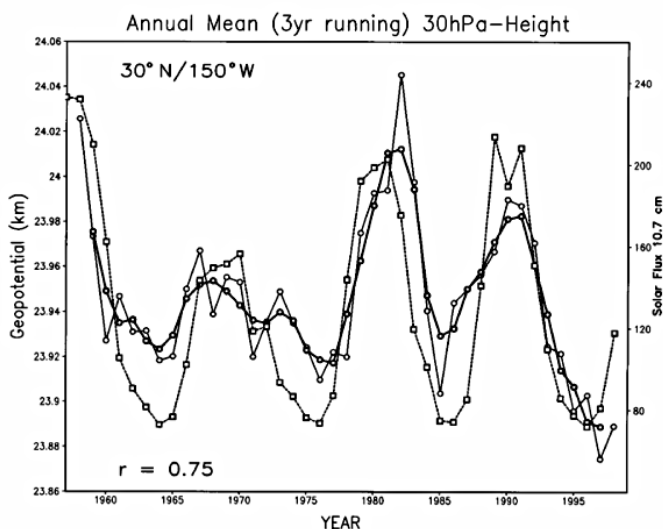


Рис.9.9. Временные вариации среднегодового значения высоты геопотенциала с давлением 30 hPa над районом с координатами 30°N, 150°W (тонкая линия с кружками), его 3-летние скользящие средние (толстая линия с кружками) и поток солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см (линия с квадратами) (Labitzke and van Loon, 1995).

Из физики верхней атмосферы известно, что вариации температуры на уровне термосферы (высоты 90-800 км, см. рис.8.1) обусловлены поглощением крайнего УФ-излучения Солнца атмосферными составляющими (главным образом, атомарным кислородом). Поскольку поток крайнего УФ-излучения сильно меняется в течение 11-

летнего цикла, то термосферные температуры также меняются с солнечным циклом. В солнечном цикле средней мощности поток крайнего УФ-излучения и термосферная температура возрастают в два раза от минимума к максимуму цикла.

Плотность определяется в основном интегральным эффектом температуры, поэтому вариации плотности на протяжении солнечного цикла проявляются сильнее по отношению к изменениям температуры. Вариации температуры, в свою очередь, вызывают изменение состава атмосферы. Суммарный эффект температуры и состава выражается в изменении плотности на порядок в течение солнечного цикла. С этим эффектом связана одна из важнейших проблем практической космонавтики – торможение спутников в атмосфере.

На рис.9.10 вверху приведены расчётные значения времени жизни для спутников серии *Explorer* с круговой орбитой в интервале начальных высот орбиты от 300 до 800 км. Расчёты основаны на прогнозах, вытекающих из эмпирической модели термосферы MSIS-86. Видна сильная зависимость времени жизни от высоты и от уровня солнечной активности (в качестве индекса SA использован поток радиоизлучения $F_{10.7}$ на волне 10.7 см). Обычный спутник с первоначальной высотой орбиты около 500 км может существовать около 30 лет в условиях, типичных для солнечного минимума, и всего около 3 лет – в условиях максимума. Возможно также значительное возрастание скорости изменения орбитального периода от минимума к максимуму SA.

В нижней части рис.9.10 показаны расчётные профили содержания атомарного кислорода над экватором для значений $F_{10.7} = 50$ (минимум SA) и 250 (максимум SA). Вариации концентрации малы до высоты 150 км, но постоянно увеличиваются и на самой большой из указанных высот (600 км) концентрация атомарного кислорода в максимуме солнечного цикла становится на несколько порядков выше, чем в минимуме. Физическая суть процесса торможения сводится к следующему. Тяжёлые компоненты атмосферы сильнее реагируют на изменение температуры термосферы. Поэтому повышение температуры приводит к увеличению относительного содержания более тяжёлых составляющих и к возрастанию средней молекулярной массы. Относительное увеличение содержания такого высокореактивного агента, как атомарный кислород, может превышать два порядка. С другой стороны, уменьшение температуры термосферы приводит к уменьшению средней молекулярной массы. В конечном счёте, плотность на высоте h является функцией локального и интегрального значений температуры и состава. В свою очередь, торможение спутников в атмосфере пропорционально плотности атмосферы.

По некоторым данным, эффект торможения сильно повлиял, в частности, на длительность существования американской орбитальной станции “*SkyLab*” в 1979 г. Из-за недостаточно надёжного прогноза уровня солнечной активности в максимуме 21-го цикла и соответствующих изменений плотности атмосферы станция прекратила своё существование раньше планируемого срока и взорвалась на высоте 10-20 км над Австралией. Масса станции составляла около 159 тонн.

Отметим, наконец, ещё одно малоизученное проявление солнечно-земных связей – корреляцию вариаций скорости суточного вращения Земли с некоторыми явлениями солнечной активности и параметрами межпланетного магнитного поля. Ещё в 1960 г. французский астроном А. Danjon обратил внимание на то, что после серии мощных вспышек класса 3+ и магнитных бурь в июле 1959 г. Земля внезапно замедлила свое вращение на 0,85 мс/сут. Затем она вдруг ускорила свое движение вокруг оси, каждые 24 часа сокращая длительность суток на 3,7 мс!.. Середина июля 1959 г. была исключительно возмущённым периодом, когда на Земле была зарегистрирована серия очень больших Форбуш-понижений в интенсивности галактических космических лучей и магнитных бурь. Однако в то время не было прямых данных ни о солнечном ветре, ни о межпланетном магнитном поле, поэтому наблюдения Данжона фактически прошли мимо внимания исследователей.

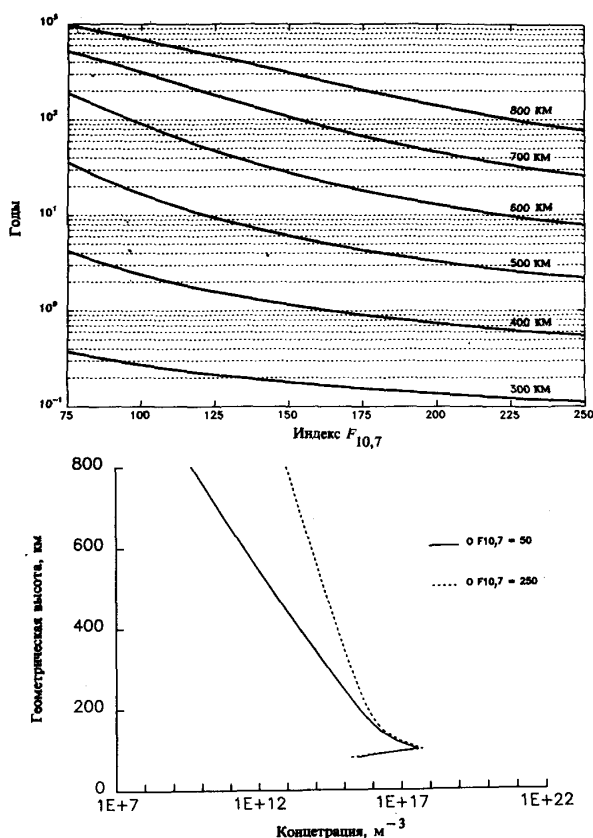


Рис.9.10. Времена жизни спутников серии *Explorer* с круговой орбитой (вверху) внизу – высотные профили концентрации кислорода в минимуме (сплошная кривая) и максимуме (пунктир) солнечного цикла; индекс CA – поток радиоизлучения $F_{10.7}$ на волне 10.7 см (Waltersheid, 1989).

Но уже спустя 10 лет появилась возможность для более детального анализа данных о неравномерностях суточного вращения Земли. О. Burkhard (1970) сопоставил данные о скачках скорости вращения с секторной структурой ММП. Анализу было подвергнуто 76 случаев пересечения секторной границы ММП в 1962-1968 гг. Методом наложения эпох было показано, что при пересечении границы (нулевой день) вращение Земли ускоряется, а спустя 4 дня – замедляется, причём это происходит независимо от того, как меняется направление ММП (рис.9.11) – от «+» (от Солнца) к «-» (к Солнцу), или наоборот. Эффект хорошо виден даже на фоне так называемого «векового замедления» вращения Земли.

Природа таких скачков скорости суточного вращения и неравномерного вращения Земли в целом осталась до конца не выясненной. Существующие гипотезы связывают эти явления со сложным характером взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой и дальнейшим перераспределением энергии между несколькими оболочками Земли, включая атмосферу и литосферу. Во всяком случае, все известные факты, вместе взятые, позволяют сделать два вывода принципиальной важности. Во-первых, не вызывает сомнений солнечная обусловленность нерегулярных изменений периода суточного вращения Земли. Во-вторых, солнечная активность оказывает опосредованное воздействие на изменения режима суточного вращения Земли.

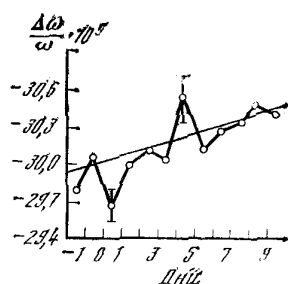


Рис.9.11. Относительные вариации скорости суточного вращения Земли при пересечении границы сектора межпланетного магнитного поля. Прямой линией показано «вековое замедление» вращения Земли (Burkhard, 1970).

9.6. Солнечно-земные связи на службе космической погоды

Из предыдущих разделов видно, что, по крайней мере, наиболее яркие и хорошо изученные события в цепочке солнечно-земных связей тесно связаны с уровнем солнечной активности, и их совокупность часто называют «проблемой космической погоды». Понятие космической погоды было введено в начале 70-ых годов в связи с открытием корональных выбросов массы (CME). Космическая погода в узком смысле слова описывает состояние околоземной среды как результат динамических солнечных, гелиосферных и магнитосферных явлений в контексте их потенциального воздействия на технологические системы на Земле и в космосе.

В более широком смысле термин «космическая погода» (КП) включает условия на Солнце и в солнечном ветре, в магнитосфере, ионосфере и термосфере, которые могут повлиять на работу и надёжность космических и наземных технологических систем и могут представлять опасность для жизни или здоровья человека. Обычно к числу опасных явлений космической погоды относят геомагнитные бури, солнечные радиационные бури и ионосферные бури (нарушения радиосвязи). Этим трём параметрам КП соответствуют три типа физических процессов в околоземном космическом пространстве: 1) возмущения геомагнитного поля, вызывающие индуцированный заряд и электрические токи, которые приводят к повреждениям в технологических системах; 2) увеличение радиационных доз от энергичных частиц различного происхождения, которые непосредственно повреждают компоненты электронных систем ИСЗ и представляют угрозу для жизни или здоровья человека в космосе; 3) возмущения электронной плотности в ионосфере, которые изменяют траектории радиосигналов, что приводит к затруднениям в радиосвязи (ухудшает передачу радиосигналов), а также к ошибкам в навигационных системах, зависящих от условий распространения радиосигналов.

Важность космической погоды для человечества была осознана давно, ещё до начала космической эры. Однако только в последние десятилетия появились реальные технические возможности для её непрерывного мониторинга. В мониторинге участвуют как наземные обсерватории (наблюдения Солнца, геомагнитного поля, космических лучей, ионосферы и т.д.), так и космические аппараты. Одним из лучших КА для мониторинга космической погоды является *Advanced Composition Explorer (ACE)*. Он был запущен в августе 1997 г. и выведен на орбиту вблизи точки Лагранжа *L1* между Землей и Солнцем (рис.9.12).

Точка *L1* является одной из нескольких точек в космосе, где силы гравитационного притяжения Солнца и Земли равны и противоположны по направлению. Эта особая точка находится на расстоянии ~1.5 млн. км от Земли в направлении к Солнцу. На борту *ACE* имеется ряд инструментов, которые в реальном времени обеспечивают получение информации о поведении и параметрах солнечного ветра в области нахождения КА.

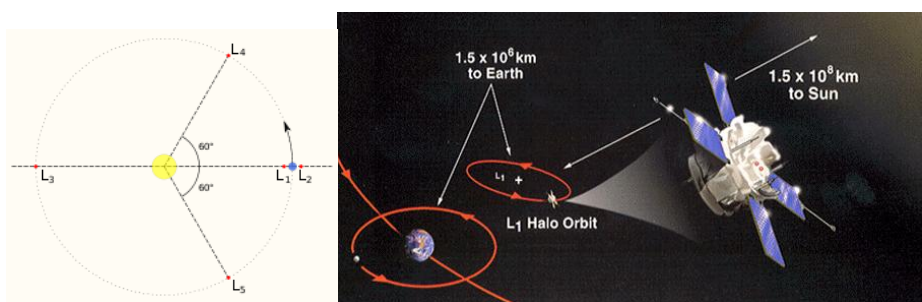


Рис.9.12. Схема точек Лагранжа в окрестности Земли (слева). Справа показано положение КА ACE в точке Лагранжа L1 на расстоянии около 1.5 млн. км в направлении к Солнцу.

Проблема прогнозирования космической погоды выходит за рамки нашего нынешнего рассмотрения. Тем не менее, представляется уместным сделать несколько замечаний. В настоящее время многие ученые усиленно занимаются физическим и компьютерным моделированием различных гелио-геофизических явлений, связанных с космической погодой. Успех конкретной физической модели является индикатором того, что механизм явления (или совокупности явлений) понят правильно. Это означает, что ценность модели не является простым следствием её сложности и/или утонченности. Скорее это результат синергетического (совместного) теоретического рассмотрения, численного моделирования и анализа данных, которые вместе приводят к лучшему пониманию связи и процессов взаимодействия в цепочке «солнечный ветер – магнитосфера - ионосфера».

Изучение космической погоды, из-за её важных практических приложений, обязано быть нацеленным на решение практических задач, и имеется немало случаев, когда задача может и должна быть решена путём моделирования, даже если её физическое понимание оставляет желать много лучшего. Поэтому представляется очевидным, что специалистам по космической погоде рекомендуется продолжать работать, во всех трёх направлениях – физического, полу-эмпирического и эмпирического моделирования (по крайней мере, в настоящее время).

В современных исследованиях солнечно-земных связей всё большее применение находит системный научный подход. При таком подходе система «Солнце – гелиосфера - Земля» рассматривается как единая интегрированная система, поведение которой определяется взаимодействием между различными движителями и регуляторами (замедлителями), которые нельзя рассматривать в качестве независимых или самоограниченных сущностей. Системный научный подход уже привёл к развитию всеобъемлющих моделей системы «Солнце-Земля», которые позволяют, для большей гибкости, строить модульные схемы. Работа в этом направлении успешно развивается в различных странах при поддержке соответствующих космических агентств (NASA, ESA etc.) и международных исследовательских программ (Watermann *et al.*, 2009).

10. ВЛИЯНИЕ СОЛНЦА НА БИОСФЕРУ

О физика, спаси меня от метафизики!
И. Ньютон

Интерес людей к влияниям Космоса на Землю, её ближайшее окружение, биосферу и человеческую цивилизацию существовал всегда. Но лишь в середине 20-ого века эта смутная область космофизики вооружилась запасом необходимых знаний и получила концептуальную основу для понимания и дальнейшего изучения проблемы. Масштабы этого влияния хорошо осознавали многие учёные прошлого. Так, в начале 1940-ых годов один из представителей русского космизма, создатель биогеохимии, академик В.И. Вернадский писал: «Связь космической реальности с нами гораздо глубже и обыденнее, чем мы думаем». При этом биологическое значение имеет, прежде всего, изменчивость космических факторов. В целом *космобиологическую ситуацию* на Земле в каждый данный момент времени можно рассматривать как результат их комбинированного воздействия. Наряду с гравитацией, вращением Земли и некоторыми другими факторами, важнейшими следует признать солнечную активность, геомагнитное поле и состояние атмосферы. Три последних фактора отличаются сильной изменчивостью. Их вариации как раз и составляют сердцевину проблемы «Солнце-Земля».

Первые догадки о роли Солнца в жизни Земли восходят к глубокой древности, однако научные наблюдения Солнца начались лишь около 400 лет назад, после изобретения телескопа Г. Галилеем. При этом осознание реальности солнечно-земных связей (СЗС) пришло лишь около 100 лет назад, после блестящих пионерских исследований А.Л. Чижевского (1915 г.). При этом понадобилось ещё несколько десятилетий наземных и прямых космических наблюдений и экспериментов, чтобы разобраться с общей картиной гелио-геофизических возмущений, изучить и классифицировать их наиболее существенные характеристики. Главное достижение последних десятилетий состоит в том, что удалось заметно продвинуться в понимании механизмов СЗС.

Сколько-нибудь обстоятельное изложение накопленных фактов, гипотез и концепций СЗС выходит за рамки настоящего учебного пособия. В частности, мы не будем подробно касаться хорошо известных фактов воздействия геомагнитных бурь на здоровье людей, не будем описывать многочисленные корреляции между СА и статистикой технологических сбоев и катастроф и т.п. Основное внимание ниже будет сосредоточено на самых важных направлениях исследований и наиболее достоверных результатах.

10.1. Современные концепции и фундаментальные проблемы

Подобно другим областям знания, гелиобиология и солнечно-земная физика в целом уже далеко вышли за рамки первоначального понимания этих терминов, а предметы их исследования переплелись с областями исследования других наук о Земле и Космосе. При этом, однако, можно и нужно выделить ряд фундаментальных проблем и важнейших процессов, которые и определяют суть этих научных направлений. Так, например, при определении физической природы наиболее эффективного гелиобиологического фактора основным трудностью оказалось отсутствие общепринятого теоретического объяснения биологической эффективности внешних сверхслабых полей, независимо от их природы (электромагнитное, радиационное и другие поля).

На рис.10.1 показаны пути воздействия солнечной активности (СА) на естественную среду обитания человека - биосферу. Здесь выделены два основных канала воздействия – через изменения *коротковолнового излучения Солнца* с последующими возмущениями

ионосферы и озоносферы, и через изменения свойств *солнечного ветра*, вызывающих возмущения магнитосферы (геомагнитная активность). В первом случае суммируется воздействие от всех активных областей на диске Солнца, а во втором – влияние ограничивается активными областями в узкой зональной области данного солнечного полушария с запаздыванием геофизического эффекта на ≥ 2 суток.

