

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Д.А.Тимашков

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений

Москва 2008

УДК 523.62(075)+550.3(075)

ББК 22.657я7+26.2я7

Т41

Тимашков Д.А. **Космическая погода**: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. 124 с.

Представляет собой введение в новое научное направление физики солнечно-земных связей – космическую погоду – и является основным учебно-методическим материалом к учебному курсу "Космическая погода".

Пособие содержит введение и четыре раздела. Во введении представлен краткий исторический очерк развития дисциплин, связанных с солнечно-земной физикой. В первом разделе пособия даны основные определения и понятия физики Солнца, физики гелиосферы и земной магнитосферы. Вторая и третья части содержат описание многочисленных явлений космической погоды и обзор разнообразных каналов влияния (как правило, негативного) на работу аппаратуры космических аппаратов, систем связи, на здоровье людей. Заключительная часть пособия посвящена современным средствам наблюдения за космической погодой, методам ее прогнозирования, а также новым проектам, которые реализуются в настоящее время в России и за рубежом. Подчеркнута роль нового метода дистанционного мониторинга гелиосферы и околоземного космического пространства – мюонной диагностики. В конце каждого раздела приведены задачи и контрольные вопросы для закрепления пройденного материала.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям высшего профессионального образования "Физика" и "Ядерная физика и технологии", а также аспирантов и научных работников, специализирующихся в области солнечно-земной физики.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент д-р физ.-мат. наук, проф. А.М.Гальпер

Редактор Е.Е.Шумакова

ISBN 978-5-7363-1064-3

© Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2008

Подписано в печать 03.12.2008. Формат 60×84 1/16

Объем 7,75 п.л. Уч.-изд. л. 7,75. Тираж 150 экз.

Изд. № 4/59

Заказ №

Московский инженерно-физический институт (государственный университет),
115409, Москва, Каширское ш., 31

Типография издательства «ТРОВАНТ», г. Троицк Московской области

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Введение	6
1. Основные понятия космической погоды.....	17
1.1 Базовые понятия физики Солнца.....	17
1.2 Строение гелиосферы.....	30
1.3 Структура магнитосферы Земли.....	37
1.4 Радиационные пояса Земли.....	41
1.5 Внешние оболочки атмосферы.....	46
Задачи к разделу 1.....	50
Контрольные вопросы	51
2. Основные явления космической погоды.....	52
2.1 Классификация явлений.....	52
2.2 Процессы на Солнце.....	54
2.3 Гелиосферные явления.....	61
2.4 Геомагнитные возмущения.....	66
2.5 Возмущения в ионосфере.....	75
Задачи к разделу 2.....	78
Контрольные вопросы	79
3. Влияние процессов космической погоды.....	80
3.1 Факторы космического пространства	80
3.2 Солнечные космические лучи	82
3.3 Электромагнитное излучение	86
3.4 Геомагнитные бури.....	87
3.5 Суббури	88
3.6 Наземные проявления.....	89
Задачи к разделу 3.....	91
Контрольные вопросы	91
4. Мониторинг космической погоды.....	92
4.1 Космические измерения	93
4.2 Наземные измерения	105
4.3 Космическая погода в сети Интернет	118
Задачи к разделу 4.....	121
Контрольные вопросы	122
Список литературы для самостоятельной работы	123
Список обозначений.....	124

Предисловие

В настоящее время мы являемся свидетелями развития новой области научных исследований солнечно-земных связей. Особое внимание ученых различных стран привлекают разнообразные динамические процессы в межпланетном и околоземном пространстве, которые инициируются солнечной активностью и влияют на работу спутниковой инфраструктуры и здоровье людей. Настоящее пособие представляет собой краткий обзор этого стремительно развивающегося направления, которое получило название "космическая погода". Основная цель пособия – дать будущему специалисту знания о новой научной дисциплине, показать ее связи с соседними научными областями и растущую практическую значимость совокупности явлений от солнечных активных процессов до геомагнитных возмущений. Для понимания тенденций развития разделов физики, касающихся солнечно-земных связей, во введении представлен краткий исторический очерк.

В первом разделе пособия даны основные определения и понятия физики Солнца, физики гелиосферы и земной магнитосферы. Вторая и третья части содержат описание многочисленных явлений космической погоды и обзор разнообразных каналов влияния (как правило, негативного) на работу аппаратуры космических аппаратов, систем связи, на здоровье людей. Заключительная часть пособия посвящена современным средствам наблюдения за космической погодой, методам ее прогнозирования, а также новым проектам, которые реализуются в настоящее время в России и за рубежом. Таким образом, читатель должен получить представление об основных негативных последствиях космической погоды, методах раннего обнаружения различных гелиосферных и геомагнитных возмущений.

В конце каждого раздела приведены задачи, а также контрольные вопросы для закрепления пройденного материала. Основная и дополнительная литература, которая позволит продолжить изучение космической погоды на более глубоком уровне, приведена в конце пособия. К сожалению, современных

монографий по данной теме на русском языке нет, что значительно затруднило подготовку данного пособия, и в частности составление списка рекомендуемой литературы. Большинство использованных источников являются англоязычными и опубликованы только в электронном виде в сети Интернет. Поэтому в тексте присутствует значительное количество ссылок на различные интернет-страницы, которые помогут читателям в их самостоятельной работе. Особо следует отметить сайты российского портала солнечно-земной физики СиЗиФ (<http://www.kosmofizika.ru/>) и открытой библиотеки Википедия (<http://www.wikipedia.org/>), содержащие большое количество ссылок на обзорные статьи по данному научному направлению. При составлении пособия также использовались материалы нового восьмого издания научно-технического сборника "Модель космоса" под редакцией профессора М. И. Панасюка и Л.С.Новикова, подготовленного сотрудниками НИИЯФ МГУ и их коллегами из научных организаций и предприятий космической промышленности.

Данное пособие включает довольно большое количество рисунков и графической экспериментальной информации, полученных с помощью разнообразной научной аппаратуры, как наземного, так и космического базирования. Эти данные взяты с сайтов соответствующих научных коллабораций, и автор выражает благодарность всем коллегам, которые предоставили результаты наблюдения Солнца, гелиосферы и околоземного пространства для свободного использования.

Автор благодарен Н. С. Барбашиной, В. В. Борогу, Р. П. Кокоулину, А. А. Петрухину, А. В. Струминскому, И. И. Яшину за помощь и ценные советы, которые позволили улучшить данную рукопись, а также за постоянное внимание и поддержку в работе.

Введение

В последние десятилетия двадцатого века началось широкое использование ближнего околоземного пространства для научных, военных и коммерческих целей. Кроме того, с помощью космических аппаратов (КА) проводятся активные исследования других тел Солнечной системы, межпланетного пространства и Солнца. При этом увеличивается число стран, развивающих космическую инфраструктуру и использующих околоземное пространство. Космос, в первую очередь ближний, становится площадкой для деятельности большого количества участников. По сравнению с ситуацией времен холодной волны, когда в этой области существовало только две сверхдержавы: США и Советский Союз, в первые годы нового века картина кардинально изменилась.

Одним из важных вопросов в космической деятельности становится проблема стабильной и устойчивой работы орбитальных технических устройств и степень влияния на них окружающей среды: процессов в ионосфере, экзосфере и магнитосфере Земли, а также в гелиосфере. Практические потребности в решении этих вопросов привели к бурному развитию таких научных направлений, как физика солнечно-земных связей, физика гелиосферы и физика магнитосферы Земли. При этом сформировались и новые научные дисциплины, одной из которых является космическая погода (*Space Weather*).

Оказывая воздействие на работу спутниковых аппаратов, космическая среда влияет и на повседневную жизнь. Конечно, в первую очередь это связано с расширяющимся использованием спутниковых средств связи. Не редкостью становятся прогнозы о возможных сбоях в системе GPS, сотовой связи или Интернет, вызванных геомагнитными возмущениями. Все чаще в новостях появляются предупреждения об ухудшении здоровья в периоды геомагнитной активности. Какая связь между жизнедеятельностью людей и возмущениями магнитного поля Земли? Почему спутниковая техника начинает давать сбои в определенные периоды? Ответы на эти и подобные вопросы дает космическая погода.

В настоящее время термин "космическая погода" имеет несколько значений. Совокупность процессов на Солнце, и вызванных ими явлений в гелиосфере, магнитосфере и ионосфере Земли, а также на земной поверхности, которые прямо или косвенно приводят к негативным последствиям для работы различного рода аппаратуры и для здоровья людей, называется *космической погодой*. Под этим же названием понимаются и характеристики межпланетного и околоземного пространства, которые являются индикатором проявлений солнечной активности. Изучением факторов, ответственных за возникновение той или иной потенциально опасной ситуации, исследованием механизмов взаимодействия и передачи энергии солнечных возмущений через гелиосферу к Земле, а также поиском методов детектирования, диагностики и прогнозирования ситуации в околоземном и межпланетном пространстве занимается новое междисциплинарное направление физики и астрономии, которое тоже называется "космическая погода".

Основным источником возмущений в гелиосфере, в земной магнитосфере и ионосфере является Солнце. Подобно тому, как Гольфстрим определяет климатические условия в Западной Европе, наша звезда служит основным возмущающим фактором внутри Солнечной системы. Проявления солнечной активности на Земле наблюдались с древнейших времен. Уже многие тысячи лет в приполярных широтах люди замечали непонятные, но очень красочные свечения ночного неба – полярные сияния – и строили различные предположения об их природе. Следующее открытие, имеющее отношение к солнечно-земным связям – это магнитные силы и геомагнитное поле. Самые ранние упоминания о магнитных камнях найдены в китайских письменных источниках III в. до н.э. Появившаяся значительно позднее (X в. н.э.) идея компаса проникла в Европу и уже была использована Колумбом в его путешествии через Атлантику в 1492 году.

В 1600 г. Уильям Гильберт опубликовал трактат "О магните, магнитных телах и о великом магните – Земле", в котором он предположил существование глобального геомагнитного поля, объясняющего поведение намагниченных стрелок компаса. Можно считать, что 1600-й год стал рождением геомагнетизма как научной

дисциплины. Через сто лет английский астроном Эдвин Галлей построил первую карту магнитных склонений, которая завоевала огромную популярность среди моряков. Однако постепенно стало ясно, что магнитные склонения в каждой точке изменяются со временем. То есть магнитное поле Земли не постоянно.

Первую модель геомагнитного поля предложил норвежский ученый Кристиан Хансен в 1811 году. Для описания опытных данных он предположил, что существуют четыре магнитных полюса: два северных и два южных. Следует сказать, что дополнительные полюса Хансена действительно оказались близки к крупнейшим геомагнитным аномалиям – Восточно-Сибирской и Бразильской, которые искажают дипольную картину напряженности магнитного поля (рис. 1).

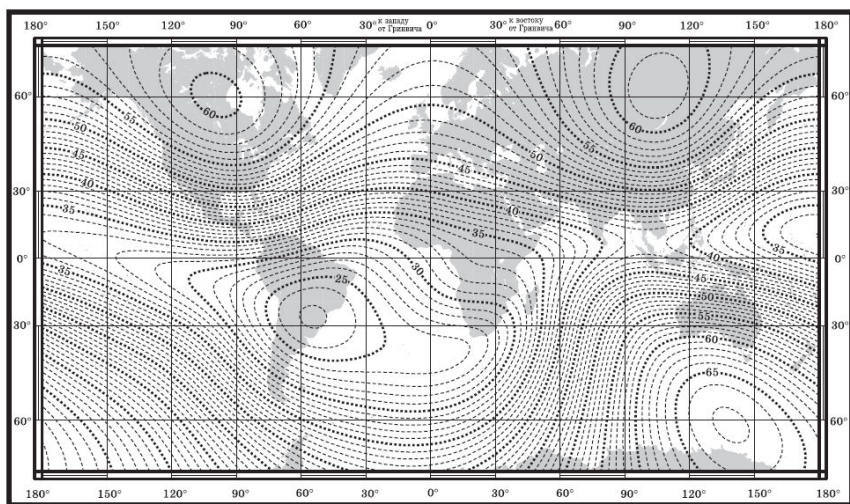


Рис. 1. Карта напряженности геомагнитного поля по всемирной магнитной модели WMM-2000

Эмпирическую модель магнитного поля Земли разработал в 1839 г. великий немецкий математик Карл Фридрих Гаусс. Он использовал метод скалярного магнитного потенциала, который записывался в виде ряда сферических гармоник. Для определения коэффициентов разложения Гаусс и его ассистент Вильгельм Вебер инициировали проведение наблюдений в сети обсерваторий. Измерения магнитного поля проводились по всему миру, но

основной вклад в эту работу внесли ученые из Англии и России. Метод Гаусса используется до сих пор, а коэффициенты разложения обновляются каждые пять лет Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавтики. Утвержденный набор (120 коэффициентов) составляет то, что называется "международным эталонным геомагнитным полем" (International Geomagnetic Reference Field – IGRF).

Часто для расчетов используют приближенное магнитное поле Земли дипольного типа. При этом ось диполя составляет с осью вращения Земли угол 10° . Более точное описание можно получить, если сместить ось диполя из геометрического центра вращения Земли на 342 км в сторону противоположную восточной оконечности Бразилии. Следует добавить, средняя величина магнитного поля на поверхности Земли составляет десятые доли гаусса.

Полярность магнитного поля Земли обратна географической. В настоящее время северный магнитный полюс (из которого выходят линии магнитного поля) расположен около побережья Антарктиды, а Южный – на севере, вблизи Канады. Координаты обоих магнитных полюсов впервые определил английский путешественник Джеймс Кларк Росс: в 1831 г. (южный) и в 1841 г. (северный). Магнитные полюса Земли постоянно смещаются (рис. 2). Сейчас географические координаты полюсов составляют: 83.2N, 118.0W (южный полюс) и 64.5S, 137.8E (северный полюс).

Кроме медленного изменения геомагнитное поле подвержено и кратковременным вариациям. Впервые на них обратил внимание Джордж Грэхэм, который в 1722 году заметил, что стрелка компаса иногда отклоняется от заданного направления на небольшой угол и возвращается обратно только через несколько дней. Это явление получило название магнитных бурь. В середине XIX в. барон Александр ван Гумбольдт предложил использовать для записи магнитных флуктуаций глобальную сеть магнитографов. Уже первые измерения показали, что магнитные бури затрагивают всю планету. Встал вопрос об источнике таких вариаций.

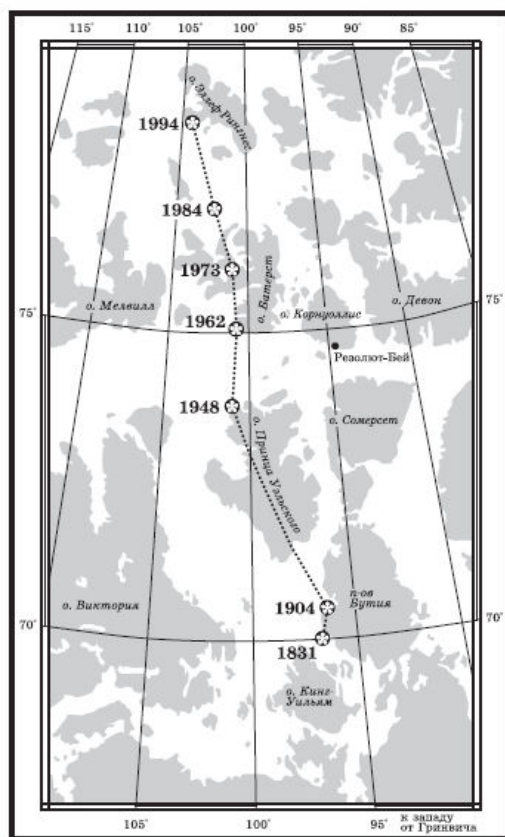


Рис. 2. Движение южного магнитного полюса Земли. Звездочками указаны точки, в которых его положение определялось экспедициями

Возможное объяснение было предложено уже через несколько лет, после открытия Самуэлем Швабом солнечного 11-летнего цикла. В 1852 г. английский ученый Эдвин Сабин на основе анализа данных всемирной сети магнитографов объявил об обнаружении корреляций между солнечной активностью (количеством солнечных пятен) и частотой магнитных бурь. Примерно в то же время фон Гумбольдт указал на похожее поведение частоты полярных сияний.

Каким же образом солнечные пятна влияют на магнитное поле Земли? Первый намек был получен во время неожиданного

открытия британского астронома Ричарда Кэррингтона 1 сентября 1859 года. Он наблюдал за большой группой солнечных пятен, когда вдруг увидел на их месте яркую вспышку, которая длилась несколько десятков секунд. А через 17 часов была зафиксирована необычайно мощная магнитная буря, которая сопровождалась полярными сияниями, причем последние наблюдались даже в средних широтах. Кэррингтон отметил это совпадение, но при этом добавил, что "одна ласточка весны не делает".

Наблюдение солнечных вспышек в белом свете невооруженным глазом, как это удалось Кэррингтону – чрезвычайно редкое событие. Позднее для этих целей стали использовать красные фильтры, которые выделяют линию водорода $H\alpha$ или спектрогелиографы, позволяющие получать изображения Солнца в различных длинах волн видимого спектра. Впервые подобный прибор разработал Джордж Хэйл и в 1892 г. с его помощью он получил несколько фотографий яркой солнечной вспышки. Через 19 часов наземными магнитографами был зафиксирован мощный геомагнитный шторм. Вскоре число подобных совпадений начало расти, не оставляя сомнения в том, что "что-то" летит с огромной скоростью порядка 1000 км/с от Солнца к Земле, вызывая по прилете сильные геомагнитные возмущения.

На протяжении десятилетий не утихали споры относительно природы этого загадочного транзита. Одно из первых предположений заключалось в том, что из солнечных пятен вылетают мощные потоки электронов или "катодных лучей", как их называли в то время. Первые опыты по проверке этой гипотезы проделал в 1896 г. норвежский физик Кристиан Биркеланд. Он облучал катодными лучами шарообразный магнит – "терреллу", которая имитировала магнитное поле Земли (рис. 3). Оказалось, что электроны сталкиваются с терреллой в основном около полюсов, образуя яркие кольца. К этому времени уже было известно, что подобную

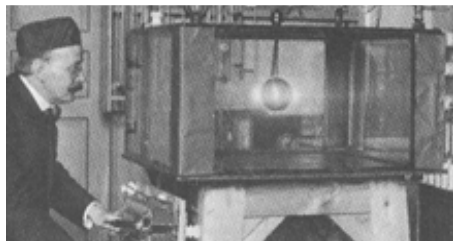


Рис. 3. Террелла Биркеланда

кольцевую картину (авроральные кольца) вокруг магнитных полюсов Земли формируют полярные сияния, если нанести данные по частоте их появления на глобус. Связь солнечных пятен и магнитных бурь получила подтверждение и с другой стороны. Английский физик Эдвард Маундер в 1904 г. обнаружил, что магнитные бури часто повторяются каждые 27 дней. Этот интервал совпадает с периодом вращения пятен вокруг Солнца на солнечном экваторе.

Таким образом, одна из самых интригующих проблем была решена: источник флуктуаций магнитного поля Земли – это Солнце и солнечная активность в виде пятен и вспышек. Дальнейшие исследования касались поиска физического механизма взаимосвязи проявлений солнечной активности и вариаций геомагнитного поля.

Уже к 1920 году стало понятно, что потоки электронов от Солнца привели бы к накоплению отрицательного заряда на Земле и остановке всего механизма. Поэтому Сидней Чепмен и Винсент Ферраро в 20-30-е гг. прошлого века разработали модель взаимодействия нейтрального облака солнечного вещества, состоящего из электронов и ионов (то, что мы сейчас называем плазмой), с магнитным полем Земли. Они показали, что при этом облако будет огибать Землю со всех сторон, формируя область, которая будет свободна от плазмы – полость Чепмена–Ферраро.