Среди возможных агентов-факторов влияния отметим, в первую очередь, колебания электромагнитного фона магнитосферы в широкой области частот от 10^{-3} - 10^5 Гц, изменения главного геомагнитного поля, вариации параметров в глобальной цепи атмосферного электричества, инфразвук и внутренние гравитационные волны в нижней атмосфере, выход радиоактивного радона ^{222}Rn из литосферы. Далее следует принимать во внимание метеорологические параметры, особенно резкие изменения давления и температуры, а также вариации потока ультрафиолетового излучения Солнца ($\lambda \leq 290$ нм). Нельзя заранее исключить и другие, пока неизвестные космофизические факторы (каналы), влияющие на среду обитания, например, на состав и другие свойства нижней атмосферы. В частности, всё ещё ждёт серьёзной оценки роль ионизации атмосферы при значительных вариациях интенсивности галактических и/или солнечных космических лучей. Заслуживает подробного анализа также эффект генерации окислов азота NO_x при вторжении потоков СКЛ во время мощных протонных событий типа 14 июля 2000 г., 28 октября 2003 г., 20 января 2005 г. и т.п.

Насколько можно судить в настоящее время, воздействие на биологические явления реализуется в основном через возмущения электромагнитных полей (ЭМП) в среде обитания. Типы электромагнитных возмущений для обоих каналов несколько различаются, но при этом они сложным образом взаимодействуют друг с другом.

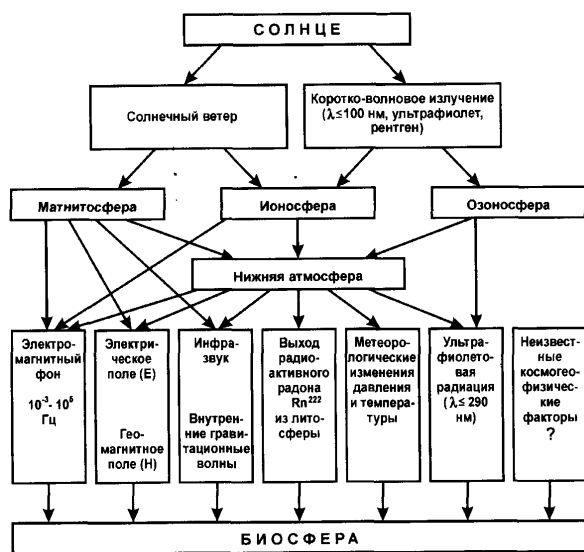


Рис.10.1. Общая схема влияния солнечной активности на биосферу (Владимирский и др., 2004). Показаны два основных канала воздействия: «солнечный ветер-магнитосфера» и «солнечное коротковолновое излучение-ионосфера-озонотсфера». Крайний справа прямоугольник (без верхней стрелки) означает, что на нынешнем этапе исследований пока не все пути воздействия космофизических факторов раскрыты.

Открытие биологического действия слабых (сверхслабых) электромагнитных полей – одно из самых важных достижений современной биофизики и экологии. Постепенно

становится понятным, что изменения амплитуд колебаний на разных частотах - это экологический фактор фундаментальной важности. Существенно, что электромагнитные возмущения в среде обитания сопутствуют не только солнечной и геомагнитной активности, но и многим другим явлениям, в том числе - метеорологическим и сейсмическим. Не исключено, что «предчувствие» изменений погоды и землетрясений различными живыми организмами – это просто восприятие на бессознательном уровне электромагнитных сигналов, предшествующим названным событиям.

К сожалению, в настоящее время нет ясного понимания того, как именно организмы могут чувствовать эти очень слабые низкочастотные электромагнитные сигналы. Большинство исследователей рассматривает гипотезы, связывающие высокую чувствительность биосубстрата к ЭМП с какими-нибудь биологическими структурами или довольно специфическими биохимическими процессами. Это с самого начала лишает предлагаемые механизмы универсальности. Между тем, едва ли могут быть сомнения, что основные звенья первичного молекулярного механизма влияния ЭМП должны быть общими и для клетки, и для водного раствора (где заведомо отсутствуют сложные мембраны или белковые молекулы).

Начиная с классических опытов Дж. Пиккарди (J. Piccardi, 1962) по осаждению оксихлорида висмута в воде во время солнечных вспышек и геомагнитных бурь, многие исследователи были убеждены, что первичным рецептором внешних воздействий (электромагнитной или иной природы) является вода. Теоретическое обоснование этого эмпирического обобщения было дано Л.Д. Кисловским (1971, 1982). Он исходил из предположения, что на действие любых полей биосистема отвечает по классической двухпиковой схеме (рис.10.2). Такая схема, которая представляется достаточно общей для изучения биологического действия различных факторов (например, ЭМП, радиации и др.) родилась сначала в физиологии при проведении опытов, в которых доза фармакологического препарата последовательно увеличивалась.

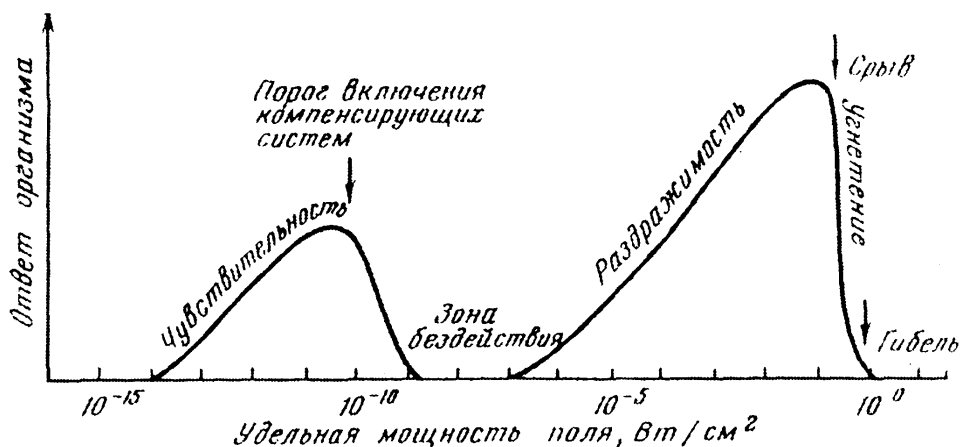


Рис.10.2. Классическая схема реакций сложной системы на возрастающий стимул, разработанная в физиологии, применительно к действию ЭМП. Удельная мощность, предъявляемая системе, согласована по своим параметрам с характеристиками рецептора (Кисловский, 1982).

Видно, что кривая отклика организма на возрастающий внешний стимул имеет два отчетливых максимума различной природы. Если первый максимум отражает нормальные компенсаторные возможности организма, то второй характеризует предельные его возможности при нарастающей мощности воздействия. Естественные ЭМП и их имитации, применяемые в гелиобиологических экспериментах, имеют удельные

мощности, которые располагаются в области первого максимума (т.е. в области заведомо малых мощностей). Однако большинство экспериментов в электромагнитной биологии выполняется в области второго максимума, где понятия «много» и «мало» не всегда ясны. Более того, часть опытов была выполнена в «зоне бездействия», где эффективно срабатывают механизмы компенсации. Поэтому не удивительно, что многие экспериментаторы либо отмечали отсутствие биоэффекта, либо даже наблюдали противоположный «ошибочный» результат.

Важнейшим пунктом рассматриваемой концепции является физическое объяснение феномена «активации» воды. Под активацией подразумевается сообщение воде определённых особых свойств путём некоторых физических воздействий. Существует около десятка способов активации воды. В наши дни активация обычно проводится с помощью пропускания воды через систему магнитов, где происходит «магнитная обработка воды». Дж. Пиккарди использовал для активации так называемую «колбу Аббота», и физическая суть процесса сводилась к воздействию на воду электромагнитного излучения в полосе частот около 4 кГц, модулированного более низкой частотой ≈ 10 Гц. С точки зрения общности природы процесса следует отметить, что различные методы активации приводят к однотипным результатам: в растворе существенно изменяется концентрация некоторых метастабильных ассоциатов, или комплексов воды – «жидких кристаллов» (Кисловский, 1971). Расскажем об этом фундаментальном процессе подробнее.

Уже к середине 1980-ых годов удалось детально проследить физико-химическую цепочку причин-следствий, по крайней мере, для одного такого комплекса – додекаэдра, имеющего форму «фонаря». Додекаэдр представляет собой полость из молекул воды, куда попадает эфемерное молекулярное образование – гексааквакомплекс кальция $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$. Его размер точно соответствует размеру упомянутой додекаэдрической полости. В результате, когда кальций со своим молекулярным окружением попадает внутрь «фонаря», последний «стягивается» изнутри, и получается метастабильная структура со временем жизни порядка многих часов. Концентрация додекаэдров может меняться под влиянием внешних слабых воздействий (Кисловский, 1984). В естественных условиях, по-видимому, всё время идут процессы активации↔деактивации воды за счёт электромагнитных и других слабых воздействий. Электромагнитное окружение раствора при определённых параметрах стимулирует появление одних структур, при других параметрах – их исчезновение и возникновение иных. В итоге всё время меняются макроскопические свойства воды.

По этим причинам вода оказывается открытой системой, которая обменивается с окружением веществом (растворяющиеся газы) и энергией (если нет термостатирования). Существует множество эмпирических подтверждений изложенной концепции. Самый наглядный пример – изменение окраски воды в старинном морском приборе для предсказания штормов – «штормглассе». Прибор представляет собой герметически запаянную стеклянную ампулу, заполненную 100 мл многокомпонентного раствора. При воздействии какой-то (пока неизвестной) компоненты «погодного излучения» прибор реагирует появлением красивых кристаллов, исчезающих после прохождения соответствующего атмосферного фронта.

Тезис о воде как рецепторе сверхслабых электромагнитных сигналов получил дополнительное обоснование в экспериментах Л.П. Семихиной с др. (1986-1988 гг.). При «экологических» значениях напряжённости магнитного поля (≤ 100 нТл) и экспозициях в несколько часов были не только воспроизведены некоторые известные прежде закономерности (например, «память» о воздействии в течение нескольких часов), но и установлены некоторые новые, важные и интересные для концепции Кисловского. Между прочим, в этих опытах было обнаружено, что при компенсации геомагнитного поля изменения параметров воды были обратными тем, которые получались при активных воздействиях на некоторых «резонансных» частотах.

Эвристическая ценность описанной теоретической схемы очевидна. В рамках этой модели, в частности, удаётся в ряде случаев проследить путь от возникновения в водных растворах организма додекаэдрических структур (и, соответственно, резких понижений концентрации свободного кальция), до фиксируемого биологического эффекта, связываемого с влиянием магнитного поля. Например, при уменьшении концентрации кальция должен замедляться кислородный обмен. Но именно такой эффект поля известен в магнитобиологии. В специальном эксперименте на препарате сердца лягушки было найдено (Макеев и др., 1985), что раствор, обработанный сверхслабым магнитным полем (частота 0.1 Гц, амплитуда 4 нТл), действует точно так же, как раствор с пониженной концентрацией кальция.

За последние десятилетия, после пионерских опытов Дж. Пиккарди эффекты гелио-геофизической возмущённости были найдены во многих физико-химических системах, не имеющих к воде, казалась бы, никакого отношения. Поэтому дальнейшая разработка идей, позволяющих построить обоснованное объяснение биологического действия сверхслабых полей, по-прежнему остаётся очень актуальной задачей. И подходы к решению этой трудной проблемы уже намечаются. Вместе с тем, следует отметить, что биологическое действие сверхслабых низкочастотных ЭМП – это проблема не только гелиобиологии. Например, электромагнитные возмущения атмосферного происхождения, несомненно, также вносят важный вклад в биометеорологические эффекты, хотя, конечно, имеются и другие, «некосмические» источники масштабных электромагнитных возмущений.

Как известно, до сих пор даже в научной среде широко распространено убеждение в «пренебрежимой малости» эффектов природных ЭМП. По этой причине многие интересные вопросы не привлекают внимания исследователей. Известно, например, что непосредственно перед подвижкой (сходом) снежной лавины на короткое время возникает интенсивное излучение в широком диапазоне частот – как следствие переменных динамических нагрузок на лёд. Имеются серьёзные свидетельства того, что собаки-горноспасатели «предчувствуют» сход снежных лавин. Скорее всего, они просто воспринимают электромагнитный сигнал, возникающий перед сходом лавины. Аналогичное замечание можно высказать по поводу «биологических предвестников» землетрясений. Большинство сейсмологов согласны с тем, что сигнал-предшественник сейсмического события имеет электромагнитное происхождение, и большая часть его энергии приходится на диапазон низких и сверхнизких частот.

10.2. Роль геомагнитных пульсаций

Как уже отмечалось ранее (см., например, рис.9.3), геомагнитное поле не позволяет солнечному ветру проникнуть глубоко внутрь магнитосферы. Но сама магнитосфера (вместе с хвостом и плазмасферой) под воздействием солнечного ветра становится источником электромагнитных волн низкой и сверхнизкой частот. Для понимания их роли вернёмся к рис.3.3, где приведена шкала электромагнитных волн, излучаемых Солнцем. Установлено, что солнечное излучение с длиной волны $\lambda < 290$ нм, обладающее высокой биологической эффективностью (и в больших дозах губительное для всех организмов), полностью поглощается атмосферой. Подчёркнём в связи с этим, что поверхности Земли достигает та часть излучения, которая от солнечной активности практически не зависит; это в основном излучение в диапазоне от ~ 300 нм до 5.2 мкм (оптическое «окно прозрачности»). Имеются также узкие окна прозрачности в области инфракрасных волн ($8\div 14$ мкм и $17\div 33$ мкм).

Космическое радиоизлучение поглощается в ионосфере, начиная с $\lambda \sim 30$ м (частота $f \sim 10$ МГц) и до $\lambda \sim 6 \times 10^4$ км ($f = 5$ Гц). Излучение с λ от 30 м до 1.0 мм свободно проникает до поверхности Земли (радиоастрономическое окно прозрачности). Наибольшие изменения потока солнечного радиоизлучения в пределах этого окна

происходят во время солнечных вспышек. При этом, однако, самое большое значение потока радиоизлучения приблизительно в миллион раз меньше потока видимого излучения. Длительность всплеска на метровых волнах, связанного со вспышкой балла 3В, составляет несколько часов. Некоторые активные области с пятнами большой площади являются источником шумовых радиобурь ($\lambda > 1$ м, длительность порядка нескольких суток). Однако это излучение находится уже за пределами окна прозрачности ионосферы и регистрируется только на борту КА. В области сверхнизких частот ($f < 5$ Гц) ионосфера вновь становится прозрачной, и эти волны могут регистрироваться на земной поверхности.

Итак, до поверхности Земли доходит лишь узкая полоса солнечного спектра в области ближнего ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучений, а также небольшой участок радиоспектра, зависящего от солнечной активности, но имеющего малую мощность – менее 10^{14} Вт. Несколько забегаая вперёд, заметим, что по этой причине маловероятно, что солнечные радиоволны играют заметную роль в биосфере, хотя в лабораторных экспериментах биологическая эффективность радиоизлучения доказана.

По сравнению с оптическим излучением (4×10^{26} Вт), корпускулярное излучение (СКЛ – 10^{21} Вт, солнечный ветер – 10^{20} – 10^{22} Вт) не играет существенной роли в энергетическом балансе Солнца. Однако его роль в проблеме солнечно-земных связей, как мы уже знаем, очень велика, поскольку потоки солнечных частиц весьма изменчивы.

Электромагнитную волну можно условно представить в виде двух векторов – электрического и магнитного. Их изменения в пространстве и времени отражают колебания реальной физической сущности – энергии ЭМП поля волны. Иногда для характеристики электромагнитной волны используют только электрическую составляющую поля (в единицах мкВ/(м·Гц)). Именно в таких единицах на рис.10.3 приведен спектр электромагнитного поля, наблюдаемого на поверхности Земли.

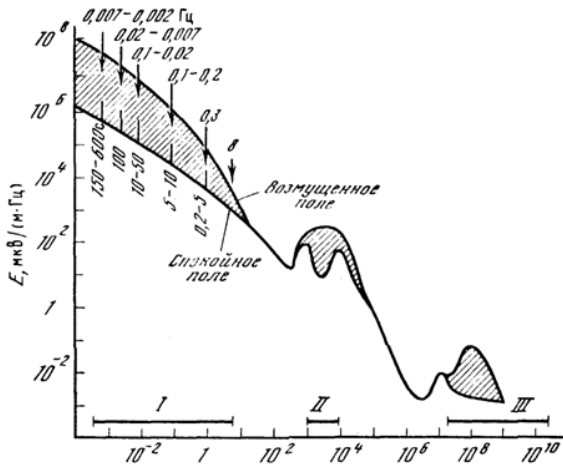


Рис.10.3. Спектр электромагнитного поля на поверхности Земли (Б.М. Владимирский, 1976). По вертикальной оси отложена напряжённость электрического вектора E , по горизонтальной – частота колебаний f в Гц. Стрелками отмечены частоты (вверху), на которых наблюдаются короткопериодические колебания (КПК) геомагнитного поля, вызванные изменением солнечной активности, и соответствующие им периоды (внизу); I, II и III – «окна прозрачности».

Горизонтальные отрезки I–III в нижней части рисунка соответствуют трём «окнам прозрачности». Два из них находятся в радиодиапазоне – это космическое радиоизлучение на волнах 1 мм – 30 м (III) и собственные радишумы атмосферы с $f \sim 10^3$ – 10^4 Гц (II),

обусловленные электрическими разрядами типа гроз и т.п. Третье окно приходится на область очень низких частот ($f < 5$ Гц). Штриховкой показаны масштабы изменений напряжённости поля в некоторых интервалах частот в связи с развитием мощной солнечной вспышки и последующей магнитной бури с внезапным началом. Видно, что в области крайне низких частот ($f < 1$ Гц) амплитуда волн в процессе геофизического возмущения может меняться в пределах до двух порядков величины.