Еще одно проявление солнечного корпускулярного потока было замечено в 30-40 гг. прошлого века, в связи с изучением флуктуаций потока космических лучей. Скотт Э. Форбуш из Института Карнеги в Вашингтоне обнаружил, что интенсивность космического излучения, достигающего Земли, была низкой в период высокой солнечной активности 11-летнего цикла и, вдобавок, резко уменьшалась в периоды магнитных бурь. Другими словами, чем выше была активность Солнца, тем меньшее количество частиц космических лучей попадало на Землю. Сначала было высказано предположение, что этот эффект может быть обусловлен флуктуациями земной атмосферы и связанными с солнечной активностью изменениями магнитного поля Земли, приводящими к дополнительному отклонению космических лучей от Земли. Но Джон А. Симпсон из Чикагского университета, который начал регистрировать вариации космических лучей с помощью созданного им нейтронного монитора, обнаружил, что

амплитуда изменений была значительно больше, чем предполагалось. Такой эффект не мог быть вызван вариациями каких-либо параметров на Земле, а должен отражать общее увеличение и уменьшение космических лучей в околоземном пространстве. По-видимому, что-то в излучении Солнца стремится препятствовать распространению космических лучей, и эта помеха возрастает с увеличением солнечной активности.

Общий механизм подобных явлений был открыт шведским физиком нобелевским лауреатом Ханнесом Альвеном. Он не верил в теорию Чепмена–Ферраро, в которой облако в межпланетном пространстве рассматривается как проводящая жидкость. Альвен построил модель, основываясь на рассмотрении движения облака как совокупности отдельных частиц. Он показал, что в случае идеальной проводимости облака, когда в движущейся с облаком системе отсчета электрическое поле внутри облака равно нулю (условие "вмороженности" или МГД-условие), в лабораторной системе возникает электрическое поле, которое существенным образом влияет на движение заряженных частиц. Поток солнечных корпускул, несущий магнитное поле, будет стремиться "выместить" частицы космических лучей из солнечной системы; этот эффект будет тем сильнее, чем интенсивнее солнечное корпускулярное излучение.

Однако чтобы такая модель работала, необходимо было предположить существование в межпланетном пространстве постоянного потока солнечных заряженных частиц. В 30-50 гг. XX в. безраздельно господствовала теория Чепмена–Ферраро, в которой предполагалось, что в отсутствие плазменных облаков от

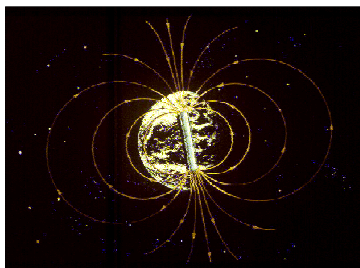


Рис. 4. В "докосмическую" эпоху полагали, что межпланетное пространство пусто

Солнца межпланетное пространство пусто (рис. 4). Вместе с тем давно было известно еще одно проявление постоянного потока солнечных корпускул: отклонение кометных хвостов от Солнца. Долгое время считалось, что эти отклонения вызваны световым давлением. Однако

в середине XX в. появились результаты расчетов, свидетельствующие о том, что светового давления недостаточно для объяснения этого явления. Кроме того, примерно в то же время исследования солнечной короны показали, что ее температура составляет миллионы градусов, а частицы такой энергии уже не могут удерживаться гравитационным полем Солнца. В 1958 г. американский физик Е. Паркер опубликовал теорию солнечной короны, из которой следовало, что давление солнечной плазмы на бесконечности не равно нулю – солнечная корона должна расширяться, причем со сверхзвуковой скоростью. По сути, этот вывод явился предсказанием существования солнечного ветра, однако научная общественность его проигнорировала.

Гордиев узел проблемы солнечно-земных связей был разрушен с началом космической эры, когда появились прямые экспериментальные данные. Впервые солнечный ветер был обнаружен во время полетов в 1959 г. советских космических аппаратов Луна-2 и Луна-3 с помощью приборов, разработанных под руководством К. И. Грингауза. В 1962 г. во время полета американского аппарата Mariner-2 к Венере были выполнены более точные измерения параметров солнечного ветра и показан перманентный характер потоков плазмы от Солнца. Существование непрерывного потока солнечной плазмы означало, что полость Чепмена–Ферраро – не временное образование, а постоянная структура, сформированная взаимодействием потока солнечного ветра и геомагнитного поля. В 1959 г. англичанин Томас Голд предложил для этого образования термин "магнитосфера". Примерно в то же время появился и термин гелиосфера – пространство, заполненное солнечным ветром.

Отдельная история связана с исследованием полярных сияний, которые вписывались в концепцию связи солнечных вспышек и геомагнитных бурь, так как наблюдаются гораздо чаще. Кроме того, полярные сияния являются в некоторой степени локальным явлением в отличие от геомагнитной бури, которая регистрируется магнитометрами по всему земному шару. Уже упоминавшийся норвежский ученый Биркеланд на основе данных приполярных магнитометров предположил, что полярные сияния вызваны

особым типом магнитной бури, которая проявляется только в высоких широтах. Он назвал ее "элементарный полярный шторм".

Биркеланд умер в 1918 г. и его теория была забыта. Долгое время считалось, что полярные магнитные бури являются отдельными фазами глобальных геомагнитных возмущений. Чепмен, не веривший в "элементарные полярные бури", называл эти явления суббурями (*substorm*) и подчеркивал, что полярные бури Биркеланда являются частью единого процесса возмущения геомагнитного поля. Только в 60–70-х гг. прошлого века стало ясно, что суббури представляют собой особый вид геомагнитных возмущений, сопровождаемых возникновением электрических токов в ионосфере (токи Биркеланда) и полярными сияниями.

Исследования связей геомагнитных возмущений и солнечной активности в 1957 г. вступили в новую фазу, которая в первую очередь связана с началом космической эры в истории человечества. По мере освоения космического пространства изучение условий и процессов в межпланетной и околоземной среде начало приобретать прикладное значение. Вторым важным толчком к бурному развитию данной области науки послужило проведение в 1957–1958 гг. Международного геофизического года (IGY), который впервые объединил усилия международной научной общественности и значительно увеличил эффективность научных исследований в области солнечно-земных связей.

С практической необходимостью предсказаний обстановки в околоземном пространстве связано появление и самого понятия "космическая погода". Считается, что этот термин возник в начале 70-х гг., когда количество космических аппаратов на околоземных орбитах начало быстро расти. Однако еще в 1959 г. Томас Голд писал, что "исследования межпланетного газа являются аналогом метеорологии для Земли... мы должны спросить [себя], какие эксперименты будут являться эквивалентом метеорологических измерений температуры, давления и ветра?"

Дальнейшее развитие космических исследований показало, насколько были пророческими эти слова. В космическом пространстве наблюдаются штили и бури, спокойные течения и резкие внезапные порывы солнечного ветра. Солнечная активность вызывает выбросы в межпланетное пространство огромных облаков замагниченной плазмы, которые подобно тропическим

ураганам на Земле приводят к тяжелым последствиям для космической техники. В конце 70-х гг. реакция верхней атмосферы на излучение солнечных вспышек вызвала сход с орбиты американской орбитальной станции "Скайлэб". Потоки релятивистских электронов («электроны-убийцы») вызвали проблемы с электронными приборами на спутниках Equator-S, Polar и многих других. Во время мощных геомагнитных бурь в протяженных проводящих системах на поверхности Земли возникают индуцированные токи. В 1989 г. такие токи стали причиной аварии, произошедшей в канадской энергетической сети и оставившей на несколько часов провинцию Квебек без электричества.

Количество подобных фактов растет настолько стремительно, что исследования космической погоды приобретают большую практическую и даже экономическую значимость. При этом усилия ученых направлены как на развитие методов мониторинга и прогнозирования различных явлений в гелиосфере и магнитосфере Земли, так и на изучение физических механизмов и закономерностей процессов, которые протекают в цепочке Солнце–гелиосфера–магнитосфера Земли.

1. Основные понятия космической погоды

На сегодняшний день совершенно ясно, что основным источником геомагнитных возмущений различных типов является солнечная активность. Схематично эту связь можно описать следующим образом: в результате либо взрывных процессов на Солнце, либо изменений состояния его оболочек, в первую очередь короны, в межпланетной среде начинает распространяться возмущение. Этот процесс происходит в солнечном ветре, и так как возмущение, как правило, движется быстрее магнитозвуковой скорости в плазме (~ 70 км/с на орбите Земли) и быстрее средней скорости солнечного ветра (~ 400 км/ч), то его движение сопровождается образованием ударных волн. Кроме возмущения потока стационарного солнечного ветра происходит искажение межпланетного магнитного поля. Когда возмущение достигает магнитосферы Земли, происходит деформация последней, сопровождаемая целым комплексом разнообразных явлений, большинство из которых приводит к негативным последствиям для космической и, косвенно, для наземной инфраструктуры. Кроме того, существует отдельный класс процессов на Солнце, который непосредственно приводит к возмущениям в околоземном пространстве. В первую очередь, это солнечные вспышки и сопровождающее их электромагнитное и корпускулярное излучение.

1.1 Базовые понятия физики Солнца

Солнце – это ближайшая к нам звезда, которая является гравитационным центром Солнечной системы. Масса Солнца равна $1.99 \cdot 10^{33}$ г, что в 330 000 раз больше массы нашей планеты. Солнце представляет собой огромный газовый (точнее плазменный) шар, состоящий примерно на 89 % из водорода (по количеству атомов) и на 9 % из гелия. На долю остальных элементов приходится не более 2 %. Такой состав типичен для звезд нашей Галактики. Можно сказать, что Солнце представляет собой рядовую звезду спектрального класса G2. Максимум электромагнитного излучения Солнца приходится на желто-зеленые лучи (рис. 1.1). Спектр излучения очень близок к спектру излучения абсолютно черного

тела, но не совпадает с ним. К примеру, температура Солнца, определенная по полной светимости из закона Стефана–Больцмана, составляет 5780 К – это так называемая эффективная температура Солнца, тогда как температура, соответствующая максимуму спектральной кривой (по закону Вина), равна 6750 К.

Количество лучистой энергии Солнца, падающей за единицу времени на единичную площадку, перпендикулярную направлению на Солнце и расположенную за пределами земной атмосферы (на расстоянии 1 а.е. от Солнца), называется **солнечной постоянной**. В настоящее время значение солнечной постоянной составляет около 1360 Вт/м^2 . Солнечная постоянная не является константой в точном смысле этого слова. Однако исследовать ее вариации на поверхности Земли достаточно сложно из-за множества искажающих факторов. Спутниковые измерения показали наличие двух типов вариаций:

- долгопериодические, связанные с циклами солнечной активности. В максимуме цикла солнечная постоянная выше. Амплитуда вариаций равна около 0.1 %

- краткосрочные вариации, связанные с характерным временем порядка суток и обусловленные проплыванием по солнечному диску ярких факелов и темных пятен. Амплитуда таких вариаций составляет несколько десятых процента как в сторону повышения, так и в сторону понижения.