На сверхнизких частотах генерация электромагнитных колебаний тесно связана с геомагнитным полем и поясами захваченной радиации (см. раздел 9.2). Это уже не обычные радиоволны, а колебания самого магнитного поля Земли, возбуждаемые при обтекании магнитосферы солнечным ветром. Их так и называют: короткопериодические колебания (КПК) геомагнитного поля (или геомагнитные микропульсации). Параметры пульсаций хорошо коррелируют с солнечной активностью (через солнечный ветер и межпланетное магнитное поле). Во многих типах микропульсаций отчётливо прослеживается 11-летний цикл СА и его гармоники. Существенные изменения наблюдаются в отдельных частотных полосах пульсаций при прохождении Земли через секторную границу ММП или через фронт межпланетной ударной волны.

Всё сказанное выше о низкочастотных колебаниях магнитосферы наводит на мысль о том, что они могут быть частью механизма СЗС. Но так ли уж серьёзен вклад естественных ЭМП в космобиологическую ситуацию на Земле? Несколько забегаю вперёд, ответим на этот вопрос утвердительно. К настоящему времени накоплено огромное количество статистических результатов, подтверждающих важную роль геомагнитных и иных возмущений в околоземном пространстве в гелиобиологических эффектах. Широко проводятся также теоретические исследования возможных механизмов СЗС, в частности, механизмов триггерной природы. Естественно, самые убедительные аргументы в пользу той или иной гелиобиологической гипотезы могут дать только модельные или медико-биологические эксперименты.

В отличие от любых измерений (наблюдений) в природных (космических или геофизических) условиях, когда точно не известны ни «подстилающий» фон, ни входные параметры измеряемого сигнала, эксперимент в лаборатории позволяет достаточно точно воспроизвести фон (или избавиться от него) и задать начальные характеристики того или иного действующего фактора. К настоящему времени наиболее впечатляющие результаты получены при искусственном воздействии на биологические объекты электромагнитных полей естественной напряжённости. Воспроизвести возмущение естественного ЭМП Земли в лаборатории технически несложно. Достаточно от генератора подать сигнал нужной частоты и амплитуды на конденсатор или соленоид (рис.10.4) и поместить в него подопытное животное.

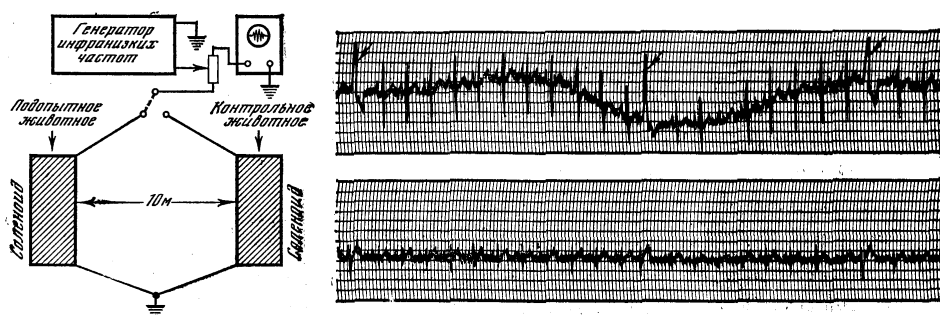


Рис.10.4. Имитация возмущения ЭМП Земли в лабораторных условиях. Схема опыта с кроликами показана слева, ЭКГ кроликов - справа. Нижняя кривая – ЭКГ контрольного животного, верху – ЭКГ кролика, находившегося в электрическом поле напряженностью 1 В/м и частотой 8 Гц. Стрелками отмечены аномалии в форме ЭКГ (А.М. Воынский и др., 1969-1982 гг.).

Такие опыты в последние годы проводились в ряде лабораторий в разных странах. В частности, очень наглядные результаты были получены в Крымском медицинском институте (Симферополь) в 1969-1982 гг. Уже после первых экспериментов в Крыму было установлено, что слабое сверхнизкочастотное поле существенно влияет на сердечно-сосудистую систему (ССС) теплокровных животных (кролики, собаки). В течение трёх часов подопытные животные находились в электрическом поле напряжённостью 1 В/см и частотой несколько герц. У животных обнаружено уменьшение частоты сердечных сокращений. Если же увеличить длительность воздействия (или повторять его несколько дней те же три часа), то могут наступить довольно серьёзные нарушения в работе сердца (рис.10.4). Это было подтверждено также патологоанатомическими исследованиями. Последующие опыты, проведенные на частотах ЭМП около 1, 2 и 8 Гц, показали, что поле эффективнее воздействует на сердечно-сосудистую систему, если её работа была уже как-то нарушена до эксперимента. Последнее обстоятельство имеет принципиальную важность для оценки воздействия магнитных бурь на больных гипертонией и другими заболеваниями ССС (см. раздел 11.2).

Модельные эксперименты по изучению биологических эффектов спорадических гелио-геомагнитных возмущений пока не получили должного размаха. Но уже сейчас становится очевидным, что информация, накопленная в этой области, является очень полезной. Однако из-за многих методических трудностей успехи экспериментальной гелиобиологии не следует преувеличивать. Тем не менее, их многолетний итог убедительно указывает на электромагнитную природу основного действующего гелиобиологического агента. Иными словами, в среде обитания обнаружен важный экологический фактор – амплитудно-спектральные вариации электромагнитного фона низких и сверхнизких частот. Важную информацию о природе гелиобиологических эффектов даёт изучение квазипериодических (циклических) вариаций различных биологических показателей. Такие исследования открывают обширную новую область солнечно-земной физики – связь ритмики солнечной активности и ритмов биосферы.

10.3. Космические ритмы в биосфере

До сих пор мы касались гелиобиологических эффектов в основном спорадической природы. Между тем, изучение любой динамической системы обязательно должно включать в себя исследование как её пространственной структуры, так и временной организации. Временную динамику биологических процессов изучает хронобиология. Очень важную часть этой динамики составляют колебания биологических показателей – предмет исследований биоритмологии. В настоящее время признано, что все биологические системы на всех уровнях организации функционируют в режиме автоколебаний. Последние внешне проявляются как биоритмы – циклические изменения показателей жизнедеятельности организма (физиологических биологических и т.д.). При этом появление тех или иных ритмов в системе может быть связано с так называемым захватом частоты (и принудительной синхронизацией). Важно подчеркнуть, что любой ряд измерений какого-нибудь параметра (в лаборатории или в естественных условиях) может быть представлен как набор элементарных колебаний. Поэтому все свойства ряда описываются в терминах теории колебаний (амплитуда, фаза, период, частота, фаза, амплитудный/фазовый спектры, периодограмма, спектр мощности колебаний и т.д.).

В обширной литературе по биоритмам накоплено множество наблюдений над периодическими изменениями самых различных параметров в широком диапазоне частот. Наиболее подробно изучены для многих организмов полусуточный и суточный ритмы. Обнаружение ритма с периодом около 7 дней дало повод поставить вопрос о естественном (а не историческом) происхождении календарной недели. Некоторые исследователи придают этому периоду особое значение, считая его эволюционно обусловленным. В древности многие народы верили в магическую силу числа 7, а в наши дни психологи

находят следы этого «магического» числа в особенностях человеческого восприятия информации. Во всяком случае, такой подход не противоречит ведущей концепции гелиобиофизики о том, что **ритмические колебания гелио-геомагнитных показателей завели «биологические часы» и в процессе эволюции интегрировались в эндогенную ритмику биологических систем.**

Для человека, кроме упомянутых ритмов, известны циклические изменения показателей жизнедеятельности с периодами около месяца (26-29 дней), полгода, год, около трёх лет, около семи лет (так называемые макроритмы). На уровне систем организмов хорошо известны колебания численности некоторых популяций. Эти «волны жизни» наиболее чётко наблюдаются с периодами около трёх-четырёх и десяти лет. При этом максимумы этих волн не обязаны совпадать с соответствующими пиками солнечной активности. Такое «расогласование» между солнечными и биологическими ритмами объясняется в основном сложным взаимодействием (иерархией) между живыми организмами на поверхности Земли (подробнее см. ниже).

При исследовании околосуточных (так называемых циркадных) ритмов установлено, что они могут быть *принудительно синхронизированы* соответствующими факторами внешней среды, в первую очередь, сменой режимов освещённости. Как отмечалось выше, синхронизация происходит по типу захвата частоты. Здесь имеет место аналогия с механическими и электрическими колебательными системами при воздействии на них внешнего периодического сигнала. По-видимому, здесь приложимы также и другие общие закономерности нелинейной теории колебаний. В частности, для солнечно-земной физики в целом (включая гелиобиологию) очень важна возможность синхронизации очень слабым сигналом при малой величине «расстройки». Вынуждающей силой для биологических автоколебаний могут быть, в принципе, любые периодически меняющиеся факторы внешней среды. К их числу следует, видимо, отнести погодно-климатические изменения (осадки, средние температуры определённых месяцев и т.п.) и, конечно, такие факторы, как электромагнитные поля, инфразвук и другие. Все эти параметры среды модулированы изменениями солнечной активности и долгопериодными приливными воздействиями Луны.

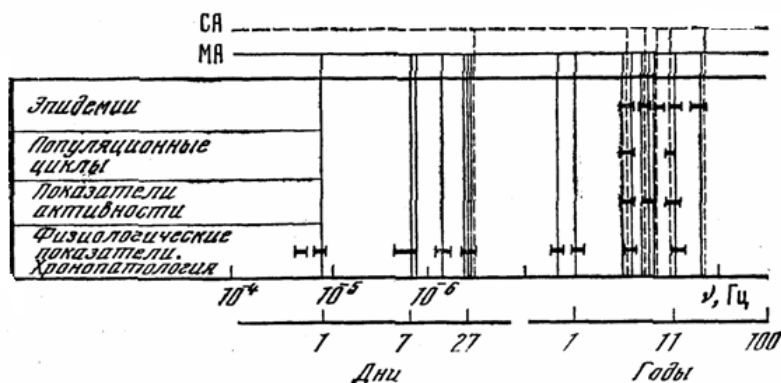


Рис.10.5. Основные гармоника периодических изменений солнечной активности (СА), магнитной активности (МА) и важнейшие биологические ритмы (Владимирский, 1976).

На рис.10.5 схематически показаны основные гармоника периодических изменений солнечной и геомагнитной активностей, а также важнейшие биологические ритмы. Штриховыми вертикальными линиями отмечены характерные периоды (частоты) солнечной цикличности, сплошные вертикальные линии соответствуют ритмам геомагнитной активности, а короткими горизонтальными черточками показаны характерные частоты биоритмов. Видно, что синхронизация биоритмов (включая

макроритмы) факторами внешней среды, по-видимому, представляет собой широко распространённое явление. Практически полное совпадение периодов ритмов с частотной структурой изменений во внешней среде определённо указывает на наличие синхронизации.

10.4. Особенности гелиобиологических ритмов

Если синхронизация имеет место, то появляется корреляция соответствующего биологического показателя с индексом вынуждающей силы, т.е. солнечной (геомагнитной) активностью. Связь, однако, имеет ту особенность, что может изменяться от одного географического района к другому. Причина в том, что собственный период в экосистеме (например, плотность популяции данного вида) определяется совокупностью местных условий, а захват частоты осуществляется по такой гармонике СА, чей период наиболее близок к собственному периоду системы. При неполном совпадении (но близости) этих периодов могут возникнуть биения. В этом случае на кривых, описывающих, скажем, динамику популяций (упоминавшиеся выше «волны жизни») должны наблюдаться характерные детали: одновременное присутствие двух периодов с изменяющимся соотношением амплитуд, постоянное смещение фазы рассматриваемой кривой относительно фазы вынуждающей силы. Во многих случаях кривые колебаний плотности популяций (насекомые, грызуны) обнаруживают разительное сходство с описанной картиной.

Те же соображения, очевидно, применимы и в случае стихийно (на первый взгляд!) протекающих эпидемий и эпизоотий, если полагать, как делали некоторые исследователи, что эпидемический процесс носит автоколебательный характер. Система в некотором приближении может рассматриваться, по меньшей мере, как три связанных осциллятора: колебания в уровне иммунитета, подверженных данному заболеванию индивидуумов, циклические изменения в выживаемости и вирулентности возбудителя, колебания в числе переносчиков возбудителя. В подобной системе синхронизация может возникнуть при воздействии внешней «возмущающей» частоты на любой из упомянутых осцилляторов (при условии соблюдения определенных соотношений между их собственными частотами).

С точки зрения представлений о синхронизации легко понять географическую изменчивость цикличности эпидемических явлений: собственные периоды колебаний в системе (как и в случае волн жизни) определяются совокупностью внешних условий некоторого района. Корреляция с индексами солнечной активности может возникнуть при «захвате» частоты на любой гармонике, лишь бы выполнялось условие близости частот. Амплитуда колебаний «вынуждающего» фактора может быть при этом очень слабо выраженной, синхронизация всё равно произойдёт. Для разных географических районов (разных возбудителей, разных заболеваний) и природа синхронизирующего фактора может быть различной.

Таким образом, гипотеза о принудительной синхронизации биоритмов может оказаться весьма плодотворной для понимания определённых аспектов связи «солнечная активность – биосфера». В частности, становится понятным присутствие высоких гармоник солнечной цикличности во многих периодически протекающих биологических процессах. Получает объяснение географическая изменчивость связи с солнечной активностью таких явлений, как колебания численности популяций и эпидемии. Эта гипотеза служит также хорошим инструментом для анализа причин несопоставимости и неоднозначности («невоспроизводимости») некоторых статистических результатов по гелиобиологическим связям, - факта, давшего повод для сомнений в реальности таких связей.

Чтобы описать причинно-следственные связи и временные сдвиги гелиобиологических ритмов, часто прибегают к известной паре уравнений для цепочки «хищник- жертва» - к уравнениям Лотка-Вольтерра (Lotka, 1925; Volterra, 1926):

$$\frac{dx}{dt} = x(\alpha - \beta y) \quad (10.1)$$

$$\frac{dy}{dt} = -y(\gamma - \delta x) \quad (10.2)$$

где y – численность некоторого хищника (например, волков); x – численность его жертвы (например, зайцев). Производные dy/dt и dx/dt представляют собой скорости размножения двух популяций животных во времени t , а коэффициенты α , β , γ и δ – это параметры, описывающие особенности взаимодействия двух популяций. Иными словами, эти два нелинейных дифференциальных уравнения первого порядка описывают динамику биологических систем в их естественной среде обитания. В рамках такого подхода становится понятной, в частности, динамика популяций отдельных видов диких животных, птиц, насекомых, рыб и т.п.

Причины изменений численности животных объясняются комплексным влиянием природных (географических, климатических, кормовых и т.п.) факторов, а также иерархией связей между животными разных видов. Эти связи могут быть двоякими. В одних случаях циклы размножения животных зависят непосредственно от кормовой растительной базы и погодных условий (пища), а в других опосредованы через систему-цепочку биологических отношений типа «жертва-хищник» (плюс наличие паразитов, конкурентов и т.п.). Наглядным примером этому может служить цикличность пушных зверей в Канаде (рис.10.6): за довольно регулярными периодами размножения ондатры и зайца, питающихся растительными кормами следуют подъёмы численности их хищников.

Естественно, что между временем наибольшего развития популяции безобидных грызунов и периодом роста числа охотящихся за ними лис и волков проходит какое-то время. Поэтому подъёмы численности разных видов происходят на разных фазах 11-летнего цикла СА, т.е. с каким-то сдвигом по времени, зависящим от земных условий и особенностей жизни данного вида. Но, несмотря на подобные отклонения, наблюдается чёткая привязка циклов размножения к определённым фазам 11-летнего солнечного цикла. Например, было установлено, что массовое размножение зайцев в совершенно другом географическом районе (Якутия) совпадает с минимумом солнечных пятен, если кривую прироста численности зайцев-беляков сдвинуть на 5 лет вправо относительно кривой для числа солнечных пятен.

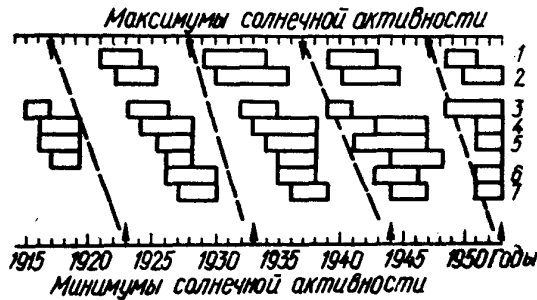


Рис.10.6. Циклические вариации солнечной активности (штрихи) и массового размножения пушных зверей в Канаде: 1 – ондатра; 2 – норка; 3 – заяц; 4 – рысь; 5 – лиса; 6 – илька; 7 – койот; 8 – волк.

Огромная практическая важность учёта этих закономерностей совершенно очевидна, прежде всего, для планирования заготовок пушнины и производства продуктов животноводства. Не менее важно научиться научно прогнозировать эпидемии, эпизоотии, эпифитии и другие подобные события в биосфере на уровне микроорганизмов. Ценность конкретных результатов в этой области была отмечена ещё в 1915 г. А.Л. Чижевским. На примере данных о заболевании дифтерией в Дании в 1860-1910 гг. он показал, что между частотой заболеваний и уровнем СА существует обратная зависимость, со сдвигом двух кривых примерно на 5 лет. При этом, когда в 1894 г. медики начали использовать противодифтерийную вакцину, стихийный ход заболевания существенно изменился, хотя применение вакцины, разумеется, и «не отменило» найденную закономерность.

Рассмотрим ещё одну особенность ритмобиологических ритмов, а именно присутствие высоких гармоник СА в биосферных процессах. Эта особенность хорошо проявляется, в частности, в годовых вариациях толщины колец деревьев. На рис.10.6 приведен спектр мощности колебаний солнечной активности (пунктир) и соответствующие данные (спектр мощности) для вариаций толщины годовых колец деревьев на верхней границе леса в средних широтах, в горах Тянь-Шаня (сплошная кривая). Длительность ряда для толщины колец - около 300 лет. Можно заметить, что в этом ряду представлены не все периоды солнечной активности. Поскольку ряд достаточно продолжительный, такое различие можно было бы связать с особенностями ландшафта, и такое предположение, видимо, справедливо: насколько можно судить, анализируемые спектры прироста деревьев существенно зависят от региона и типа ландшафта. Имеются регионы, где выраженной периодичности в изменчивости прироста нет.

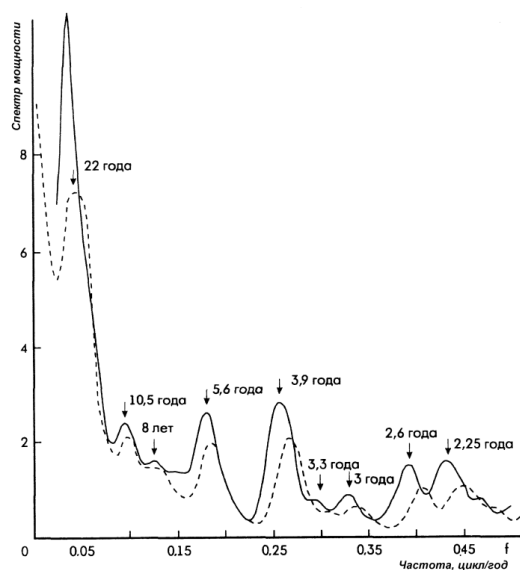


Рис.10.7. Спектры мощности вариаций толщины колец деревьев (сплошная кривая) и солнечной активности (пунктир). По вертикальной оси – величина, пропорциональная квадрату амплитуды колебаний (в произвольных единицах), по горизонтали – частота колебаний (цикл/год), цифры у кривых - значения периода (Ловелиус, 1979).

В большинстве случаев ритмика переносится в экосистему через погодно-климатические факторы, и сейчас известно, что набор периодов в вариациях этих параметров изменяется от одного региона к другому. Установлено, что в условиях влажного климата вариации прироста лучше коррелируют с индексами СА, чем погодно-климатические показатели. Это и есть свидетельство воздействия на процессы роста тех

экологических переменных, которые контролируются солнечной активностью независимо от погодных изменений.

Многочисленные наблюдения показали, что для растительных сообществ важны не только электромагнитные поля, но и электрическое состояние атмосферы. В частности, так называемый гео- и гелиотропизм *растений* определённо обусловлен действием *электрического поля атмосферы*. Другой важнейший фактор – это, несомненно, вариации интенсивности УФ излучения вблизи основной полосы поглощения озона (полоса Гартли от 200 до 300 нм). Этот диапазон приходится на ультрафиолетовое излучение Солнца.

Озоновый слой в стратосфере наиболее сильно поглощает солнечное излучение с длиной волны 253.65 нм. К счастью, если рассматривать весь атмосферный озон при температуре 0°C и нормальном давлении, то озоновый слой толщиной всего лишь 3-4 мм способен снизить интенсивность излучения на этой длине волн на поверхности Земли практически до нуля.

10.5. Космофизические факторы и творческая активность

Как видно из предыдущего раздела, ритмика процессов в биосфере синхронизирована с космофизическими периодами. Поэтому вполне естественно ожидать, что характерные периоды колебаний СА должны найти отражение и в явлениях человеческой цивилизации – в культуре, экономике и истории. И действительно, в научной литературе имеется множество подтверждений такого предположения. Рассмотрим для примера творческую активность человечества на большом интервале времени.

На рис.10.8 представлены кривые творческих достижений выдающихся личностей в области науки, философии, литературы и живописи в таких разных ареалах, как Европа и Китай, начиная с 1400 г. нашей эры. В средние века Европа и Китай представляли собой по существу две независимые цивилизации, очень разные и практически изолированные друг от друга. Тем не менее, как выяснилось, процессы культурной жизни оказались весьма сходными в обоих ареалах. Чтобы показать это, понадобилось немало усилий многих учёных и годы исторических, биографических и космофизических (геофизических) исследований.

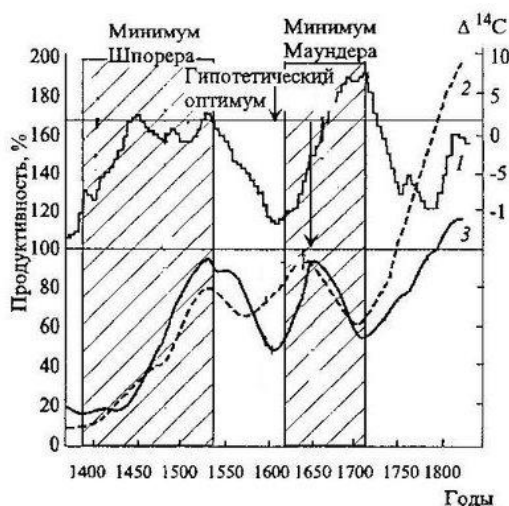


Рис.10.8. Циклы творчества в различных ареалах цивилизации (2-Китай и 3-Европа) в зависимости от уровня солнечной активности (I) за период 1400-1850 гг. (Эртель, Германия, 1998).

Первой и основной трудностью оказался отбор данных о выдающихся учёных, философах, поэтах и художниках для формирования однородных статистических рядов. Далее, встал естественный вопрос, откуда взять необходимые данные о солнечной активности в эпоху, когда регулярные инструментальные наблюдения Солнца отсутствовали (до 1749 г.). На помощь пришёл радиоуглеродный метод (см. раздел 8.3), который позволяет через вариации галактических космических лучей получить надёжные, хотя и косвенные, данные об уровне СА в ту или иную эпоху. Разумеется, понадобился ещё скрупулёзный статистический анализ собранного материала. Радиоуглеродные данные о солнечной активности (проху) представлены на рис.10.7 в относительных единицах и в «перевернутом виде» (правая шкала), т.е. максимальные вариации содержания радиоуглерода ^{14}C соответствуют минимальной активности Солнца, и наоборот. Кроме того, для удобства рассмотрения, кривая 1 для ^{14}C сдвинута вверх относительно кривых творческой активности 2 и 3.

Видно, что между 1400 и 1800 гг. солнечная активность имела две «аномалии» – два больших минимума Шперера (Spörer) и Маундера (Maunder). Временной ряд творческой активности строился путём подсчёта количества произведений и количества творцов с усреднением за каждый 5-летний интервал. При этом учитывался также наиболее вероятный период максимальной продуктивности (*efficiency*) данного творца. Далее продуктивности всех творцов суммировались за каждые 5 лет. Весьма примечательно, что «взрывы» активности в независимых культурах происходят одновременно и сходным образом. Отметим также, что среди исследованных не-европейских цивилизаций (Китай, Япония, Османская империя) китайская культура даёт наиболее убедительный материал для подобного заключения.

Вместе с тем, в поведении кривых 2 и 3 обращают на себя внимание две особенности, требующие отдельного объяснения. Во-первых, в минимуме Шперера продуктивность растёт до конца периода, тогда как в минимуме Маундера (1645-1715) она резко падает за 30 лет до конца периода. Это различие может быть связано с тем фактом, что уменьшение (почти полное прекращение) солнечной активности (по числу пятен) в минимуме Маундера имело более экстремальный характер, чем в минимуме Шперера. По-видимому, для культурного процветания оптимальным является некоторый средний уровень СА, отмеченный горизонтальной линией в верхней части рис.10.7. Иными словами, почти нулевая СА во второй половине минимума Маундера могла быть очень неблагоприятным фактором для расцвета культуры. Эти соображения подкрепляются присутствием более кратковременных (11-летних) флуктуаций творческой продуктивности.

Другая особенность состоит в следующем: творческая активность падает в течение нескольких десятилетий после минимума Шперера, а затем растёт в первые десятилетия минимума Маундера. Причина такого различия, вероятно, обусловлена тем, что в конце минимума Шперера существовал оптимальный уровень СА, после чего творческая продуктивность неизбежно должна была снизиться. С другой стороны, очень глубокая депрессия СА в конце минимума Маундера сменилась трендом к оптимальному уровню, т.е. неблагоприятные условия вскоре исчезли, и начался подъём творческой активности. Заметим, кстати, что наш великий соотечественник М.В. Ломоносов родился как раз перед самым началом эпохи подъёма...

Вполне очевидно, что обсуждаемая интригующая проблема нуждается в дальнейших углублённых исследованиях. Вместе с тем, тот факт, что явные «аномалии» творческой продуктивности проявляются независимо в двух столь далёких культурах, означает, что проблеме можно трактовать в терминах макроэкологии. На данной ранней стадии реальных (научных) гелиобиологических исследований любая гипотеза, связанная с состоянием солнечной системы, носит спекулятивный характер. Однако по мере накопления новых фактов и убедительных доказательств в области СЗС ситуация может измениться, и ныне гипотетические утверждения станут бесспорными концепциями.

10.7. Экономические «волны Кондратьева»

Если в климате, изменениях урожайности, в эпидемических катастрофах и творческой продуктивности присутствуют космофизические периоды, то трудно себе представить, чтобы эти ритмы не получили своего отражения в экономике. Экономические циклы, фигурирующие в современной литературе по динамике экономических показателей, - это хорошо известные космические (природные) периоды. Именно при изучении вариаций экономических показателей было впервые понято то, что динамика очень сложной системы описывается не одним каким-то циклом (ритмом), но их набором, т.е. спектром. В спектре экономических циклов имеется ряд пиков, среди которых выделяются наиболее важные периоды (годы): 3.5; 5.5; 8.0; 11.0; 18.0; 20-22; 54. Короткие периоды (например, 3.5 года) могут иметь определённые региональные особенности. С другой стороны, длительные экономические циклы должны принадлежать всей мировой экономике. Таковыми являются длинные «волны Кондратьева» (54 года), названные в честь выдающегося российского экономиста Н.Д. Кондратьева (1892-1938).

«Волны Кондратьева» уверенно прослеживаются в мировой экономической системе с начала 18-го века сразу по многим показателям – промышленное производство, оптовые цены, число «инноваций» в индустрии, сельском хозяйстве и т.д. Параметры колебаний несколько меняются, отражая эволюционные изменения мирового хозяйства, однако цикличность в целом сохраняется и по настоящее время. О происхождении и природе этих колебаний существует много различных точек зрения, и тем самым становится понятно, что вопрос этот остаётся нерешённым. Нас же в данной книге интересует, в первую очередь, возможная связь «волн Кондратьева» с солнечной активностью и экологией. Иными словами, возникает вопрос: имеется ли синхронизм между пиками «волн Кондратьева» и космофизическими параметрами? Ответ содержится на рис.10.9.

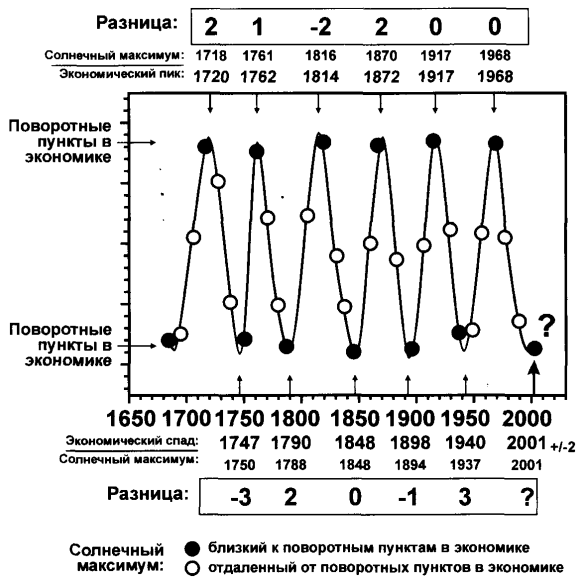


Рис.10.9. Сопоставление данных об экономической конъюнктуре («волны Кондратьева») с солнечной активностью. Поворотные точки экономических колебаний очень близки к некоторым максимумам числа Вольфа (С. Эртель, Германия, 1996). Даты максимумов и минимумов СА до 1749 г. восстановлены по косвенным историческим и геофизическим данным (см. раздел 3.5).

На рис.10.9 показаны положения крайних точек длинных «волн Кондратьева» - их максимумов и минимумов (пиков и провалов). Эти точки определены на основе рассмотрения большого массива данных, характеризующих состояние мировой экономики, начиная с конца 17-го века. Здесь приняты во внимание результаты, полученные представителями различных экономических школ, которые оперировали своими независимыми экономическими показателями (индексами). Поворотные точки в тенденциях мировой конъюнктуры отмечены стрелками, кружками показаны также положения максимумов СА. Те из них, которые располагаются вблизи экстремальных точек «волн Кондратьева», обозначены тёмными кружками, остальные – светлыми окружностями. Как видно из графика, только в двух случаях из 11 разности между датами чёрных кружков (СА) и датами экономических пиков-провалов составляют 3 года, а в среднем не превышают полугодия...

Таким образом, изменения в мировой экономике определённо сопряжены с вариациями солнечной активности: если тенденции в развитии мирового хозяйства изменяются, то это непременно происходит в максимуме солнечного цикла. Маятник экономики качается в такт с солнечными колебаниями. Не суть важно, являются ли экономические осцилляции с полувековым периодом автоколебаниями или экзогенной ритмикой. Ясно, что мировой ритм привносится в экономику Природой.

11. БУДУЩЕЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ

**Мы дети Космоса. И наш родимый дом
Так спаян общностью и неразрывно прочен,
Что чувствуем себя мы слитыми в одном,
Что в каждой точке мир – весь мир сосредоточен.**
А.Л. Чижевский

Как уже отмечалось, солнечно-земная физика в целом уже далеко вышла за рамки первоначального понимания этого термина, а области её исследования тесно переплелись с областями исследования других наук о Земле и Космосе. Например, физика солнечных вспышек – это своеобразный разрез через многие области современной физики: от кинетической теории плазмы до физики частиц высоких энергий. Другим примером может служить гелиобиология, где сошлись (а иногда – решительно столкнулись!) интересы специалистов из таких далёких областей, как физика звёзд, геофизика, биология, медицина и психология. В том же ряду оказались такие области социо-культурных исследований, как история и археология, экономика и социология. При этом, однако, остаются нерешёнными многие фундаментальные проблемы и не исследованы некоторые важнейшие процессы, которые и определяют суть этих научных направлений. Ниже на конкретных и наиболее убедительных примерах мы попытаемся обсудить ряд из них, не претендуя на полноту изложения.

Наряду с фундаментальными проблемами и концепциями, представляют большой интерес прикладные аспекты солнечно-земной физики, в частности, радиационная опасность в космосе, прогнозирование гелио-геофизических возмущений, социо-экономические потери из-за колебаний космической погоды и многие другие. Напомним в связи с этим слова А. Эйнштейна: "Интеллектуальные орудия, без которых было бы невозможно развитие современной техники, пришли в основном от наблюдения звезд". Не подлежит сомнению также огромное мировоззренческое значение (Weltanschauung, или гносеология) результатов солнечно-земной физики.

11.1. Солнечная активность и точные физические измерения

Для достоверности выводов в физике и астрономии (как и в других естественных науках) принципиальное значение имеет точность физических экспериментов и качество астрономических наблюдений. Между тем, в связи с установлением определённых связей между солнечной активностью и многими земными процессами, в обширной космофизической и гелиобиологической литературе уже в течение нескольких десятилетий обсуждается ряд вопросов, которые вызывают большие споры, непонимание, неприятие и т.д., вплоть до обвинений в фальсификации результатов наблюдений и измерений. К ним можно отнести, например, проблему так называемых макроскопических флуктуаций в процессах разной природы, возможное влияние солнечной активности на точность физических измерений, так называемые «артефакты» в астрофизических наблюдениях и открытиях последнего времени, и в целом глобальную проблему физической метрологии.

Изучение макроскопических флуктуаций в процессах разной природы продолжается уже более четырёх десятилетий. Явление макрофлуктуаций было впервые обнаружено в биохимических опытах с различными ферментами (Шноль, 1985), и суть его состоит в следующем. Предположим, что в определенном объёме водного раствора быстро измеряется активность некоторого фермента, т.е. скорость химической реакции. Оказывается, что при последовательных длительных измерениях получают значения скорости, существенно отличающиеся друг от друга, причём на величину, много большую ошибки прибора. Эти значения не распределены непрерывно: они образуют некоторый

ряд дискретных величин-«состояний». Некоторые из таких «состояний» реализуются редко, другие – много чаще. Распределение реализованных за какое-то время состояний имеет вид серии «пиков», разделённых «провалами» - значениями, которые почти не встречаются. Переход от одного такого состояния к другому происходит за относительно короткое время – менее 0.01 сек. Самое же поразительное состоит в том, что этот переход совершается кооперативно-синхронно в макрообъёме или синхронно в двух рядом расположенных сосудах (отсюда произошло и название «макрофлуктуации» - быстрые дискретные изменения параметра в макрообъёме).

Сначала казалось, что это явление связано исключительно с водными растворами белков. Однако по мере выполнения многолетней исследовательской программы в Институте биофизики АН СССР (г.Пушкино-на-Оке) постепенно выяснилось, что спектры дискретных состояний (гистограммы) наблюдаются в процессах самой разной природы, включая такие, как электрофоретическая подвижность неорганических частиц, различия интервалов времени между разрядами в релаксационном генераторе на неоновой лампе и ряд других. Природа макрофлуктуаций остаётся загадкой, а подробное обсуждение этой фундаментальной проблемы выходит за рамки нашей книги. Мы рассмотрим здесь только один её аспект – возможную корреляционную связь (или причинную обусловленность?) с солнечной активностью. По этому поводу были получены важные эмпирические закономерности, касающиеся эффектов солнечной активности в физико-химических системах. К их числу принадлежит результат, показанный на рис. 11.1.