Наблюдения за солнечным диском свидетельствуют о регулярном движении наружных слоев Солнца. Уже давно было замечено, что Солнце вращается не как твердое тело, поэтому период вращения зависит от гелиошироты. Сидерический (относительно неподвижных звезд) период вращения Солнца равен примерно 25 дней на экваторе и 30 дней вблизи полюсов. Период вращения Солнца относительно земного наблюдателя (синодический период) составляет почти 27 дней на экваторе и 32 дня у полюсов. Оно происходит вокруг некоторой оси, перпендикулярной плоскости солнечного экватора, который, в свою очередь, образует с плоскостью эклиптики угол в $7^\circ 15''$. Солнце вращается против часовой стрелки, если смотреть с северного полюса небесной сферы, или слева направо, если смотреть с Земли. Направление вращения Солнца совпадает с направлением движения планет по их орбитам.

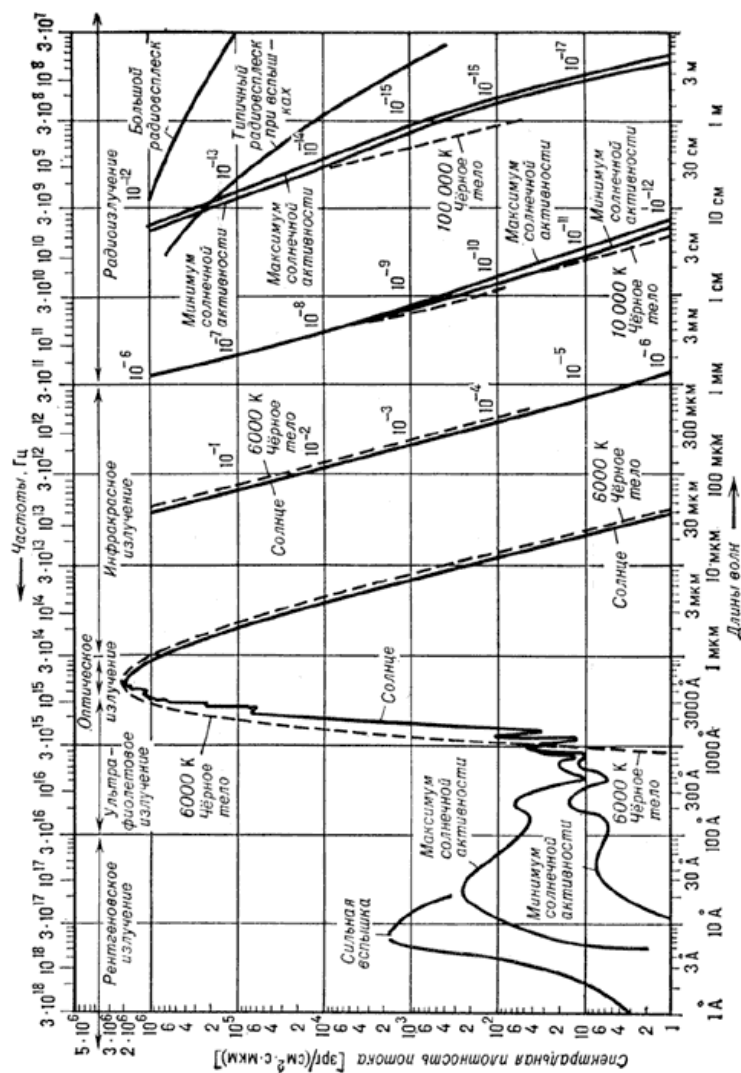


Рис. 1.1. Спектр излучения Солнца: непрерывные линии – результат измерений, штриховые – распределение энергии в спектре абсолютно черного тела; для волн длиннее 30 мкм пороки величины потока указаны отдельно (близ кривых)

Положение пятен и других образований на солнечном диске определяется с помощью гелиографической или керрингтоновской системы координат. На видимом солнечном диске верхняя и нижняя точки соответствуют "северу" и "югу", левая и правая точки – "востоку" (в отличие от земных координат!) и "западу", соответственно (рис. 1.2). В этом случае движение солнечных пятен по диску, вследствие вращения Солнца, происходит с "востока" на "запад".

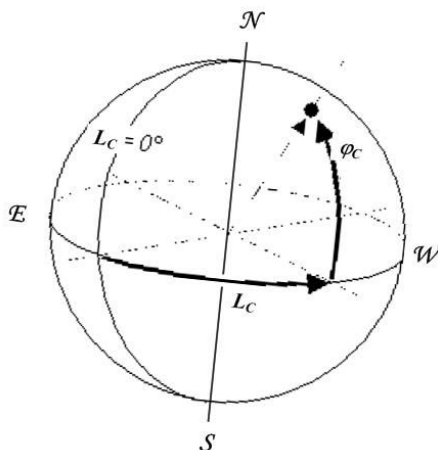


Рис. 1.2. Керрингтоновские координаты

Керрингтоновской долготой L_C называется угловое расстояние в направлении с "востока" на "запад" (по ходу вращения Солнца), отсчитываемое от нулевого меридиана, который *вращается* вместе с Солнцем. Так как угловые скорости вращения Солнца различные на разных гелиоширотах (дифференциальное вращение), то используется средняя скорость вращения $13.2^\circ/\text{сут.}$ или один оборот за 27.2753 суток. На поверхности Солнца не существует постоянной структуры, которая могла бы отмечать нулевой меридиан, поэтому Керрингтон произвольно выбрал за таковой вертикальную линию посередине солнечного диска, которая соединяла северный и южный полюсы 9 ноября 1853 г. в 00 часов по Гринвичскому времени. С тех пор положение этой воображаемой линии точно рассчитывается для любого момента времени и заносится в специальные таблицы.

Керрингтоновский оборот – это количество полных оборотов, которые сделал керрингтоновский нулевой меридиан с 1853 года. При скорости 13.39 оборотов в год к 2008 году количество оборотов превысило две тысячи.

Керрингтоновской широтой φ_c называется угловое расстояние от солнечного экватора, который определяется как линия на солнечной поверхности, равноудаленная от полюсов. На северном и южном полюсе керрингтоновская широта равна 90° и -90° , соответственно. На экваторе гелиоширота равна нулю.

Кроме кэррингтоновской системы координат используется стационарная система относительно наблюдателя с Земли. В ней нулевой меридиан расположен посередине видимого солнечного диска. При определении гелиокоординат следует помнить, что солнечный экватор наклонен к плоскости эклиптики на угол $7^\circ 15''$ (см. рис. 1.2).

Строение Солнца схематично изображено на рисунке 1.3. Источником энергии Солнца служат термоядерные реакции, которые происходят во **внутреннем ядре** ($r < 0.2R_c$, где $R_c = 696\,000$ км – солнечный радиус), где температура достигает 15 млн градусов. В процессе реакции (которая может идти по трем различным каналам) из четырех ядер водорода образуется одно ядро гелия:



при этом выделяется энергия около 26 МэВ.

По мере удаления от центра Солнца температура (и плотность) становятся меньше, выделение энергии быстро прекращается. Та часть Солнца, в которой выделение энергии за счет ядерных реакций незначительно и где происходит лишь ее перенос, путем последовательных процессов поглощения и переизлучения электромагнитных квантов, называется **лучистой зоной**. Она занимает область примерно от 0.3 до $0.7R_c$.

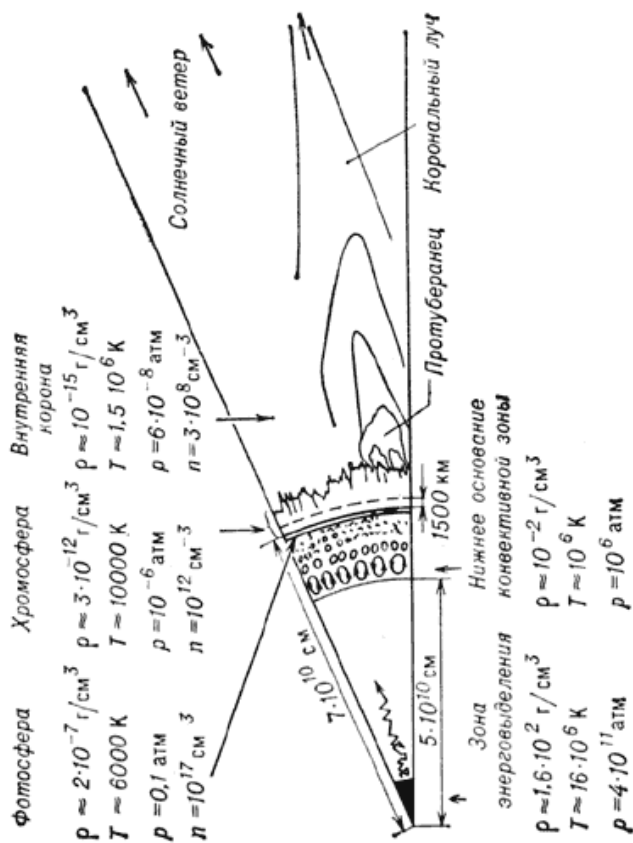


Рис. 1.3. Идеализированная картина общей структуры Солнца (без сохранения масштаба)

В наружных слоях, близких к атмосфере Солнца, физические условия резко меняются: растет градиент температуры (скорость падения температуры с радиусом), уменьшается степень ионизации, увеличивается непрозрачность газа. Все эти обстоятельства способствуют возникновению активного перемешивания самого солнечного вещества, т.е. конвекции. **Конвективная зона** простирается до расстояния примерно 700 000 км от центра, и ее граница считается границей Солнца. Конвективная зона непосредственно примыкает к солнечной атмосфере и в значительной степени определяет ее структуру и динамику. Именно в конвективной зоне происходят процессы усиления магнитного потока и, по-видимому, образования в основании конвективной зоны магнитного слоя с большой напряженностью магнитного поля, что, в конечном счете, приводит к возникновению активных областей на Солнце.

Над конвективной зоной находится солнечная атмосфера, которая состоит из трех слоев с различными физическими условиями: фотосфера, хромосфера и корона.