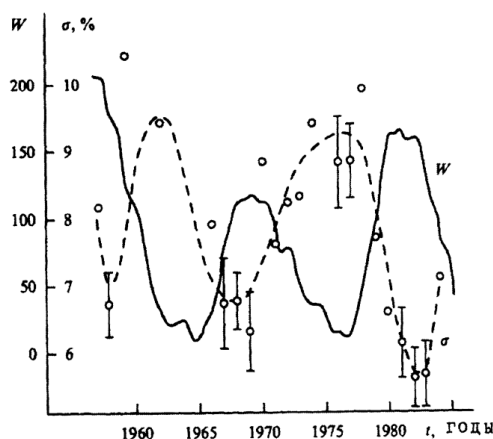


Рис.11.1. Амплитуда макрофлуктуаций σ (%) достигает наибольших значений в эпоху минимума СА. W – среднесуточные сглаженные числа Вольфа, кружки – среднегодовые значения σ , штриховая линия – их аппроксимация по методу наименьших квадратов. Данные получены для химических и биохимических реакций в растворах (Удальцова и др., 1987).

Из графиков рис.11.1 следует, что амплитуда макрофлуктуаций резко возрастает в годы минимума солнечной активности. Это равносильно утверждению, что на эпоху минимума активности приходится наибольший разброс в скоростях химических и биохимических реакций в водном растворе. В поведении амплитуд макрофлуктуаций явно прослеживается 11-летний период, в среднесуточных данных виден также широко известный период около 2 лет, имеется, видимо, и годовой период. Была обнаружена положительная связь амплитуды макрофлуктуаций с колебаниями критических частот ионосферы, т.е. с изменчивостью электронной концентрации (когда последняя стабильна, то амплитуда σ возрастает). Было также показано, что величина σ весьма чувствительна к направлению межпланетного магнитного поля, причём эффект секторных

границ ММП есть как в амплитудах макрофлуктуаций, так и в собственно физико-химических показателях.

Несмотря на обнаруженные корреляции, в проблеме макрофлуктуаций остаётся много неясного, и пока убедительной модели макрофлуктуаций не существует. Тем не менее, данные о космофизических корреляциях, полученные при изучении макрофлуктуаций, очевидно, находятся с ними в разумном согласии. Но самый главный вывод состоит в том, что эффекты СА, по-видимому, присутствуют во всех физико-химических процессах, т.е. это не чисто биологическое, а общезфизическое явление. Действительно, макрофлуктуации присущи, по меньшей мере, всем конденсированным средам, всем жидким и твёрдым телам. Такой исключительно ответственный вывод (Владимирский и Темурьянц, 2000), очевидно, требует серьёзных экспериментальных подтверждений. Если оперировать изменениями спектра состояний, то эффекты СА, по мнению этих авторов, будут определённо обнаружены в любых измерениях при их надлежащей точности. Если такая детальная информация недоступна, то можно ограничиться простейшей оценкой спектра (обычное стандартное отклонение, или дисперсия). Приведём один весьма показательный пример.

На рис.11.2 приведены результаты довольно рутинных измерений по контролю одного из радиоактивных эталонов – эталона трития. Подобные измерения проводятся регулярно, в течение длительного времени и для различных радиоактивных эталонов, применяемых, в частности, в радиобиологических исследованиях, в радиационной медицине и других областях. В рассматриваемом случае измерения скорости счёта N электронов от β -распада радиоактивного трития проводились с помощью жидкостного сцинтилляционного счётчика (Авдонина и Лукьянов, 1995). Ранее (1992) авторы эксперимента, изучая достаточно длинные ряды (при отсутствии дрейфа в средней скорости счёта), обнаружили предпочтительные относительно узкие интервалы N , напоминающие гистограммы макрофлуктуаций. Из анализа своего материала, полученного для нескольких различных радиоактивных образцов, они пришли к предварительному заключению, что наблюдаемые вариации скорости счёта обусловлены не изменениями вероятности радиоактивного распада, а нестабильностью эффективности регистрации продуктов распада в системе «фотоумножитель- сцинтиллятор».

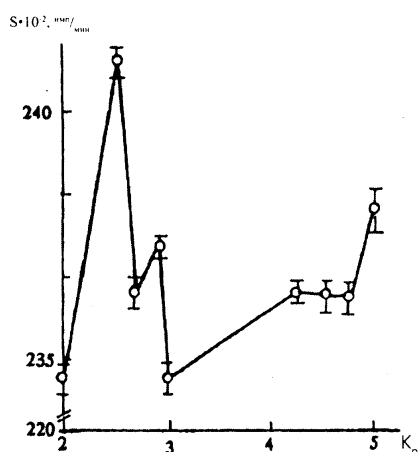


Рис.11.2. Среднеекватричное отклонение S при измерениях активности эталона трития в зависимости от K_p - индекса геомагнитной активности. Регистрация производилась с помощью жидкостного сцинтилляционного счетчика (Авдонина и Лукьянов, 1995).

Для проверки такого вывода были проведена серия специальных измерений «эталон трития – жидкий сцинтиллятор». Основным результатом обработки этих измерений показан на рис.11.2: оказывается, максимальный разброс скорости счёта приходится на интервалы времени с низким значением Kp -индекса, причём в такие интервалы несколько возрастает и сама скорость счёта. Таким образом, на примере этого и некоторых других подобных экспериментов можно утверждать, что в этой точке принципиально столкнулись все участники «триады» - солнечная активность, макрофлуктуации и... «представление о влиянии на измерения неконтролируемого фактора», связанного, по-видимому, с вариациями геомагнитной активности и ионосферной возмущённости (Владимирский и Темурьянц, 2000). Неконтролируемый фактор, согласно этой гипотезе, может изменять физико-химические свойства детектора – прозрачность, коэффициент преломления и вязкость воды или раствора (см. раздел 10.1), коэффициент упругости нити (крутильный маятник), структуру n - p перехода в полупроводниковом элементе и многие другие. Это неизбежно повлечёт за собой изменение эффективности регистрации, что приведёт к искажению результатов измерений.

Изменение эффективности регистрации различных детекторов под влиянием внешних условий, а также калибровка детекторов, предназначенных для изучения конкретного физического явления, – это две хорошо известные, извечные проблемы, присутствующие в любом эксперименте, как в земной лаборатории, так и в космосе. При этом, как принято в физике, речь всегда идёт о контролируемых факторах (эффективности регистрации) или о контролируемых начальных условиях (в случае калибровки). Поэтому, на наш взгляд, весь вопрос в том, **на каком уровне пороговой интенсивности (потока, скорости счёта и т.п.) ведётся поиск и оценивается вклад «неконтролируемого фактора».** Сами авторы гипотезы признают, что эффекты, описанные выше, в общем малы и не подрывают основ ядерной физики и математической статистики. Например, «если проверять классические аксиомы статистики ядерных отсчётов обычными методами с применением всего массива измерений, то заметить ничего не удаётся. Для поиска временной организации регистрируемых импульсов нужны более чувствительные методы...».

В рамках предлагаемой концепции авторы обсуждают результаты точных измерений ряда важнейших физических констант - гиромагнитного отношения протона, скорости света, гравитационной постоянной и других. Далее подвергаются сомнениям (отчасти справедливо) результаты многих фундаментальных экспериментов 20-го века (например, попытки регистрации гравитационных волн, вариации потока нейтрино из недр Солнца). При этом некоторые выдающиеся открытия (например, регистрация всплеска нейтрино от вспышки Сверхновой SN1987A 23 февраля 1987 г., вариации «красного смещения» далёких галактик и другие) вообще трактуются как «самые знаменитые артефакты XX века»... Все существующие трудности измерений и их интерпретации авторы предлагают объяснять тем, что отношение «сигнал/шум» непредсказуемо модулируется воздействием неконтролируемого фактора. Последний меняет физические свойства радиохимического раствора, сцинтиллятора, полупроводникового элемента, любого конденсированного вещества детектора. Тем самым возникает нестабильность эффективности регистрации.

Из личного опыта автору известно, насколько тщательно обдумываются детали важного эксперимента, какие меры предосторожности предпринимаются для того, чтобы исключить влияние неконтролируемых факторов на результаты измерений (наблюдений), и как методологически скрупулёзно проводится последующий анализ данных. Часто приходится умышленно «огрублять» чувствительность детекторов, т.е. сознательно ухудшать качество эксперимента, хотя логика исследований требует обратного – как можно детальнее измерять всё более и более тонкие эффекты и т.д. Например, статистическая достоверность редких мюонных всплесков на Баксанском Подземном Сцинтилляционном Телескопе за период 1981-2006 гг. не вызывает сомнений, показана их корреляция с солнечными вспышками, но физическая природа всплесков пока остается загадкой.

Здесь нет возможности вдаваться в специальные детали. Однако следует признать, что открытие макрофлуктуаций и гипотеза о «неконтролируемом факторе» (какова бы ни была его природа) поднимают глобальную проблему метрологии в целом. Возможно, тут потребуются коррекция важнейших основ методологии научного исследования в естественных науках. Остаются неясными, в частности, вопросы о достоверности невоспроизводимых «редких событий», а также о том «пороге», или «пределах чувствительности», которых, возможно, уже достигли современные физические эксперименты. Как бы то ни было, аргументированная и беспристрастная дискуссия о природе макрофлуктуаций и «неконтролируемого фактора» в физико-химических процессах на Земле представляется очень хорошим стимулом для дальнейшего глубокого анализа и новых экспериментов.

11.2. Гелиобиология и медицина

В предыдущей главе достаточно подробно говорилось о возможном влиянии естественных электромагнитных полей (ЭМП) на биосферу, анализировался механизм этого влияния, приводились примеры магнитобиологических экспериментов. Ниже мы расскажем о некоторых новых подходах к проблеме влияния геомагнитных бурь на человеческий организм. Речь пойдёт о специальной программе измерений электрической проводимости в биологически-активных точках (БАТ) человека, о глобальном телекоммуникационном мониторинге (проект «Гелиомед»), а также о последних результатах анализа медицинской статистики для периодов магнитных бурь.

В 1998 г. в г.Троицке под Москвой были начаты регулярные измерения электрической проводимости в биологически-активных точках (БАТ) человека. В измерениях, которые продолжаются и в настоящее время, участвует почти постоянный контингент из 25-30 человек разного возраста и пола (сотрудники ИЗМИРАН). Аналогичные измерения проводились или проводятся в Одессе, Якутске, Симферополе, Киеве и других городах. С тех пор в этом длительном эксперименте с применением метода электропунктурной диагностики накоплен большой объём данных, которые постепенно анализируются. Как выяснилось, “обычные” здоровые люди, выполняющие свои стандартные обязанности на рабочих местах, реагируют на гелиогеофизические возмущения определенными физиологическими сдвигами, причём синхронно в различных городах. При этом наблюдаются типологические особенности реагирования, и имеет место широтный эффект (Рагульская, 2005). Здесь мы приведём только один пример, интересный, прежде всего, с точки зрения реакции человеческого организма на одиночную магнитную бурю. Характерные типы реагирования показаны на рис.11.3.

Наиболее существенные особенности реакции сводятся к следующему. Наблюдается воспроизводимый и самоподобный характер формы реакции организма человека на различные внешние воздействия, причём как во временных, так и в пространственных масштабах, на всех уровнях организации системы, от клетки до коллективов людей. На рис.11.3 приведена характерная 3-фазная форма адаптационной стресс-реакции (уровень отдельных органов, организма человека в целом, и коллектива), а также динамика ее протекания при нормальном и патологическом течении процесса в спокойные и магнитовозмущенные дни. Выявлено, что вспышечные процессы на Солнце и следующие за ними изменения в спектре естественных сверхнизкочастотных электромагнитных полей, космических лучах и флуктуациях атмосферного давления вызывают устойчивую и воспроизводимую реакцию человека, как на уровне функционирования отдельных систем (вегетативной нервной системы, внутренних органов, изменения параметров кардиоицикла), так и организма в целом.

Реакция организма состоит из следующих трех фаз: 1) синхронизация организма с выраженным гиперфункционированием всех органов и систем (первые сутки, обследуемыми субъективно не ощущается); 2) десинхронизация со склонностью к

гипофункционированию (вторые – третьи сутки от начала реакции); и 3) релаксации (до 4-7 суток). Максимально полно три указанные фазы регистрируются у здоровых людей (подробности см. <http://helios.izmiran.rssi.ru/helioecology/index.html>).

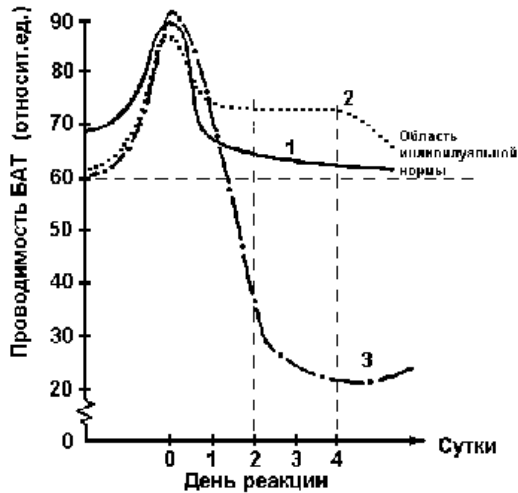


Рис.11.3. Реакция человеческого организма на одиночную магнитную бурю по измерениям проводимости в биологически-активных точках (БАТ). Приведен характерный вид амплитудных изменений проводимости для различных групп обследуемых: 1 – практически здоровые люди; 2 – реакция организма с острым воспалением; 3 – реакция хронически больного человека (Рагульская и Хабарова, 2001). Пунктирной горизонтальной линией отмечен уровень индивидуальной нормы.

Многолетний электропунктурный эксперимент охватил такие города, как Якутск, Симферополь, Одесса, Киев, Санкт-Петербург, Баку, София и некоторые другие. Недавно он получил развитие на новой методической основе в большом региональном масштабе. С 2003 г. работа идёт уже в рамках российско-украинского проекта "Гелиомед". Цель этого телекоммуникационный мониторинга – изучение биотропного воздействия космической погоды на человека. В основу нового метода положено создание распределенной телекоммуникационной сети научных центров длительного мониторинга физиологических параметров организма человека и окружающей среды. Сеть начала работать на едином оборудовании и по единому протоколу исследований с он-лайн регистрацией текущих данных на едином портале <http://geliomed.immsp.kiev.ua>. К 2010 году он-лайн база данных составляет более 50 000 измерений электрокардиограмм (ЭКГ) в гг. Москва, Киев, Симферополь, Якутск, Иркутск, Саратов. По данным, снятым с первого отведения ЭКГ, строится характерная фазовая траектория сигнала в двумерном пространстве, а затем исследуется поведение траектории в зависимости от внешних нагрузок и космобиологической (геомагнитной) ситуации. О методике, направлении и уровне исследований можно судить по некоторым результатам, сформулированным ниже.

1. Существует выраженная индивидуальная программа реагирования организма на последовательность стационарных нагрузок.
2. Во время магнитовозмущенных дней наблюдается инверсия этой программы.
3. Если форма текущей траектории сигнала имеет небольшое количество траекторий, похожих на нее, то данная траектории является артефактом:

$$\left(\sum_{j=1, j \neq i}^N (R(V_i, V_j) > B)\right) \leq (K * N) \Rightarrow V_i = \text{артефакт} \tag{11.1}$$

где N – общее количество дней, для которых имеются данные для выбранного пациента; V_i – i -тая траектория, $R(V_i, V_j)$ – функция корреляции; B – порог схожести (если значение функции корреляции между двумя траекториями превышает данный порог, то считается, что они имеют близкую форму); K^* – порог группы (если тестируемый вектор имеет количество векторов, на которые он похож, меньше заданного порога, то считается, что заданная траектория является артефактом). Для данных «Гелиомед» оптимальные значения двух последних параметров: $B = 0.8$ и $K^* = 0.1$. По первым результатам проекта вырисовывается следующая картина.

1. Существует не менее 2-3 квазистабильных уровней функционирования сердца.
2. При дополнительной физической нагрузке (20 приседаний за 30 сек) исследуемая биосистема переходила в основное моносостояние. При воздействии одиночной магнитной бури наблюдался обратный эффект – число более хаотических состояний в фазовом пространстве увеличивалось.
3. Численное моделирование подтвердило, что без внешней нагрузки в соотношении 8:2 наблюдается не монопортрет кардиоциклов, а суперпозиция нескольких топологически различных фазовых состояний – доминантного (более упорядоченного) и нескольких возбужденных (более хаотических).
4. Кратковременные хаотические флуктуации функционирования сердца для здорового организма являются адаптационной нормой и присутствуют во всех рассмотренных реконструкциях ЭКГ.

Обобщая полученные результаты, можно сформулировать два важных вывода:

1. Существуют выраженные индивидуальные адаптационные программы нормального реагирования биосистем на космогеофизические факторы. Эти программы незначительно варьируют на уровне популяции в зависимости от состояния здоровья, этнической принадлежности, географической широты проживания, фазы цикла СА и сезона.
2. Здоровье – это популяционная норма, а болезнь следует считать индивидуальным сломом адаптационной программы.

При этом адаптационная роль космогеофизических факторов в жизни данной популяции оказывается очень многогранной. Они выступают, прежде всего, в качестве слабого тренирующего фактора для адаптационно-устойчивых членов популяции. С другой стороны, они же служат каналом отбраковки нежизнеспособных членов популяции и обеспечивают синхронизацию индивидуальных времен биообъектов при их взаимодействии между собой. Далее, эти факторы являются синхронизатором общих ритмов популяции и, наконец, создают условия для генерации новой информации в процессе эволюционной адаптации биосистем в целом. Если вернуться к экологической роли магнитной бури, то её не следует считать ни благом, ни злом, а лишь нормальным фактором внешней среды, объективным синхронизатором внутренних ритмов отдельного человека и социума в целом.

11.3. Магнито-биологический эффект

До последнего времени в гелио-биофизических исследованиях для обработки и анализа наблюдений использовался математический аппарат, основанный на простейших статистических моделях. В таких моделях обычно не учитывается многофакторный характер проблемы, т.е. большая вероятность одновременного воздействия гелио-геомагнитных, метеорологических, социальных и других факторов. Не учитываются также нестационарность некоторых процессов, например, эффект блуждания фазы гелио-геофизических и биологических ритмов. При изучении воздействия магнитной бури на человека (или магнито-биологического эффекта, МБЭ) особую трудность представляет его нелинейность, например, существование биотропных амплитудно-частотных окон воздействия ЭМП.