Кажущаяся поверхность Солнца представляет собой **фотосферу** – относительно тонкий (~400 км) сферический слой, который является основным источником излучения в видимой части спектра. Температура в фотосфере быстро падает с увеличением расстояния от центра Солнца и для верхних слоев составляет порядка 4 300 К. Следует заметить, что при такой температуре водород уже может существовать в нейтральном состоянии. Фотосфера Солнца в нижней части непосредственно переходит в конвективную зону Солнца. Поэтому ее структура представляет собой как бы "сетку", покрытую гранулами (рис. 1.4). Средний размер гранул около 700 км. Сами гранулы являются верхушками конвективных ячеек, расположенных под фотосферой. Кроме гранул именно в фотосфере наблюдаются такие явления, связанные с солнечной активностью, как пятна, факелы, вспышки (см. далее).

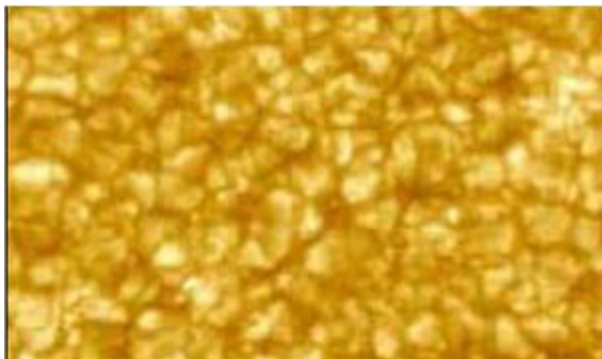


Рис. 1.4. Пример грануляции фотосферы Солнца

Следующий за фотосферой более высокий слой солнечной атмосферы называется **хромосферой**, ее толщина около 15 тыс. км. Температура нижней хромосферы составляет около 4 500 К, но уже на границе с короной температура достигает миллиона градусов. Хромосферу можно наблюдать во время солнечных затмений. Когда Луна полностью закрывает фотосферу, вблизи точки контакта вспыхивает розовый серп хромосферы. В спектре хромосферы очень сильны линии гелия, по которым этот элемент и был впервые открыт на Солнце. Неоднородность хромосферы значительно выше, чем в фотосфере. Наиболее мелкие структурные образования называются спикулами. Они имеют радиальную форму, причем вытянуты преимущественно в радиальном направлении, придавая хромосфере вид горящей травы. Со скоростями в несколько десятков километров в секунду спикулы поднимаются в корону и растворяются в ней. Спикулы формируют хромосферную сетку, состоящую из отдельных ячеек размером около 50 тыс. км. Также в хромосфере наблюдаются фибриллы – петли магнитного поля на поверхности Солнца (рис. 1.5).

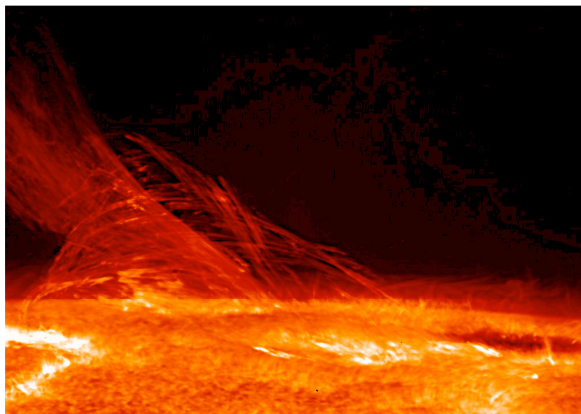


Рис. 1.5. Петли магнитного поля в хромосфере Солнца. Изображение со спутника Hinode

Внешняя и самая разряженная часть атмосферы Солнца называется **солнечной короной**. Она продолжается в межпланетное пространство в виде движущейся от Солнца плазмы – солнечного ветра. Можно сказать, что планеты солнечной системы (в том числе и Земля) находятся в атмосфере Солнца. Корона начинается от слоя резкого повышения температуры до миллиона градусов Кельвина. Источником столь сильного разогрева является, по-видимому, энергия акустических и магнитозвуковых ударных волн, которые распространяются от фотосферы и поглощаются в короне. Этот процесс немного напоминает работу гигантской микроволновой печи.

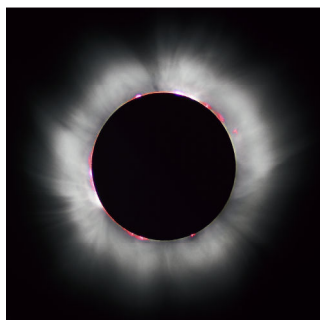


Рис. 1.6. Солнечная корона во время солнечного затмения 1999 г.

Лучше всего наблюдать корону во время полной фазы солнечного затмения. К сожалению, она длится считанные минуты, что существенно затрудняет исследования. Сейчас для получения изображений солнечной короны используются специальные приборы – коронографы, позволяющие проводить наблюдения непрерывно.

Плотность вещества в короне гораздо меньше, чем в хромосфере и быстро уменьшается с расстоянием от Солнца. На нижней границе короны она составляет 10^{-15} г / см³ (концентрация 10^8 см⁻³), а на расстоянии $3R_c$ — только $6 \cdot 10^{-19}$ г / см³ (концентрация $4 \cdot 10^5$ см⁻³). Корона не имеет резких очертаний и сильно меняется со временем. В структуре короны обычно различают несколько "лучей", расходящихся от Солнца (рис. 1.6). Плотность вещества в этих "лучах", по-видимому, на порядок выше, чем в окружающей короне.

В полярных областях Солнца постоянно существуют так называемые **корональные дыры** — области с аномально низкими температурами и пониженной концентрацией частиц. На снимках Солнца в ультрафиолетовых лучах корональные дыры видны как темные области.

Солнечная корона активно излучает и в радиодиапазоне. Радиоизлучение Солнца обычно делят на две части: постоянную и переменную. Первая называется радиоизлучением спокойного Солнца, вторая — радиоизлучением возмущенного Солнца. Следует отметить, что солнечная корона, исключительно прозрачная для видимого излучения, вообще-то плохо пропускает радиоволны. Тем не менее, радиометоды позволяют проследить продолжение солнечной короны на огромных расстояниях от Солнца — в несколько десятков радиусов. Для этого используют "просвечивание" короны с помощью различных астрономических радиоисточников, к примеру, Крабовидной туманности в созвездии Тельца.

Весьма существенную, а зачастую и основную роль в целом ряде физических процессов на Солнце играет магнитное поле Солнца. Различают два типа поля. Общее магнитное поле Солнца подобно полю дипольного типа. Его величина на уровне фотосферы составляет 1–2 Гс. Над полюсами силовые линии этого поля расходятся медленнее, чем для просто дипольного, и не обнаруживают тенденции изгибаться к экватору (открытые силовые линии). Исследования показали, что общее поле состоит из множества мелких структур разной полярности и размеров (рис. 1.7). Значение поля в отдельных элементах может достигать десятков гаусс. Только при крупномасштабном усреднении наблюдается слабое поле дипольного типа. Периодически, раз в 11

лет (11-летний цикл), дипольное поле Солнца меняет свою полярность на противоположную.

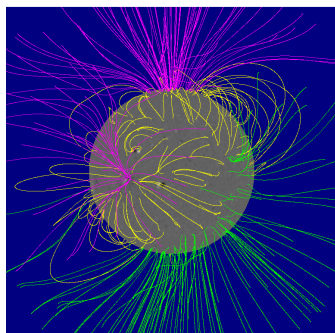


Рис. 1.7. Реконструкция силовых линий магнитного поля Солнца

Другой тип поля, который наблюдается вблизи солнечного экватора, имеет тороидальную структуру. Это в основном локальные магнитные поля активных образований на Солнце. Напряженность поля здесь может достигать нескольких сотен гаусс.

В минимуме активности Солнца, как правило, наблюдаются только регулярные структуры: грануляция в фотосфере, хромосферная сетка и наиболее симметричная структура короны. Однако время от времени в солнечной атмосфере возникают активные образования, причиной появления которых являются локальные магнитные поля. Наиболее наглядным проявлением солнечной активности являются солнечные пятна. Уже более ста пятидесяти лет известно, что количество пятен на Солнце меняется с периодом около 11 лет (**цикл Шваба-Вольфа**). Для исследования солнечной активности швейцарский астроном Рудольф Вольф ввел количественный индекс, названный впоследствии его именем. **Числа Вольфа** вычисляются по формуле

$$W = k(f + 10g), \quad (2)$$

где f – полное количество наблюдаемых пятен, g – количество наблюдаемых групп пятен, а k – нормировочный коэффициент, который связывает числа Вольфа, полученные разными наблюдателями.

На рис. 1.8 хорошо видны периоды повышенной (большое количество пятен) и пониженной солнечной активности. Длительность разных циклов различна: от 7 до 17 лет, со средним значением 11.2 года. Циклы несимметричны: от минимума до максимума (стадия роста) – 4.6 года, а от максимума до минимума (фаза спада) в среднем проходит 6.7 года. Циклы отличаются и по мощности: годовые максимальные числа Вольфа меняются от 46 до 190. Как правило, чем более мощным является данный цикл, тем он

короче. Среднегодовые значения чисел Вольфа имеются с 1700 г., а среднемесячные с 1749 г. Нумерация 11-летних циклов солнечной активности ведется с нулевого цикла (начало в 1745 г.). Последний, 23-й, цикл солнечной активности продолжался с 1996 по 2007 год.

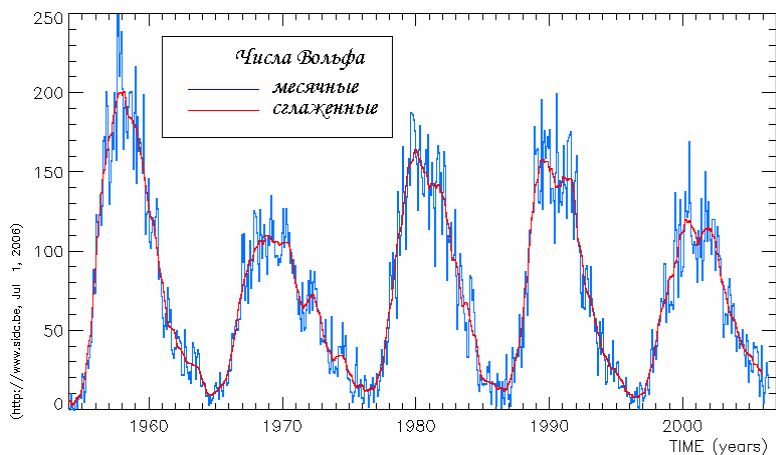


Рис. 1.8 Зависимость чисел Вольфа от времени

Началом развития 11-летнего цикла солнечной активности считается интервал времени, когда на Солнце после периода практически полного отсутствия пятен (минимум солнечной активности) появляются первые пятна, расположенные на высоких гелиоширотах: $\varphi_c = \pm 35 - 40^\circ$. По мере развития солнечного цикла пятна постепенно спускаются к солнечному экватору и вблизи максимума солнечной активности располагаются на $\varphi_c = \pm 15^\circ$, а в конце цикла широта уменьшается до $\varphi_c = \pm (5 - 8)^\circ$. Данное явление называется **законом смещения пятнообразования Шперера**. Этот закон хорошо иллюстрируется с помощью графика расположения солнечных пятен по гелиошироте в зависимости от времени (рис. 1.9). Распределение солнечных пятен приобретает вид сходящихся к солнечному экватору областей, которые напоминают крылья бабочки. В честь английского астронома Эдварда Маундера такая диаграмма получила название "**бабочки**" **Маундера**.

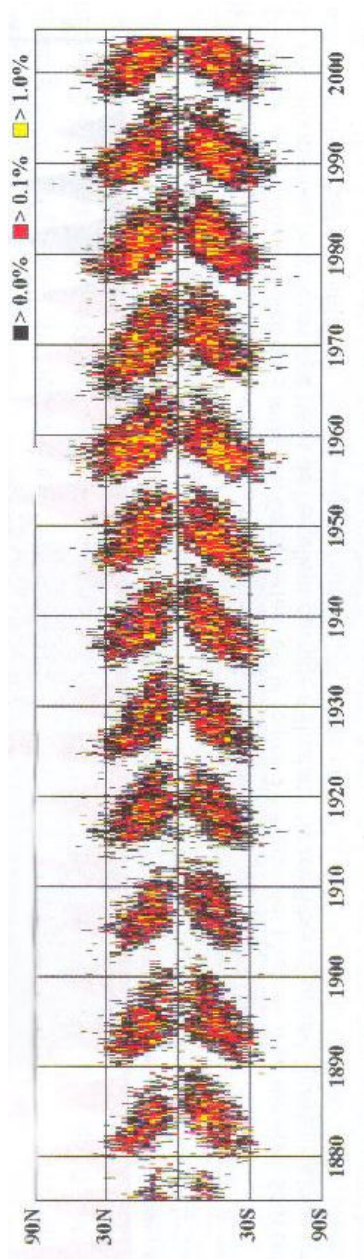


Рис. 1.9. "Бабочки" Маундера. Динамика гелиошироты активных областей

Числа Вольфа не являются единственной характеристикой солнечной активности. Например, в ходе солнечного цикла меняется значение солнечной постоянной. Кроме того, по мере развития цикла меняется характер расположения корональных дыр на Солнце. На фазе роста солнечной активности площадь корональных дыр уменьшается, и они смещаются к полюсам. В максимуме корональные дыры расположены в основном на средних широтах, а на фазе спада они опускаются к экватору. Изменениям со средним периодом около 11 лет подвержены также и средние значения площадей пятен, число вспышек и протуберанцев. Значительные изменения от минимума активности к максимуму претерпевает интенсивность всех видов солнечного излучения (радиоизлучения, ультрафиолетового, корпускулярного).

Важнейшей особенностью циклов солнечной активности является закон изменения магнитной полярности солнечных пятен. Известно, что пятна чаще всего образуют биполярные группы, в которых два главных пятна – ведущее (в направлении вращения Солнца), т.е. более западное, и хвостовое – имеют противоположные магнитные полярности. В течение каждого 11-летнего цикла все ведущие пятна биполярных групп имеют одинаковую полярность в северном полушарии и также одинаковую, но противоположную – в южном. В следующем цикле полярности ведущих и хвостовых пятен меняются на противоположные. Одновременно с этим меняется полярность и общего магнитного поля Солнца. Поэтому часто говорят не об 11-летнем, а о 22-летнем цикле солнечной активности – **цикле Хейла**.

1.2 Строение гелиосферы

Гелиосфера – это пространство, в котором распространяется солнечный ветер. Вдали от Солнца оно ограничено гелиопаузой, на которой динамическое давление солнечного ветра уравнивается давлением галактического магнитного поля, космических лучей и межзвездного газа. Согласно теоретическим оценкам расстояние до гелиопаузы составляет около 100–120 а.е. (астрономических единиц).

Солнечный ветер представляет собой постоянный поток коронального вещества от Солнца, формирующийся вследствие

отсутствия в короне термодинамического и гравитационного равновесия. Равновесие нарушается из-за перегрева короны, причины которого на сегодняшний день до конца не ясны. Параметры истечения солнечного ветра определяются магнитным полем Солнца. В дипольной конфигурации магнитного поля Солнца на высоких гелиоширотах формируются области, из которых силовые линии магнитного поля уходят на бесконечность (корональные дыры). Из этих областей истекает быстрый и разреженный солнечный ветер (скорость ~ 600 км/с и плотность менее 5 частиц в см^3 на удалении 1 а.е.). Вне корональных дыр силовые линии магнитного поля Солнца замкнуты, и эти зоны являются источниками медленного солнечного ветра (скорость 300–400 км/с и плотность 5–10 частиц в см^3 на удалении 1 а.е.). Скорость солнечного ветра для обеих компонент оказывается больше скорости звука и больше альвеновской¹ скорости, поэтому поток носит сверхмагнитозвуковой характер. Вектор скорости направлен практически радиально.

Параметры солнечного ветра сильно зависят от координат и времени, в частности они подвержены 11-летним вариациям солнечного цикла. Средняя скорость солнечного ветра на орбите Земли оказывается наибольшей в годы спада солнечной активности. Объясняется это тем, что в этот промежуток времени Земля дольше всего оказывается погруженной в зону действия высокоскоростных потоков из корональных дыр. Основными компонентами солнечного ветра являются электроны и протоны. Содержание α -частиц относительно протонов составляет около 4–5 %. Это соотношение может сильно меняться после солнечных вспышек, когда доля α -частиц может варьироваться от долей процента до 25 %. Концентрация электронов примерно равна концентрации ионов, однако их температуры обычно различаются в два-три раза:

$$T_e \approx (12 \div 15) \cdot 10^4 \text{ и } T_p \approx (5 \div 10) \cdot 10^4. \quad (3)$$

Наиболее удаленные от Солнца измерения солнечного ветра проведены с помощью космических аппаратов Pioneer-10, 11 и Voyager- 1, 2, которые после трех десятков лет своего полета

¹ Скорость поперечных волн в замагниченной плазме. На орбите Земли составляет порядка 50 км/с.

удалились от Солнца на расстояние 80–100 а.е. Плотность солнечного ветра убывает с удалением от Солнца пропорционально r^{-2} , при этом скорость солнечного ветра слабо меняется с расстоянием.

Несмотря на свою постоянную природу, солнечный ветер не играет особой роли в потоках энергии и импульса от Солнца на фоне светового излучения. В табл. 1.1 даны примерные порядки величин для солнечного ветра и электромагнитного излучения на расстоянии 1 а.е.

Таблица 1.1

Тип излучения	Полный поток		
	Энергии, эрг/с	Импульса, дин	Массы, г/с
Электромагнитное	$4 \cdot 10^{33}$	$1.3 \cdot 10^{23}$	$4 \cdot 10^{12}$
Корпускулярное	10^{27}	$3 \cdot 10^{19}$	10^{12}

Непосредственные измерения показывают, что наряду с потоком солнечной плазмы в межпланетном пространстве присутствует магнитное поле, которое является продолжением солнечного магнитного поля. Кроме того, важную роль в формировании межпланетного магнитного поля (ММП) играют электрические токи в самой гелиосфере, которые легко возбуждаются в плазме солнечного ветра вследствие ее высокой электропроводности. В предположении о бесконечной проводимости солнечного ветра электрическое поле в системе отсчета, связанной с потоком плазмы отсутствует (магнитодинамическое условие или условие "вмороженности"). В этом случае в неподвижной системе отсчета в плазме появляется электрическое поле

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (4)$$

которое направлено поперек потока солнечного ветра и на расстоянии от солнца ~ 1 а.е. имеет величину ~ 1 В / км. Здесь $\mathbf{v}$ – скорость солнечного ветра, $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции. Силовые линии межпланетного магнитного поля увлекаются солнечным ветром и вследствие вращения Солнца закручиваются. Первую модель межпланетного магнитного поля предложил

Паркер в 1958 году. В ней линии ММП совпадают с линиями течения вещества, и компоненты поля в сферических координатах можно вычислить по следующим простым формулам:

$$B_r = B_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2, \quad (5)$$

$$B_\theta = 0, \quad (6)$$

$$B_\varphi = -B_r \frac{\Omega r}{v} \sin \theta. \quad (7)$$

Здесь B_0 – значение поля на расстоянии r_0 , $\Omega = 2.7 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ – угловая скорость вращения Солнца. В покоящейся системе отсчета координат вблизи солнечного экватора линии межпланетного поля имеют вид спиралей Архимеда, закрученных против вращения Солнца:

$$r = r_0 - \frac{v}{\Omega} (\varphi - \varphi_0). \quad (8)$$

Угол наклона этой спирали ψ относительно радиального направления равен

$$\psi = \arctan \frac{\Omega(r - r_0)}{v} \quad (9)$$

и на орбите Земли составляет около 45° (при скорости солнечного ветра 400 км/с).

Межпланетные магнитные поля в северном и южном полушарии направлены в противоположные стороны. Основной структурой, определяющей трехмерную конфигурацию ММП в крупных масштабах, является **гелиосферный токовый слой** (ГТС), который разделяет области исходящих и входящих на Солнце силовых магнитных линий. Таким образом, ГТС разделяет всю гелиосферу на две половины с равными по абсолютной величине, но противоположными по знаку магнитными потоками в них и определяет собой положение магнитного экватора в гелиосфере. Из-за вращения Солнца и регулярных переполусовок солнечного магнитного поля, наклона солнечного экватора к эклиптике и различных неоднородностей, связанных с течением солнечного ветра, гелиосферный токовый слой приобретает сложную трехмерную форму, напоминающую

юбку балерины (рис. 1.10). Проекция этой структуры на плоскость эклиптики приводит к тому, что наблюдатель на Земле оказывается то выше, то ниже токового слоя, из-за чего попадает в секторы с различным направлением радиальной составляющей вектора магнитной индукции (рис. 1.11).