Следует отметить, что в солнечно-земной физике в целом для изучения гелио-геофизических рядов данных уже давно применяются такие мощные современные методы, как вэйвлет-анализ, нейронные сети, распознавание образов. Однако в одной из важнейших областей СЗФ – в гелиобиологии – подобные подходы до настоящего времени игнорировались. Недавно в Институте космических исследований РАН (Москва) была критически рассмотрена применимость этих методов к задачам гелиобиологии (Ожередов, Бреус, 2008, 2010) и показана их ограниченность. Был сделан вывод о том, что при изучении МБЭ необходимо использовать современные методы ситуационного анализа. Одна из частных задач сводилась к выявлению биотропных областей для соответствующих характеристик космической и земной погоды с помощью методов распознавания образов. При этом авторы опирались на известную концепцию линейной оболочки (Пытьев, 2004), которая является логическим продолжением и развитием методики сингулярного спектрального анализа.

Такой подход позволил получить корректные результаты в условиях сильного перекрытия выпуклых оболочек, построенных по данным о заболеваемости инфарктом миокарда и температуры/давления атмосферы. Для анализа использовалась медицинская статистика по Москве за 1992-2005 гг. Как выяснилось, быстрые скачки K_p -индекса, связанные с магнитными бурями, обладают существенной биотропностью (18.05%) в отношении острого инфаркта миокарда и острых нарушений мозгового кровообращения. Что касается больных гипертонической болезнью (ГБ), то удалось показать, что оба фактора – магнитное возмущение (K_p) и колебания атмосферного давления (P_a) – действуют одновременно. При этом их относительный вклад в МБЭ выражается соотношением: $6.0 (K_p) : 4.8 (P_a) = 5 : 4$, т.е. вклад P_a в МБЭ составляет 80% от вклада K_p . Для наглядности эти результаты показаны на рис.11.4.

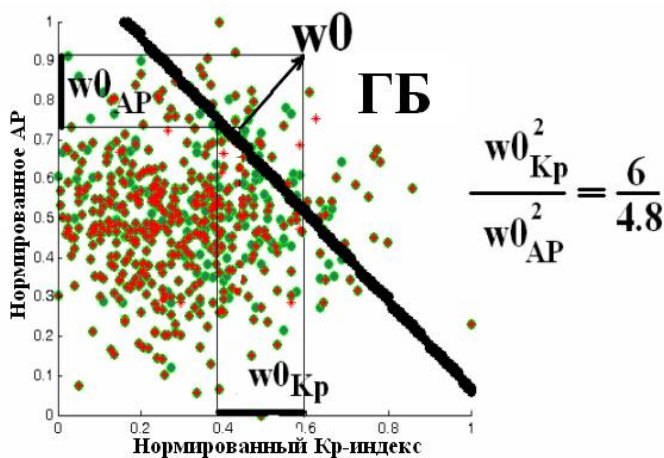


Рис.11.4. Результаты линейного разделения двумерного пространства признаков (K_p -индекс и AP – атмосферное давление) для выявления влияния погодных условий на артериальное давление больных гипертонией (ГБ). Оба фактора действуют одновременно с относительным вкладом в это воздействие: $6.0(K_p)/4.8(AP) = 5 : 4$ (Ожередов, Бреус, 2008).

Таким образом, одной из задач солнечно-земной физики является поиск определенной конфигурации пространства признаков обычной и космической погоды и определение критической области в этом пространстве. Только при этом условии утверждение о том, что при попадании вектора признаков в критическую область возникает выбранный биологический отклик, будет иметь достаточную достоверность и уверенность.

Не вызывает сомнения, что разработанные в ИЗМИРАН и ИКИ РАН подходы могут быть использованы, в частности, для автоматического контроля влияния космической и земной погоды на человека в системах прогноза, основанных на спутниковой информации.

То, что «среда обитания» земной биосферы не вполне изолирована от космоса, уже никого не удивляет. Но не может не поражать многообразие и широта диапазона реакций на космические воздействия. Чтобы подчеркнуть значимость магнито-биологического эффекта, отметим, что даже организм здоровых мужчин-космонавтов, работающих на орбитальной станции, «чувствует» магнитные бури (Бреус, 2003). Как известно, космонавты относятся к особой «группе риска», поскольку их адаптационная система перенапряжена действием другого стрессорного фактора – невесомости. По данным медицинских измерений на борту орбитальной станции «Мир» и на кораблях «Союз», у космонавтов во время геомагнитного возмущения достоверно наблюдались изменения сердечного ритма и регуляции тонуса сосудов. Эти реакции имели свойства неспецифического и специфического стресса, при чём их особенности зависели от исходного состояния организма и – длительности полёта и условий посадки на Землю.

11.4. Перспективы космонавтики

В этом разделе мы рассмотрим несколько наиболее серьёзных практических проблем, связанных с планированием, подготовкой и осуществлением полётов космических аппаратов (КА) различного назначения. Речь пойдёт, прежде всего, об аномалиях (сбоях) в работе КА под действием факторов космической погоды. Интересная сводка данных о таких сбоях была получена по итогам полётов служебных советских (российских) спутников серии *Космос* в 1970-1997 гг. Все спутники имели круговые орбиты с высотой 800 км и наклоном около 74°. В общей сложности, были отобраны данные по 49 спутникам, которые были затем подвергнуты анализу с точки зрения корреляции между операционными аномалиями и солнечно-земными возмущениями. На рис.11.5 частота появления сбоев показана в сравнении с ходом солнечной активности. В качестве параметра СА использовался поток радиоизлучения на волне 10.7 см. Кривая временного хода аномалий аппроксимировалась затем полиномом 5-ой степени.

На рисунке отчётливо видно негативное воздействие СА на частоту сбоев в работе бортовой аппаратуры. В частности, общий уровень сбоев в периоды максимумов СА оказался в несколько раз выше, чем в период минимума. Как показывает корреляционный анализ, коэффициент корреляции между годовыми значениями частоты сбоев и уровнем радиопотока на волне 10.7 см за период 1970-1989 гг. составляет около 0.6. Была также детально изучена корреляция между частотой операционных аномалий и геомагнитными возмущениями, однако при этом не был выделена доля вариаций частоты, обусловленная воздействием заряженных частиц на электронику спутников.

Если говорить о спутниках связи, то следует, прежде всего, упомянуть хорошо зарекомендовавшую себя американскую систему спутников GPS (Global Positioning System). В СССР (России) аналогичная система называется ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система). Система «ГЛОНАСС» Российского космического агентства требует очень точного измерения времени, точного измерения неравномерности вращения Земли. Небольшого неравномерного вращения Земли (см. рис.9.10) достаточно, чтобы это могло привести к сбою в спутниковых системах, в системах навигации. Таким образом, надёжная работа чисто прикладных (технологических и/или служебных) ИСЗ определённо зависит, по крайней мере, от трёх текущих параметров космической погоды – радиации, геомагнитных возмущений и неравномерности вращения Земли. В долговременном плане нужно учитывать также торможение спутников из-за вариаций плотности атмосферы Земли (см. раздел 9.5).

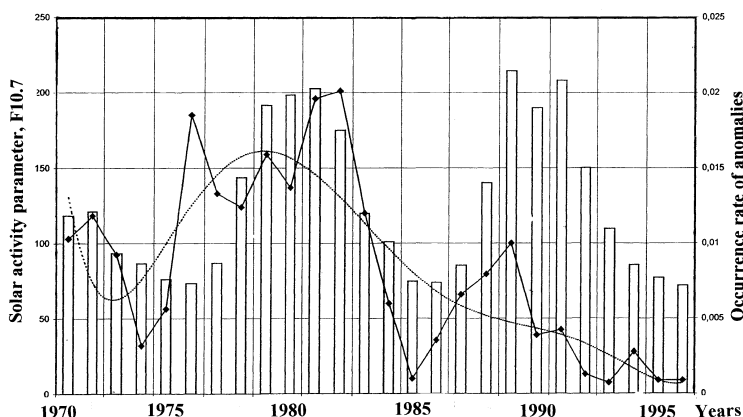


Рис.11.5. Частота различных аномалий в работе служебных низкоорбитальных спутников серии Космос (ломаная линия), её аппроксимация полином 5-ой степени (тонкая сплошная кривая) и временной ход солнечной активности (гистограмма) в 1970-1997 гг. (Чижиков, 2002).

В последние годы разрабатываются системы спутников связи для нового направления в здравоохранении – телемедицины. Отчасти это связано с большой удалённостью отдельных районов России от крупных городов. Интересно отметить, что не только правительство России заинтересовано в цифровом вещании, но и многие частные предприятия. Например, компания “Газком” продолжает реализацию программы создания системы “Ямал”. Дело в том, что сегодня РАО «Газпром» владеет сетью газопроводов протяженностью более 140 тыс. км, а значительная часть этих километров расположена в местах полного отсутствия проводной наземной связи. Поэтому понадобилось создать систему спутниковой связи «Ямал», которая предназначена для обеспечения современными видами связи предприятий российской газовой промышленности. С этой задачей системы сопряжена еще одна - контроль за состоянием потенциально опасных объектов (такая опасность представляется вполне реальной, см. рис.1.2). В ее состав входят спутник связи “Ямал-100” (90 град. в. д.), центр управления полетом, сеть связи и передачи данных, сеть спутникового цифрового телевидения, а также центральный объединенный узел спутниковой связи и телевидения. С помощью этой системы предоставляется целый ряд телекоммуникационных услуг: телефония и передача данных, доступ в Интернет, цифровое телевидение, частотный ресурс спутника “Ямал-100”. Спутник был введен в эксплуатацию в декабре 1999 г., зона его охвата - практически вся Россия, страны СНГ, ряд стран Европы и Азии. Наземный ресурс состоит из 137 приемных станций.

В настоящее время через спутник “Ямал-100” организована трансляция ряда центральных телевизионных каналов (“Культура”, НТВ, АРТ, АСТ, “Дарьял-ТВ”, ТНТ, ТВ-3, МТВ), трех государственных телевизионных каналов Туркмении, а также ряда региональных телекомпаний России. Сейчас “Газком” ведет работы по развитию системы спутниковой связи и планирует вывести на орбиту еще два спутника “Ямал-200”. Добавим к этому, что даже на таком высокотехнологичном коммерческом ИСЗ, как «Ямал-100», во время известной мощной вспышки 14 июля 2000 г. (Bastille Day Event, BDE) наблюдались сбои в системе датчиков звёздной ориентации. Этот КА был запущен 16 сентября 1999 г., и на его борту впервые в России началась эксплуатация звёздного датчика, определяющего ориентацию по съёмке произвольного участка звёздного неба. Сбои были вызваны приходом к орбите Земли мощного потока ускоренных частиц от Солнца.

Существует ещё одна проблема, интересная с точки зрения космофизики и очень важная для практической космонавтики, а именно – обеспечение радиационной безопасности пилотируемых космических кораблей на межпланетных трассах. Сегодня речь идёт фактически о полёте к Марсу и обратно, который предполагается реализовать в ближайшие 15-20 лет. Поскольку для выведения КА на марсианскую орбиту необходимо выполнять несколько гравитационных маневров в межпланетном пространстве, то часть его траектории будет неизбежно проходить в областях, где силовые линии ММП будут проектироваться на залимбовые участки Солнца. Поэтому для планирования подобного полёта представляет интерес гелиодолготное распределение солнечных протонных событий, включая невидимую сторону Солнца. Есть основания считать (см. раздел 7.8), что распределение солнечных протонных вспышек (СПС) является симметричным по гелиодолготе. Отсюда можно заключить, что примерно половина вспышек-источников СПС будет невидимой для марсианского наблюдателя.

Такая ситуация побуждает думать о том, что на борту пилотируемого КА на пути к Марсу необходимо иметь собственные датчики-детекторы солнечных излучений. Датчики оптического, радио и рентгеновского диапазонов будут обеспечивать экипаж полезной прогностической информацией. Иными словами, в наиболее оптимальном случае экипаж межпланетного корабля фактически должен иметь автономную (бортовую) систему мониторинга и прогнозирования радиационной обстановки почти на всём пути следования к Марсу и во время пребывания на его поверхности... Понятно, что это неизмеримо осложняет планирование, подготовку и проведение марсианской экспедиции.

Если рассматривать временной профиль СПС, то критическим фактором окажется время от начала события до достижения радиационно-опасного уровня интенсивности СКЛ. В зависимости от условий распространения, даже для «хорошо связанных» с Солнцем событий, это время, вероятно, составляет порядка 1.0 часа. Для практических оценок динамики потоков и радиационных доз в зависимости от расстояния до Солнца можно пользоваться эмпирическими соотношениями, приведенными в разделе 7.8. Такие оценки для орбиты Марса пока отсутствуют. Однако для иллюстрации проблемы в целом можно рассмотреть один из «наихудших» случаев радиационной обстановки на орбите Земли (рис.11.6).

На рис.11.6 показаны временные профили интенсивности СКЛ по наблюдениям нейтронного монитора на ст.Апатиты (верхняя панель) и динамика мощности дозы (нижняя панель) по измерениям на борту орбитальной космической станции (ОКС) «Мир» во время серии больших протонных событий в сентябре-октябре 1989 г. Над каждой ступенькой гистограммы (нижняя панель) написано максимальное значение параметра L на данном витке, характеризующее эффект геомагнитного обрезания. Интересно отметить, что мощность дозы в событии 29-30 сентября имела двухпиковую структуру, причём со сдвигом примерно на 4.5 витка (4.5 часа) относительно начала события ($\leq 12:00$ UT). Вместе с тем, не было обнаружено однозначной связи между динамикой дозы, измеренной на борту околоземных ИСЗ, и данными отдельных наземных детекторов.

Радиационный эффект за счёт изменения геомагнитной жёсткости обрезания, R , при совпадении с большим СПС может оказаться более опасным, чем в случае отдельного изолированного СПС. Это вытекает из сравнения результатов измерений дозы на борту орбитального комплекса «Мир» 29 сентября 1989 г. и во время серии СПС и геомагнитных возмущений между 19 и 24 октября 1989 г. Сначала радиация усилилась до 0.375 рад в 16:00 UT 29 сентября 1989 г. В дальнейшем доза возросла до 1.5 рад; это случилось около 03:00 UT 19 октября 1989 г. во время большого геомагнитного возмущения. Последнее произошло в период, когда протонное событие 19 октября всё ещё находилось в процессе развития. Такое различие отчасти может быть приписано тому факту, что в момент максимума события 29 сентября станция «Мир» находилась в условиях максимального геомагнитного экранирования. Однако, представляется

очевидным, что эффект совпадения протонного события и большого геомагнитного возмущения не следует преуменьшать.

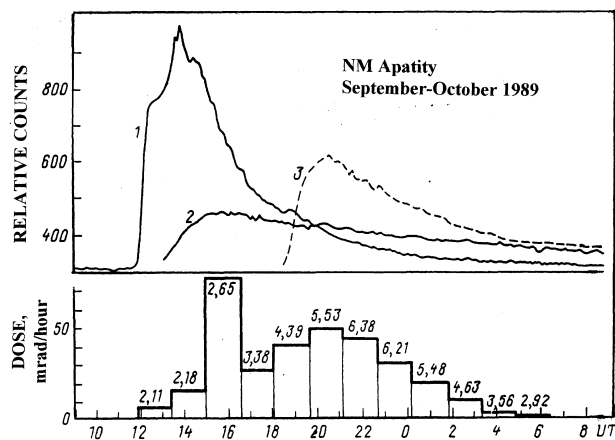


Рис.11.6. Временные профили интенсивности СКЛ по наблюдениям на нейтронном мониторе ст.Апатиты для событий 29 сентября (1), 19 октября (2) и 24 октября (3) 1989 г. (верхняя панель) и временной ход мощности дозы за один виток орбиты (Арестова и др., 1991) по измерениям с помощью сцинтилляционного детектора на борту космической станции «Мир» (нижняя панель).

11.5. Прогнозирование космической погоды

Вероятно, не будет большим преувеличением сказать, что на стадии зарождения и на первых этапах развития солнечно-земная физика была по преимуществу прикладной наукой. Достаточно вспомнить, насколько важными для целей морской и воздушной навигации и связи всегда были, например, сведения о состоянии геомагнитного поля и ионосферы Земли. Более того, часть таких сведений была крайне важна в условиях войны. При этом случались иногда и научно-исторические курьёзы: например, радиоизлучение солнечных вспышек было впервые замечено (фактически открыто) в феврале 1942 г. английскими радиоинженерами, озабоченными борьбой с немецкими подводными лодками. Кстати сказать, первое наземное возращание солнечных космических лучей (СКЛ) также было зарегистрировано 28 февраля 1942 г. В целом, однако, до середины 1950-ых годов (до начала МГГ - Международного Геофизического Года), по-видимому, ещё не было ясного понимания единства астрономических (солнечных) и геофизических наблюдений: геофизика и гелиофизика развивались параллельными, почти независимыми путями.

С другой стороны, уже давно стало понятно, что для практических (экономических, оборонных и других) нужд прогноз возмущений геомагнитного поля и ионосферы стал не менее важен, чем обычный метеопрогноз. По мере накопления знаний о ближайших околоземных оболочках (атмосфера, ионосфера, магнитосфера) появилась уверенность в том, что источником и «дирижёром» возмущений является Солнце. Не случайно в наше время широко используется термин «космическая погода», который неявно указывает не только на источники и причины геофизических «бурь», но и намечает направление и конечную цель научных исследований. Таким образом, возникает многоплановая задача солнечно-земной физики – создать научные и методические основы прогнозирования возмущений околоземного и межпланетного пространства. И хотя принципиальные аспекты проблемы представляются достаточно ясными, начинать обсуждение приходится

с перечня ограничений и трудностей в этом деле. Прежде всего, необходимо представлять себе пределы прогнозирования солнечных, гелиосферных и магнитосферных возмущений.

Установлено, что все наиболее сильные гелиосферные и магнитосферные возмущения имеют солнечные причины. Их часто связывают с теми или иными наблюдательными признаками и проявлениями солнечной активности (вспышки, СМЕ, пятна и др.). Опыт использования этих признаков для целей *статистического* (эмпирического) прогнозирования методом *экспертных оценок*, однако, позволяет указать лишь весьма неопределенные горизонты; за их пределами динамическое прогнозирование в настоящее время невозможно вследствие неполноты информации и сложности поведения рассматриваемых систем.

Принципиальная трудность *математического прогнозирования* солнечных вспышек и корональных выбросов массы состоит в сильной нелинейности и сложном неустойчивом характере связанных с ними физических процессов. Следствием этого является сильная чувствительность математических моделей к малым изменениям начальных и граничных условий. *Нестатистическое (физическое) прогнозирование* солнечных вспышек и СМЕ, основанное на физических моделях, сильно затруднено также отсутствием достаточно точных сведений об их первопричине – подготовительных подфотосферных процессах. Диагностика последних только лишь начинает развиваться. Более кратковременный прогноз геомагнитных бурь по наблюдениям подготовительных процессов в атмосфере Солнца и гелиосфере требует умения достаточно точно вычислять по ним параметры межпланетного магнитного поля и солнечного ветра на орбите Земли. Некоторые надежды, по крайней мере, на частичное преодоление этих трудностей связываются с более адекватным теоретическим моделированием на основе будущих стереоскопических реконструкций динамического состояния короны и гелиосферы с использованием новых данных КА. К сожалению, Солнце иногда ведёт себя совсем не так, как мы ожидаем, т.е. «не всегда сотрудничает с нами», как сказала однажды Margaret (Peggy) A. Shea, один из ведущих американских специалистов в области прогнозирования.

Исследования экстремально сильных геофизических возмущений (например, в октябре-ноябре 2003 г.), выполненные до сих пор, дают весомые аргументы в пользу статистических принципов прогнозирования, основанных на концепции так называемого «синдрома большой вспышки» (Kahler, 1982). Согласно этой концепции, наибольшие геоэффективные события связаны с наибольшими вспышками. В конкретных случаях обеспечения радиационной безопасности пилотируемых космических полётов на околоземных орбитах прогноз осуществляется обычно на полумэмпирической основе. На первом этапе по текущим наблюдениям вспышечной активности проводится количественная диагностика (оценка возможных параметров) солнечного протонного события. Затем, по мере поступления данных от ИСЗ (например, *GOES*) о реальных потоках СКЛ, прогноз уточняется, что и позволяет, в конечном счёте, получить ожидаемые дозовые нагрузки на космонавтов и рассчитать динамику мощности дозы в течение СПС (см. рис.11.6).

Заметим, что прогнозирование геофизических возмущений и изучение их физической основы страдают от одних и тех же ограничений. Очень часто моделирование процесса или среды (скажем, ионосферы в целом) оказывается единственным средством познания. Вместе с тем, например, ионосфера – это открытая система (и сверху, и снизу), и прогностические возможности её моделей ограничиваются неопределённостью входных данных и начальных условий. То же справедливо и в отношении моделей магнитосферы, атмосферы Земли и т.д. Поэтому в качестве ориентира для дальнейших научных исследований и отчасти для практических нужд создана так называемая Справочная Модель Ионосферы (**IRI – International Reference Ionosphere**). Аналогичная справочная модель используется также для магнитосферы (**IGRF – International Geomagnetic Reference Field**). Для других важных параметров межпланетной среды, солнечной и геомагнитной активности в Советском Союзе были разработаны специальные стандарты

(ГОСТы), которые суммировали наиболее достоверную научную информацию и выполняли такую же справочную роль. В настоящее время работа по созданию стандартов-моделей различных космофизических факторов ведётся на международном уровне - в рамках **ISO (International Standard Organization)**. Кроме того, существуют многочисленные справочники и каталоги для солнечных пятен, вспышек, СПС, СМЕ, магнитных бурь и других гелио-геофизических явлений.

Что касается конкретных моделей для гелио-геофизического прогнозирования, то эта обширная тема далеко выходит за рамки нашего изложения. Здесь уместно отметить лишь одну концептуальную трудность, связанную с недостаточным пониманием физики вспышек и СМЕ. Вопрос состоит в том, какое проявление солнечной активности – вспышку или СМЕ – следует считать определяющим в цепочке «причина-следствие» при прогнозировании магнитных бурь. Если до открытия СМЕ центральное место отводилось солнечным вспышкам, то в начале 1990-ых годов этой парадигме была противопоставлена радикально другая альтернатива, причём полемика доходила до полного отрицания роли вспышек в пользу СМЕ (Gosling, 1993). Общая картина развития событий в системе «Солнце-Земля» в том и другом случае показана на рис.11.7.

Новые наблюдения вспышек и СМЕ за последние 15 лет, их всесторонний анализ и численное моделирование позволили значительно улучшить понимание физических процессов, приводящих к генерации обоих явлений. Скорее всего, они представляют собой две стороны единого МГД-возмущения в атмосфере Солнца (система «вспышка-СМЕ»). Если даже вспышка не сопровождается СМЕ, тем не менее, она даёт полезную диагностическую информацию, в частности, для того, чтобы определить долготу на диске Солнца, где зарождается пара возмущений «СМЕ/межпланетная ударная волна».

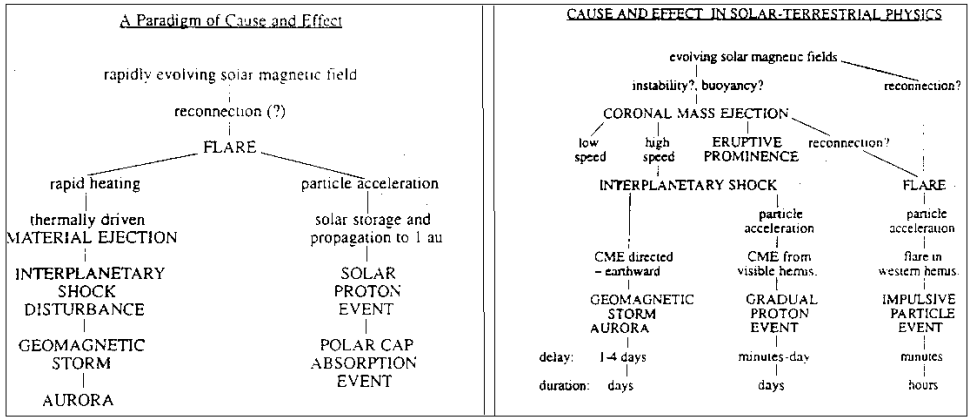


Рис.11.7. Две парадигмы «причина-следствие» в солнечно-земных связях. Слева показана схема, в которой причиной геомагнитной бури считается солнечная вспышка, справа – основным возмущающим агентом принят СМЕ - корональный выброс вещества (Gosling, 1993).

На эмпирическом уровне состояние космической погоды в настоящее время часто оценивается по пятибалльной шкале NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) по следующим параметрам (www.sec.noaa.gov/NOAA_scales/):

1) рентгеновский балл солнечной вспышки (R1-R5) - максимальная интенсивность электромагнитного излучения Солнца, измеренного на околоземной орбите в диапазоне мягкого рентгеновского излучения 1 – 12.5 кэВ, на длине волны 0.1-0.8 нм. Воздействие максимальных интенсивностей приводит к внезапным ионосферным возмущениям, нарушениям радиосвязи («ионосферные бури»). Мощность рентгеновского всплеска (Вт/м²) изменяется в пределах от 10⁻⁸÷10⁻⁷ (класс A) до 10⁻⁴÷10⁻³ (класс X).

2) солнечные протонные события (S1-S5) - измерение потока протонов на околоземной орбите, в единицах потока протонов *pfu* (proton flux unit - число протонов с энергией > 10 МэВ через 1 см² за 1 с в стерадиане). Воздействие событий баллов S2-S5 приводит к нарушениям радиосвязи на полярных трассах, а также создают радиационный риск для космонавтов («радиационная буря»). Балл S1 соответствует величине потока протонов 10 *pfu*, в случае S5 поток составляет 10⁵ *pfu*.

3) геомагнитные бури (G1-G5) – возмущение геомагнитного поля («магнитная буря») как результат воздействия на магнитосферу потока солнечной плазмы с повышенной плотностью, температурой, скоростью частиц и с южной ориентацией B_z -компоненты межпланетного магнитного поля. Баллы определяются по 3-часовым значениям геомагнитного индекса K_p , который в данном случае имеет диапазон значений 5÷9.

11.6. Космический корабль «Земля»...

Наглядным примером того, как переплетаются между собой прогностические и чисто исследовательские задачи солнечно-земной физики, могут служить прецизионные астрономические наблюдения в космосе. На рис.11.8 показаны последовательные изображения околосолнечного пространства, полученные коронографом LASCO на борту солнечной обсерватории SOHO в различные моменты времени в период мощной солнечной вспышки 14 июля 2000 г. Отчётливо видно резкое помутнение изображения за счёт воздействия энергичных солнечных частиц («радиационный шторм»). В этот день коронограф LASCO/C2 зарегистрировал мощный корональный выброс, направленный строго в сторону Земли. Перед этим другой прибор - Extreme-ultraviolet Imaging Telescope (EIT) – зафиксировал вблизи центра солнечного диска мощную вспышку X-класса (наблюдения Солнца проводились в линии железа Fe XII 195Å). Спустя около получаса, к орбите Земли пришёл большой поток энергичных солнечных частиц, который и вызвал «снег» на изображениях, поскольку электронные детекторы камер подверглись бомбардировке СКЛ.

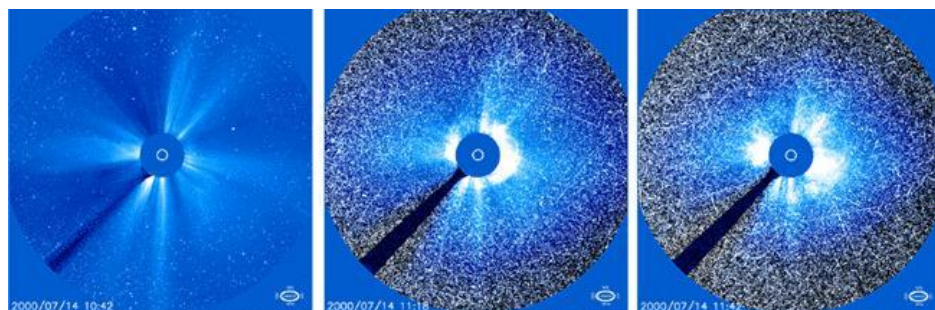


Рис.11.8. Последовательные изображения околосолнечного пространства, полученное с помощью коронографа LASCO на борту солнечной обсерватории SOHO в различные моменты времени в период мощной солнечной вспышки 14 июля 2000 г. Отчётливо видно резкое помутнение изображения за счёт воздействия энергичных солнечных частиц.

Среди ряда других приборов, на борту КА SOHO был ещё так называемый Coronal and Diagnostic Spectrometer (CDS), который регистрировал излучение из солнечной короны в крайнем УФ-диапазоне. Если телескоп EIT нацелен на регистрацию вспышек, то у спектрометра CDS область наблюдений - совершенно другая: он предназначен для получения уникальной информации о температуре, плотности, элементном составе и потоках очень горячей плазмы, захваченной в солнечных магнитных полях. Однако наблюдения CDS во время рассматриваемой вспышки оказались испорченными и

практически бесполезными. Более того, в качестве меры предосторожности наблюдения были прерваны, чтобы избежать какого-либо повреждения инструмента. Таким образом, эта вспышка дала исследователям драматический и весьма поучительный урок!.. Кратко подведём теперь некоторые итоги.

Основные эффекты. Обычно в цепочке СЗС рассматривают следующие каналы влияния Солнца на Землю: 1. Воздействие на магнитосферу и ионосферу. 2. Солнечно-тропосферные связи. 3. Гелиобиология (Солнце и биосфера). 4. Солнечная активность и процессы в литосфере (неравномерность вращения Земли, сейсмические явления). 5. Резонансная структура и ритмы Солнечной Системы. 6. Энергетический и информационный аспекты СЗС. Два последних канала исследованы пока недостаточно и почти не нашли отражения в данной книге.

Физические механизмы СЗС. По современным представлениям, физические механизмы и каналы воздействия СА отличаются большим разнообразием и сложностью. Некоторые механизмы СЗС взаимодействуют между собой, конкурируют или усиливают друг друга. Их далеко не полный перечень выглядит так: 1. Электромагнитное излучение Солнца. 2. Ударные волны в солнечном ветре. 3. Ионизирующая радиация (ГКЛ и СКЛ). 4. Низкочастотные пульсации магнитосферы. 6. Генерация инфразвука в полярной атмосфере. 7. Образование космогенных изотопов и нитратов. 8. Триггерный механизм в различных явлениях СЗС. 9. Резонансные связи в Солнечной системе и земных оболочках.

Солнечно-тропосферные связи. Изменчивость земной погоды и долговременные колебания климата привлекают в последние десятилетия повышенное внимание астрономов и геофизиков. При этом исследования солнечно-тропосферных связей развиваются в нескольких направлениях: статистические данные, численное моделирование, физическое (лабораторное) моделирование на Земле и натурные эксперименты в околоземном пространстве. Их результаты можно суммировать следующим образом:

1. Гелиосфера влияет на земной климат (солнечный ветер, ММП, космическая пыль и др.). 2. На климат могли влиять нерегулярные инверсии геомагнитного поля в далёком прошлом. 3. Существует аналогия с процессами, наблюдаемыми в камере Вильсона (образование капелек тумана вдоль следа проходящей заряженной частицы). 4. Важна нуклеация (конденсация паров воды), прежде всего, на отрицательных зарядах в атмосфере. 5. Возможно искусственное влияние на осадки посредством ионизирующих излучений (экспериментальная метеорология). 6. Влияние ионизации на образование облаков может быть проверено в лабораторных условиях, как это делается в Институте оптики атмосферы в Томске, или на ускорителе заряженных частиц в ЦЕРНе (Experiment CLOUD). 7. Все электрические явления в атмосфере прямо или косвенно связаны с космическими лучами (генерация заряженных частиц в атмосфере через ионизацию, существование свободных зарядов).

Влияние на термосферу. В 2010 г. были опубликованы косвенные свидетельства того, что солнечная активность оказывает долговременное воздействие на состояние термосферы Земли (интервал высот ~200-800 км). На таких высотах вращается большинство искусственных спутников Земли (ИСЗ). Специалисты NASA проанализировали деградацию орбит 5000 спутников, обращавшихся в диапазоне высот 200-600 км над Землёй в 1967-2010 гг. (почти 4 цикла СА). Как известно, деградация орбит обусловлена аэродинамическим сопротивлением термосферы, т.е. её плотностью. Результаты анализа показывают, что на реперной высоте ~ 400 км плотность термосферы испытывала значительные колебания, причём в течение последних четырёх циклов СА наблюдалась тенденция к её систематическому уменьшению. Более того, в 2008-2009 гг., т.е. в минимуме 23-его цикла плотность термосферы оказалась на 28% ниже ожидаемой (если исходить из величины её систематического тренда в предыдущих циклах).

Согласно оценкам NASA, в текущий, небывалый прежде «провал» (минимум) в солнечной активности "коллапс" термосферы оказался в 2-3 раза более глубоким, чем

когда бы то ни было прежде за всю историю космических полётов. Более того - коллапс термосферы оказался более глубоким, чем можно было бы объяснить текущими её моделями. Нельзя исключить, что вклад в изменение плотности термосферы могли внести парниковые газы. Однако в любом случае такой эффект можно объяснить с привлечением всех мыслимых гипотез и моделей термосферы не более, чем на 40%. Пытаясь найти альтернативное объяснение, специалисты NASA обратили внимание на аномальное уменьшение потока солнечного излучения в крайней ультрафиолетовой области (100-280 нм) в 2007-2009 гг. Такое уменьшение, зафиксированное в измерениях на борту космических аппаратов *SOHO* и *TIMED*, а также в суборбитальных полётах ракет, как раз и может быть истинной (солнечной) причиной уменьшения плотности.

Гелиобиология. 1. Доказательства того, что космофизические эффекты в биосфере реальны, имеют огромное значение. 2. Что касается нерешённых гелиобиологических проблем, то остаётся не исследованным вопрос о том, насколько последний затяжной минимум СА отразился на жизни биосферы, когда из-за ослабления солнечного ветра магнитосфера «распухла»... Насколько могла измениться ритмозадающая роль Солнца в этот период? 3. Если оставаться на почве научного знания о Космосе, то нет фаталистической гелио-обусловленности всей нашей жизни, её зависимости от капризов нашего «державного светила», а есть концепция единства организма и среды (*Umwelt*).

Явные изменения климата Земли, многочисленные погодные аномалии, участвовавшие природные, техногенные, геополитические и гуманитарные катастрофы, нарастающие социальные потрясения локального и глобального масштаба – всё это говорит о том, что людям не следует преувеличивать свою «власть над Природой». Во всяком случае, мы ещё очень далеки от того, чтобы «управлять» явлениями космического и даже планетарного масштаба. Однако многие из них наука уже в состоянии предвидеть, что позволяет использовать их на благо людям или уменьшить их вредные последствия. При этом, однако, забывать слова А.Л. Чижевского о «ничтожестве... физической организации» человека перед «физическими силами природы». Вспомним также дальновидное предостережение Ф. Энгельса: «Не будем, однако, слишком обольщаться нашими победами над природой. За каждую такую победу она нам мстит. Каждая из таких побед имеет, правда, в первую очередь те последствия, на которые мы рассчитываем, но во вторую и третью очередь совсем другие, непредвиденные последствия, которые очень часто уничтожают значение первых». Вместе с тем, опираясь на имеющиеся достижения СЗС и концепцию устойчивого развития человечества, космофизикам необходимо сохранять истинно научный оптимизм и поддерживать высокий дух созидания.



Если говорить о мировоззренческой стороне солнечно-земной физики и физики Космоса в целом, то нельзя не вспомнить нашего замечательного соотечественника М.В. Ломоносова. Мировое пространство, «обширность безмерных мест», по его меткому выражению, звёздное небо, небесные светила – любимый образ и предмет созерцания М.В. Ломоносова:

Открылась бездна, звёзд полна;
Звёздам числа нет, бездне – дна.
Песчинка как в морских волнах,
Как мала искра в вечном льде,
Как в сильном вихре тонкий прах,
В свирепом как пером огне,
Так я в сей бездне углублён,
Теряюсь, мыслями утомлён.