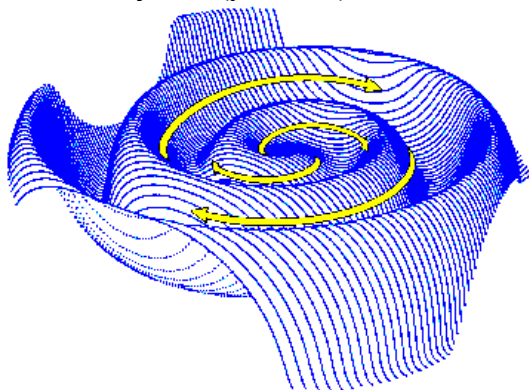


Рис. 1.10. Трехмерная форма гелиосферного токового слоя

Количество секторов обычно четное и может составлять от 2 до 6. Вся эта структура вращается вместе с Солнцем с периодом около 27 дней, из-за чего Земля несколько раз в месяц пересекает гелиосферный токовый слой и оказывается в ММП другой

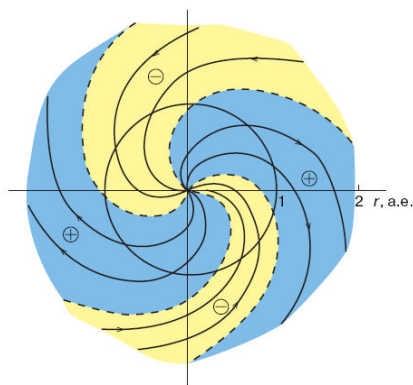


Рис. 1.11. Секторная структура ММП

полярности. Толщина ГТС составляет 10 – 100 тыс. км. В периоды спокойного Солнца число секторов, их относительное положение и размеры могут мало меняться в течение нескольких месяцев и даже года. Следует отметить, что различные возмущения, связанные с активными зонами на Солнце, значительно искажают секторную структуру ММП.

Наряду с плазмой солнечного ветра и межпланетным магнитным полем важной составляющей в динамическом и энергетическом балансе гелиосферы являются космические лучи – потоки субрелятивистских, релятивистских и ультра-релятивистских частиц – в первую очередь, протонов и легких ядер.

Первичные космические лучи (ПКЛ) представляют собой поток ядер атомов, в основном протонов, родившихся и ускоренных до высоких энергий в космических объектах или в космическом пространстве. В зависимости от энергии и механизма генерации ПКЛ условно можно выделить несколько основных групп:

- экстрагалактические КЛ – космические лучи, родившиеся вне пределов нашей Галактики, и имеющие энергию, достаточную для того, чтобы достичь Земли. По современным представлениям это энергии, превышающие 10^{17} эВ;
- галактические КЛ (ГКЛ) – космические лучи, родившиеся в нашей Галактике. Считается, что частицы с энергиями до 10^{15} - 10^{17} эВ не могут покинуть пределов нашей Галактики;
- солнечные КЛ – потоки частиц, образованные в активных процессах на Солнце (до 15 – 100 ГэВ) ($1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$);
- гелиосферные (межпланетные) КЛ – образованные на ударных волнах во время распространения магнетизированной солнечной плазмы в гелиосфере. Типичные энергии, до которых возможно такое ускорение – 10 – 100 МэВ.

В широкой области энергий от 10 до 10^6 ГэВ дифференциальный спектр ПКЛ имеет степенной вид с показателем степени примерно равным -2.7 (рис. 1.12).

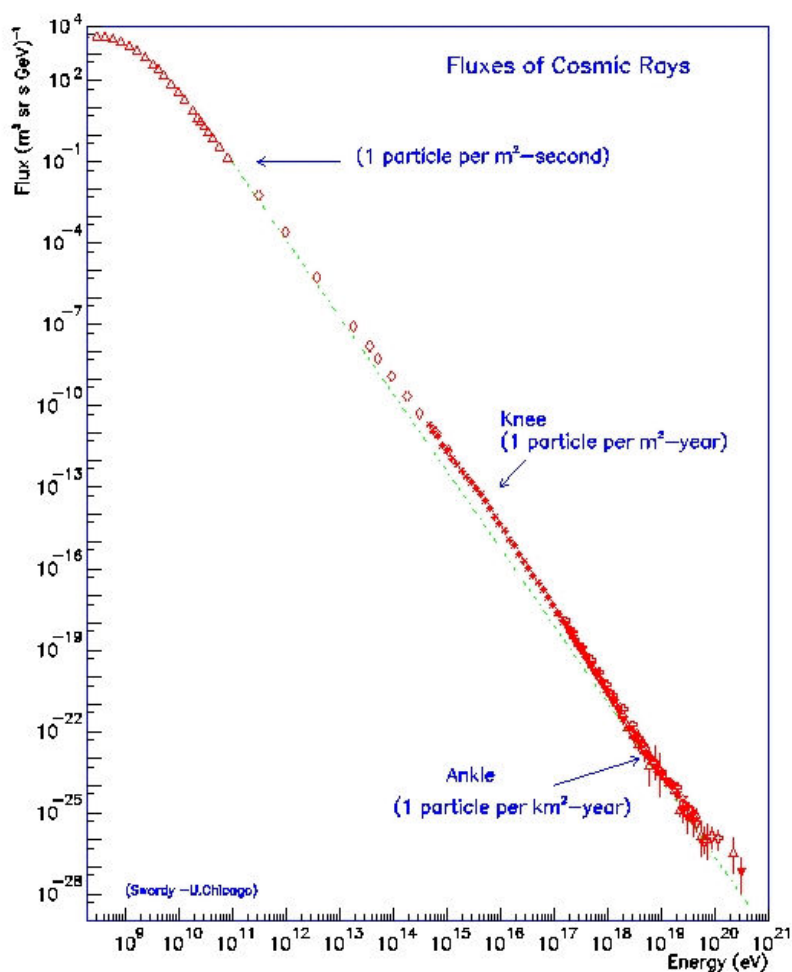


Рис. 1.12. Дифференциальный энергетический спектр первичных космических лучей

Поток ПКЛ высоких энергий вне пределов гелиосферы с высокой степенью изотропен и постоянен. В области энергий до 10 ГэВ поток ПКЛ модулируется различными солнечными процессами, интенсивность которых сильно зависит от солнечной активности. Причем процессы, связанные с солнечной активностью, могут вызвать изменения как величины

интенсивности, так и изотропии первичного потока космических лучей. Например, гелиосферные возмущения, связанные с распространением в межпланетном пространстве мощного выброса коронального вещества могут привести к образованию ударной волны и к формированию зоны с пониженной плотностью первичных космических лучей, которые рассеиваются на неоднородностях ММП – зона форбуш-понижения. Регистрация интенсивности космических лучей на поверхности Земли позволяет наблюдать это явление – **форбуш-эффект** – при прохождении ударной волны через околоземное пространство.

Изотропный и перманентный характер потока первичных космических лучей галактического происхождения в области энергий 10–1000 ГэВ позволяет рассматривать их в качестве естественного проникающего излучения, которое пронизывает всю гелиосферу и может служить инструментом для исследования различных гелиосферных возмущений.

1.3 Структура магнитосферы Земли

Магнитосфера Земли формируется в результате взаимодействия солнечного ветра с собственным магнитным полем Земли. При этом образуются два пограничных слоя: внешняя ударная волна (в которой скорость солнечного ветра падает до дозвуковой) и магнитопауза, отделяющая плазму солнечного ветра от магнитосферной полости. Структура магнитосферы схематично изображена на рис. 1.13.

Область между головной ударной волной и магнитопаузой носит название переходный слой. **Магнитопауза**, определяемая условием

$$\frac{B^2}{8\pi} = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (10)$$

считается границей магнитосферы. Здесь слева стоит плотность энергии геомагнитного поля характеризующегося вектором магнитной индукции $\vec{B}$, а справа – плотность кинетической энергии солнечного ветра. В спокойных условиях солнечный ветер не может пересечь магнитопаузу и проникнуть внутрь магнитосферы, за исключением особых точек – каспов – над полярными областями.

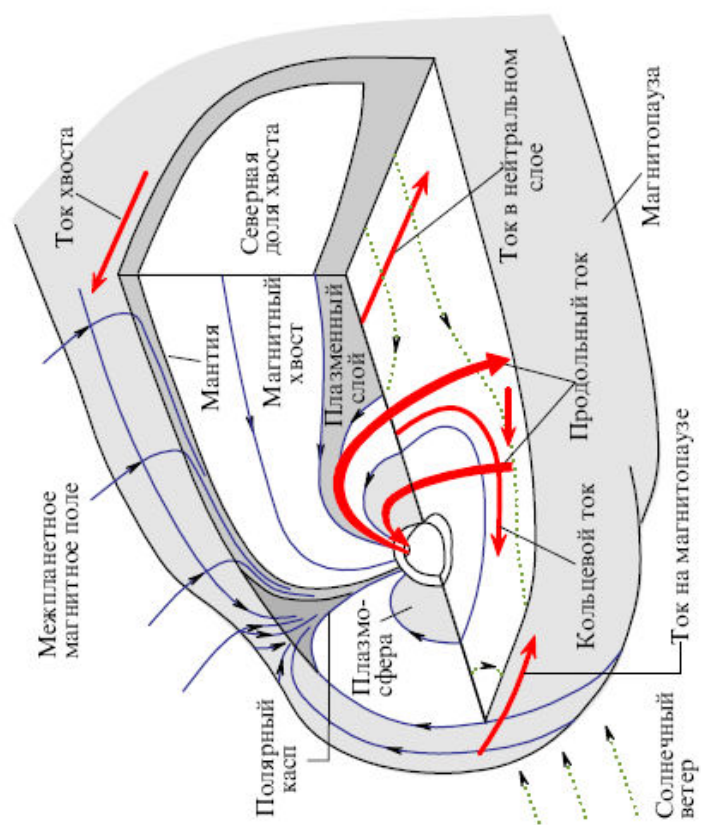


Рис. 1.13. Структура магнитосферы Земли

Несмотря на название, форма магнитосферы далека от сферической. С солнечной стороны расстояние от центра Земли до границы магнитосферы составляет около 70 000 км (10–12 радиусов Земли, $R_3 = 6371$ км). В этой области форма магнитопаузы напоминает пулеобразную. Часто для расчетов используется и параболическое приближение. С боков от Земли (вдоль земной орбиты) расстояние до магнитопаузы составляет уже $15 R_3$. Далее граница магнитосферы имеет почти цилиндрическую форму с радиусом $20\text{--}25 R_E$ и тянется на сотни и тысячи R_3 в антисолнечном направлении.