«Вечернее размышление о Божием величестве
при случае великого северного сияния» (1743).

Вероятно, такие же чувства при виде звёздного неба переживал почти два века спустя
другой наш поэт – В.В. Маяковский («Уже второй...», 1930):

Ты посмотри, какая в мире тишь.
Ночь обложила небо звёздной данью.
В такие вот часы встаёшь и говоришь
Векам, истории и мирозданию.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Авакян С.В. Физика солнечно-земных связей: Результаты, проблемы и новые подходы. *Геомагнетизм и аэрономия*, 2008, т.48, №4, с.435-442.
- Авдонина Е.Н., Лукьянов В.Б. Гелиогеофизические эффекты в результатах измерения радиоактивности методами жидкостного сцинтилляционного счёта и статистика радиоактивного распада. – *Биофизика*, 1995, т.40, №4, с.871-881.
- Акасофу С., Чепмен С. Солнечно-земная физика, тт. 1, 2. М.: Мир, 1974, 1975.
- Бакал Дж. Нейтринная астрофизика. М., Мир, 1993, 623 сс.
- Бреус Т.К. Влияние солнечной активности на биологические объекты. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. – Москва, ИКИ РАН, 2003, 32 с.
- Будько Н., Зайцев А., Карпачев А., Козлов А., Филиппов Б. Космическая среда вокруг нас. Троицк, Издательство Тровант, 2006, 232 с.
- Вишневский В.В., Рагульская М.В., Самсонов С.Н., Подлатчикова Т.В., Григорьев П.Е. Синхронный гелиобиофизический телекоммуникационный эксперимент «Гелиомед» 2006-2007. - Материалы 7-й Международной конференции «Космос и биосфера». - Крым, Судак, Октябрь 2007, с.83-85.
- Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А. Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу. Москва, МНЭПУ, сс.374, 2000.
- Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А., В.С. Мартынюк. Космическая погода и наша жизнь. Изд-во «Век-2», Фрязино, сс.224, 2004.
- Гершберг Р.Е. Активность солнечного типа звезд главной последовательности. Одесса, «Астропринт», 2002, 688 с.
- Дергачев В.А. Воздействие солнечной активности на климат. *Известия РАН, серия физич.*, 2006, т.70, 310б с.1544-1548.
- Дорман, Л.И., Мирошниченко Л.И. Солнечные космические лучи. М., Физматгиз, 1968.
- Ермолаев Ю.И. Комментарий к статье «N. Gopalswamy, S. Yashiro, and S. Akiyama "Geoeffectiveness of halo coronal mass ejections". *Geophys. Res.*, 2007, v.112, A06112, doi: 10.1029/2006JA012149». - *Космические исследования*, 2008, т.46, №6, с.571-572.
- Мигулин В.В., Мирошниченко Л.И., Обридко В.Н. Солнечно-земная физика: Проблемы и перспективы. - *Вестник Академии Наук СССР*, 1987, №10, с.83-89.
- Мирошниченко Л.И. Космические лучи в межпланетном пространстве. М., Наука, 1973.
- Мирошниченко Л.И. Солнечная активность и Земля. М., Наука, 1981.
- Мирошниченко Л.И., Петров В.М. Динамика радиационных условий в космосе. М., Энергоатомиздат, 1985, 152 с.
- Мирошниченко Л.И., С.Н. Карпов. Космофизические факторы и регистрация редких событий на Баксанском Подземном Сцинтилляционном Телескопе. – *Геомагнетизм и аэрономия*, 2004, т.44, №5, с.601-606.
- Модель Космоса. В 2 томах, под редакцией М.И.Панасюка и Л.С. Новикова. М., НИИЯФ МГУ, 2007.
- Ожередов В.А., Бреус Т.К. Новые подходы к статистическому анализу рядов длительных наблюдений гелио-геомагнитной активности и медико-биологических показателей, реагирующих на нее. - *Геофизические процессы и биосфера*. 2008, т.7, №1, с.27-32.
- Ожередов В.А. Исследование солнечно-земных связей с помощью оптимизационных алгоритмов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. – Москва, ИКИ РАН, 2010, 30 с.
- Панасюк М.И., Калмыков Н.Н., Ковтюх А.С., Кузнецов Н.В., Куликов Г.В., Курт В.Г., Ныммик Р.А., Т.М. Роганова. Радиационные условия в космическом пространстве. М., НИИЯФ МГУ, 2006, 130 сс.

- Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетном пространстве. М., Мир, 1965.
- Постнов К.А., Засов А.В. Курс общей астрофизики. М., Физический факультет МГУ, 2005, 192 с.
- Потапов А.А. и Черногор Л.Ф. Физические процессы в нелинейной системе Космос-Земля: Каналы воздействия на биосферу. - *Нелинейный мир*, 2010, т.8, №6, с.347-360.
- Пудовкин М.И., Козелов В.П., Лазутин Л.Л., Трошичев О.А., Чертков А.Д. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л., «Наука», 1977. 312 с.
- Пытьев Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. М., Физматлит, 2004, 400 с.
- Рагульская М.В., Хабарова О.В. Влияние солнечных возмущений на человеческий организм. - *Биомедицинская радиоэлектроника*, 2001, №2, с.5-15.
- Рагульская М. В. Синергетические аспекты поведения биологических систем при воздействии внешних полей. - *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*, 2005, №1-2, с.57-68.
- Радиационные условия в космическом пространстве. Учебное пособие. Под редакцией М.И. Панасюка. М., НИИЯФ МГУ, 2006, 130 сс.
- Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов. М., Мир, 1980.
- Топтыгин И.Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М., Наука, 1983.
- Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. М.: Мир, 1976.
- Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. – *Радиофизика и радиоастрономия*, 2003, т.8, №1, с.59-106.
- Удальцова Н.В., Коломбет В.А., Шноль С.Э. Возможная космофизическая обусловленность макроскопических флуктуаций в процессах разной природы. Институт биофизики АН СССР, Пущино-на-Оке. 1987, 96 с.
- Шабанский В.П., Веселовский И.С., Кропоткин А.П. Физика межпланетного и околоземного пространства. М.: Изд-во МГУ, 1981.
- Шноль С.Э. Макроскопические флуктуации с дискретным распределением амплитуд в процессах различной физической природы. - *Итоги науки и техники. Общие проблемы физико-химической биологии*. ВИНТИ, 1985, №5. с.130-201.
- Эртель С. Космофизические корреляции творческой активности в истории культуры. – *Биофизика*, 1998, т. 43 (4), с.736-741.

- J. Beer, St. Baumgartner, B. Dittrich-Hannen, J. Hauenstein, P. Kubik, Ch. Lukaszczuk, W. Mende, R. Stellmacher and M. Suter. Solar Variability Traced by Cosmogenic Isotopes. In: *The Sun as a Variable Star: Solar and Stellar Irradiance Variations* (eds. J.M. Pap, C. Fröhlich, H.S. Hudson and S.K. Solanki), Cambridge University Press, 1994, 291-300.
- Bonanno, A., Schlattl, H., Patern, L. The age of the Sun and the relativistic corrections in the EOS. *Astronomy and Astrophysics*, 2002, v.390, p.1115-1118.
- Ermakov V.I. and Stozhkov Yu.I. Cosmic ray fluxes in the atmospheric processes. - *Proc. ISCS 2003 Symposium, "Solar Variability as an Input to the Earth's Environment"*, Tatranska Lomnica, Slovakia, 23-28 June 2003, ESA SP-535, September 2003, p.359-362.
- Ertel S. Space weather and revolutions. Chizhevsky's heliobiological claim scrutinized. - *Studia Psychologica*. 1996, v.38, No. 1-2, p. 3-22.
- Hoyt, D. V., and K. H. Schatten (1998a). "Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction. Part 1." *Solar Physics* **179**: 189-219.
- Hoyt, D. V., and K. H. Schatten (1998b). "Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction. Part 2." - *Solar Physics* **181**: 491-512.
- Kane R.P. Sun-Earth relation: Historical development and present status – A brief review. *Adv. Space Res.*, 2005, v.35, p.866-881.
- Kirkby J. Cosmic rays and climate. - CERN Colloquium, 4 June 2009.

- Kuzhevskij B.M., Gan W.Q., and L.I. Miroshnichenko. The role of nuclei-nuclei interactions in the production of gamma-ray lines in solar flares. - *Chinese J. of Astronomy and Astrophysics*, 2005, v.5, No.3, p.295-301.
- Miroshnichenko, L.I. Solar Cosmic Rays. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands, 480 pp., 2001.
- Miroshnichenko, L.I. Radiation Hazard in Space. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands, 238 pp., 2003.
- Miroshnichenko L.I. and Perez-Peraza J.A. Astrophysical Aspects in the Studies of Solar Cosmic Rays (Invited Review). - *International Journal of Modern Physics A (IJMPA)*, 2008, v.23, No.1, p.1-141.
- Miroshnichenko L.I. Solar Cosmic Rays in the System of Solar-Terrestrial Relations (Review). *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (Special Issue of ISROSES Proceedings), 2008, v.70, p.450-466
- Priest, E. and Forbes, T. Magnetic Field Reconnection (MHD Theory and Applications). Cambridge University Press, pp.520, 2000 (In Russian: MAIK, Moscow, 2004).
- Roble R.G. On solar-terrestrial relationships in the atmospheric electricity. *J. Geophys. Res.*, 1985, v.90, No.D4, p.6000-6012.
- Somov, B.V. Physical Processes in Solar Flares. Dordrecht, Boston, London; Kluwer Academic Publishers, pp.248, 1992.
- Somov, B.V. Fundamentals of Cosmic Electrodynamics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.364, 1994.
- Somov, B.V. Plasma Astrophysics: 1. Fundamentals and Practice. 2. Reconnection and Flares. Springer, 2006.
- Wright, J.M. National Space Weather Program: The Implementation Plan, Washington, D.C., Off. Fed. Coord. Meteorol. Serv. Supp. Res., FCM-P31, 1997.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Geocentric Solar Ecliptic System

The Geocentric Solar Ecliptic System (GSE) has its X -axis pointing from the Earth towards the Sun and its Y -axis is chosen to be in the ecliptic plane pointing towards dusk (thus opposing planetary motion). Its Z -axis is parallel to the ecliptic pole. Relative to an inertial system this system has a yearly rotation.

Geocentric Solar Equatorial System

The Geocentric Solar Equatorial System (GSEQ) as with the [GSE](#) system has its X -axis pointing towards the Sun from the Earth. However, instead of having its Y -axis in the ecliptic plane, the GSEQ Y -axis is parallel to the Sun's equatorial plane which is inclined to the ecliptic. We note that since the X -axis is in the ecliptic plane and therefore is not necessarily in the Sun's equatorial plane, the Z -axis of this system will not necessarily be parallel to the Sun's axis of rotation. However, the Sun's axis of rotation must lie in the X - Z plane. The Z -axis is chosen to be in the same sense as the ecliptic pole, i.e. northwards.

Geocentric Solar Magnetospheric System

The Geocentric Solar Magnetospheric System (GSM), as with both the [GSE](#) and [GSEQ](#) systems, has its X -axis from the Earth to the Sun. The Y -axis is defined to be perpendicular to the Earth's magnetic dipole so that the X - Z plane contains the dipole axis. The positive Z -axis is chosen to be in the same sense as the northern magnetic pole. The difference between the GSM system and the GSE and GSEQ is simply a rotation about the X -axis.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВКВ (ВКМ) – выброс коронального вещества (корональной массы)
ГЭЦ - глобальная электрическая цепь
ГКЛ – галактические космические лучи
ГЛОНАСС - ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система
ИЗМИРАН - Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
РАН им. Н.В. Пушкина
ИКИ – Институт космических исследований РАН
ИСЗ – искусственный спутник Земли
КВВ – корональный выброс вещества
КА – космический аппарат
КЛ – космические лучи
КОРОНАС - Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения
Активности Солнца (CORONAS)
ЛМО – локальное межзвездное облако
МКС – Международная космическая станция
ММП – межпланетное магнитное поле
ОКП - околоземное космическое пространство
РАН – Российская академия наук
РПЗ – радиационные пояса Земли
СА – солнечная активность
СЗС – солнечно-земные связи
СЗФ – солнечно-земная физика
СКЛ – солнечные космические лучи
СПС – солнечное протонное событие
ССМ – стандартная солнечная модель
СЭС - солнечное экстремальное событие
ТУВ – терминальная ударная волна
ЮАА – Южно-Атлантическая аномалия

ACE - Advanced Composition Explorer
CME – Coronal Mass Ejection (выброс корональной массы)
ESA - European Space Agency
GLE - Ground Level Enhancement (наземное возмущение КЛ)
GOES – Geostationary Operational Environment Satellite
GPS – Global Positioning System
GSM - Geocentric Solar Magnetospheric System
IGRF – International Geomagnetic Reference Field
IRI – International Reference Ionosphere
ISO – International Standard Organization
LT – Local Time (местное время)
SMM – Solar Maximum Mission
NASA - National Aeronautics and Space Administration (USA)
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)
PFU – proton flux unit (единица протонного потока)
RHESSI - Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager
SEP – solar energetic particle (энергичные солнечные частицы)
SOHO - Solar and Heliospheric Observatory

SPE – solar proton event (солнечное протонное событие)
SSC – Storm Sudden Commencement (внезапное начало бури)
STEREO - Solar TERrestrial RELations Observatory
TRACE - Transition Region and Coronal Explorer
ULF – Ultra Low Frequency (ультранизкая частота – УНЧ)
UT - Universal Time (мировое время)
VLF – Very Low Frequency (очень низкая частота – ОНЧ)
WMAP - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ: ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ.....	4
1.1. Природа гелио-геофизических возмущений.....	4
1.2. Данные наблюдений и основные направления исследований.....	6
2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА.....	10
2.1. Солнце как звезда.....	10
2.2. Строение Солнца.....	10
2.3. Химический состав, температура и плотность.....	12
2.4. Источник энергии.....	14
2.5. Понятие о гелиосфере.....	15
2.6. Методы изучения Солнца и гелиосферы.....	17
3. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ.....	21
3.1. Строение солнечной атмосферы.....	21
3.2. Расширение короны и солнечный ветер.....	24
3.3. Солнечные вспышки.....	26
3.4. Корональные выбросы вещества.....	30
3.5. Солнечная активность и ее цикличность.....	32
3.6. Прогноз будущих солнечных циклов.....	35
4. СТРУКТУРА И ДИНАМИКА МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ.....	38
4.1. Расширение короны и солнечный ветер.....	38
4.2. Глобальное магнитное поле Солнца.....	39
4.3. Межпланетное магнитное поле.....	40
4.4. Флуктуации межпланетного магнитного поля.....	42
5. УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ НА СОЛНЦЕ.....	48
5.1. Сценарии ускорения частиц на Солнце.....	48
5.2. Основные механизмы ускорения.....	50
5.3. Ускорение частиц при магнитном пересоединении.....	52
5.4. Стохастическое ускорение.....	54
5.5. Ускорение ударными волнами.....	56
5.6. Комбинированное ускорение СКЛ.....	59
5.7. Вспышки, СМЕ и два класса солнечных протонных событий.....	60
6. УСКОРЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА.....	65
6.1. Ядерные реакции в атмосфере Солнца.....	65
6.2. Нейтроны и гамма-излучение.....	67
6.3. Астрофизические следствия и приложения.....	69
6.4. Локализация источников ускорения.....	73
7. ПЕРЕНОС ЧАСТИЦ В ГЕЛИОСФЕРЕ.....	76

7.1. Энергичные частицы в гелиосфере.....	76
7.2. Основные понятия теории переноса.....	78
7.3. Плотность энергии и перенос энергичных частиц.....	80
7.4. Теория переноса солнечных космических лучей.....	81
7.5. Ударные волны и перенос солнечных частиц.....	83
7.6. Энергичные частицы и генерация волн в межпланетной плазме.....	85
7.7. Перенос частиц в крупномасштабных магнитных структурах.....	86
7.8. Солнечные частицы на больших расстояниях от Солнца.....	88
8. ЭНЕРГИЧНЫЕ ЧАСТИЦЫ В ГЕОСФЕРЕ.....	92
8.1. Атмосфера Земли и космические лучи.....	92
8.2. Ионизация и проводимость атмосферы.....	95
8.3. Генерация космогенных изотопов.....	96
8.4. Образование нитратов.....	98
8.5. Образование и динамика озонового слоя.....	101
8.6. Глобальная электрическая цепь.....	104
8.7. Космические лучи – триггер тропосферных процессов?.....	106
8.8. Другие атмосферные эффекты космических лучей.....	108
9. ИЕРАРХИЯ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ.....	114
9.1. Экстремальные солнечные события и магнитные бури.....	115
9.2. Основные характеристики магнитных бурь.....	116
9.3. Энергетика магнитосферы.....	120
9.4. Динамика захваченной радиации в магнитосфере Земли.....	123
9.5. Солнечные «сигналы» в атмосфере и литосфере.....	127
9.6. Солнечно-земные связи на службе космической погоды.....	131
10. ВЛИЯНИЕ СОЛНЦА НА БИОСФЕРУ.....	133
10.1. Современные концепции и фундаментальные проблемы.....	133
10.2. Роль геомагнитных пульсаций.....	137
10.3. Космические ритмы в биосфере.....	140
10.4. Особенности гелиобиологических ритмов.....	142
10.5. Активность Солнца и творческая активность.....	145
10.6. Экономические «волны Кондратьева».....	147
11. БУДУЩЕЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ.....	149
11.1. Солнечная активность и точные физические измерения.....	149
11.2. Гелиобиология и медицина.....	153
11.3. Магнито-биологический эффект.....	155
11.4. Перспективы космонавтики.....	157
11.5. Прогнозирование космической погоды.....	160
11.6. Космический корабль «Земля».....	163
ЛИТЕРАТУРА.....	167
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	170
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	171