В формировании магнитосферы и магнитосферного магнитного поля участвует несколько источников:

- внутриземные токи;
- поверхностные токи на магнитопаузе, экранирующие поле внутренних источников;
- токи в нейтральном слое хвоста магнитосферы и замыкающие их токи на поверхности хвоста;
- кольцевой ток;
- продольные токи, вместе с замыкающими их токами в ионосфере и магнитосфере.

Магнитосферное магнитное поле определяет движение заряженных частиц и структуру большинства плазменных образований в околоземном космическом пространстве. В отличие от внутреннего магнитного поля Земли, магнитосферное магнитное поле подвержено быстрым изменениям, связанным с изменением условий в межпланетной среде. Особо сильные возмущения в солнечном ветре приводят к развитию геомагнитных возмущений: магнитных бурь и магнитосферных суббурь.

Для идентификации силовых линий в магнитосфере удобно использовать экваториальное геоцентрическое расстояние до силовой линии L в единицах R_3 . В ближней к Земле области магнитосферы ($L < 5$) расположена плазмосфера Земли. Плазмосферу, заполненную холодной плазмой с энергией приблизительно в несколько десятков эВ, можно рассматривать как естественное продолжение ионосферы Земли. За пределами плазмосферы плотность плазмы резко падает. В плазмосфере и

далее до $L \sim 8$ расположены радиационные пояса Земли (см. ниже). Удаление от Земли в экваториальной области соответствует переходу по магнитной силовой линии на более высокие широты на поверхности Земли. Начиная с широт $\sim 66^\circ$ располагается авроральная зона (область полярных сияний), с которой связаны силовые линии, уходящие в плазменный слой хвоста магнитосферы (рис. 1.13).

Плазменный слой находится в окрестности экваториального сечения хвоста магнитосферы. Он образован протонами с энергией ~ 1 кэВ и плотностью $\sim 1 \text{ см}^{-3}$. Толщина плазменного слоя около $6 R_3$. Солнечный ветер из переходного слоя между головной ударной волной и магнитопаузой является наиболее вероятным источником протонов плазменного слоя. В плазменном слое, в более узкой (толщиной $\sim 1 R_3$) области, происходит резкий переход вектора магнитного поля от антисолнечного направления в южной половине хвоста магнитосферы к противоположному – в северной. Этот переход обусловлен наличием в плазменном слое тока, направленного с утра на вечер (рис. 1.13). В центральной части плазменного слоя имеется область пониженного магнитного поля, которая называется нейтральным слоем. Ток в нейтральном слое и замыкающие его токи на северной и южной половинах магнитопаузы формируют два пучка силовых линий магнитосферного поля, уходящих в ночную сторону магнитосферы. В этой области плотность плазмы примерно на порядок меньше, чем в плазменном слое.

В области, непосредственно примыкающей к магнитопаузе, расположена плазменная мантия, или высокоширотный плазменный слой. Мантия наиболее выражена на ночной стороне и на достаточных расстояниях от Земли может перекрывать значительную часть хвоста. Параметры плазмы в мантии хорошо коррелируют со свойствами плазмы по другую сторону от магнитопаузы – в переходном слое. Мантия является довольно неустойчивым образованием и иногда совсем пропадает.

В меридиональной плоскости, соответствующей полудню, при движении вдоль поверхности Земли от экватора к высоким широтам происходит резкий переход от силовой линии, расположенной в полуденной плоскости и связывающей северное и южное полушария, к "разомкнутой", или открытой силовой линии,

уходящей в ночную сторону, в хвост магнитосферы. Такая конфигурация магнитного поля говорит о том, что на некотором расстоянии от Земли ($\sim 10R_E$) вблизи магнитопаузы существует область, где силовые линии расходятся, образуя "воронку" (касп). Аналогичное образование существует и в районе южного полюса Земли. Такая воронка из силовых линий позволяет плазме переходного слоя проникать внутрь магнитосферы вдоль магнитного поля.

1.4 Радиационные пояса Земли

Внутри магнитосферы существуют зоны с повышенной плотностью частиц, в основном протонов и электронов, – **радиационные пояса Земли** (РПЗ), которые были открыты американским (Ван Аллен) и советскими (Вернов, Чудаков) учеными в 1957–1958 гг. с помощью аппаратуры на первых околоземных спутниках: Спутник-2 и Explorer-1, Explorer-2. Причиной образования РПЗ является особенность движения заряженных частиц в магнитном поле дипольного типа. Как показали теоретические расчеты Биркеланда, Штермера и Кристофилоса еще в начале XX в., в дипольном магнитном поле должны существовать области ловушек, попав в которые заряженная частица не может вырваться наружу. Рассмотрим подробнее механизм такого удержания.

В дипольном приближении магнитное поле Земли можно описать формулой

$$B(r, \lambda) = B_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda}, \quad (11)$$

где $B_0 = 0.4$ Гс – поле на поверхности Земли на линии магнитного экватора, λ – геомагнитная широта. В таком поле каждую точку можно характеризовать магнитной силовой линией и геомагнитной широтой, а также координатой L . Для описания движения частиц обычно используют двумерную систему координат (L, B) – **систему Мак Илвайна**.

Движение нерелятивистских частиц в дипольном поле представляет собой суперпозицию трех независимых движений: ларморовское вращение частицы в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, колебания вдоль силовой линии и дрейфа

вокруг Земли. В первом приближении траектория частицы выглядит в виде спирали, навитой на магнитную линию. Радиус спирали (ларморовский радиус) частицы с зарядом ze , массой m и поперечной к полю скоростью $v_{\perp}$ определяется выражением

$$\frac{zev_{\perp}B}{c} = m \frac{v_{\perp}^2}{R_L} \quad (12)$$

и равен

$$R_L = \frac{p_{\perp}}{300zB}. \quad (13)$$

Здесь $p_{\perp} = mv_{\perp}$ подставляется в эВ, B – в гауссах. Период ларморовского обращения (в секундах) для частицы массой m (в МэВ) равен

$$T_L = \frac{7 \cdot 10^{-7} \cdot m}{zB}. \quad (14)$$

При движении в слабо меняющихся магнитных полях, когда выполняются условия:

$$\begin{aligned} R_L \left| \frac{\partial B}{\partial r} \right| &\ll B, \\ T_L \left| \frac{\partial B}{\partial t} \right| &\ll B, \end{aligned} \quad (15)$$

движение можно считать адиабатичным. Такое движение сохраняет инвариантами две величины. Первым адиабатическим инвариантом является магнитный момент частицы (в ед. СГСМ):

$$\mu = \frac{2.4 \cdot 10^4 p_{\perp}^2}{mB}, \quad (16)$$

где импульс и масса подставляются в МэВ. Так как $p_{\perp} = p \sin \alpha$, где α – угол между векторами скорости частицы и локального магнитного поля (питч-угол), а магнитное поле не совершает работы, получаем, что в процессе движения

$$\frac{\sin^2 \alpha}{B} = \text{const}. \quad (17)$$

При приближении к Земле величина B растет, что согласно (17) приводит к возрастанию питч-угла. В какой-то момент угол становится больше 90° и частица начинает двигаться в обратную

сторону (рис. 1.14). Точки, в которых происходит "отражение" частицы, называются зеркальными. В принципе частица может двигаться между зеркальными точками довольно продолжительное время.

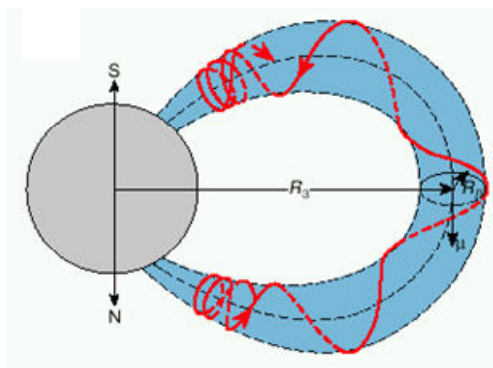


Рис. 1.14. Движение частицы между зеркальными точками

Второй адиабатический инвариант (инвариант продольного действия):

$$J = \oint p_{\parallel} \cdot dl = p \oint \sqrt{1 - B/B_{\text{отр}}} dl. \quad (18)$$

Здесь $p_{\parallel}$ — импульс, параллельный магнитному полю, $B_{\text{отр}}$ — напряженность магнитного поля в точке отражения. Интеграл берется по полному пути в течение одного колебания частицы по силовой магнитной линии.

Третья составляющая движения заряженной частицы в магнитном поле возникает из-за слабой неоднородности B . Когда частица совершает один оборот вокруг магнитной линии, она пересекает области с разной напряженностью магнитного поля — большей на внутренней части окружности и меньшей на внешней. Вследствие этого положительно заряженная частица смещается в направлении с утра на вечер (на дневной стороне), а отрицательная в обратном направлении. Это явление называется **долготным дрейфом**.

Если за время каждой осцилляции между двумя зеркальными точками значение J сохраняется и частица совершает при этом долготный дрейф, то можно считать, что она все время находится на вполне определенных силовых линиях. Совокупность этих

силовых линий составляет поверхность и называется оболочкой, которая для конкретной частицы имеет толщину, определяемую ее ларморовским радиусом. Захваченные частицы могут отличаться импульсами, питч-углами, но при этом находиться на одной оболочке, определяемой величиной (18). Совокупности оболочек и составляют радиационные пояса Земли. Исторически выделяют два радиационных пояса – внешний (электронный) и внутренний (протонный), хотя подобное разделение является упрощенным.

Радиационные пояса заполнены протонами с энергиями в несколько десятков МэВ и электронами с энергиями в десятки и сотни кэВ. Наиболее энергичные электроны образуют два пояса: внутренний на $L < 2.5$ и внешний с $L > 4$. Протоны, в основном, сосредоточены в области с $L < 3$ и не имеют четкой градации по L . С уменьшением L появляются протоны все больших энергий (рис. 1.15).

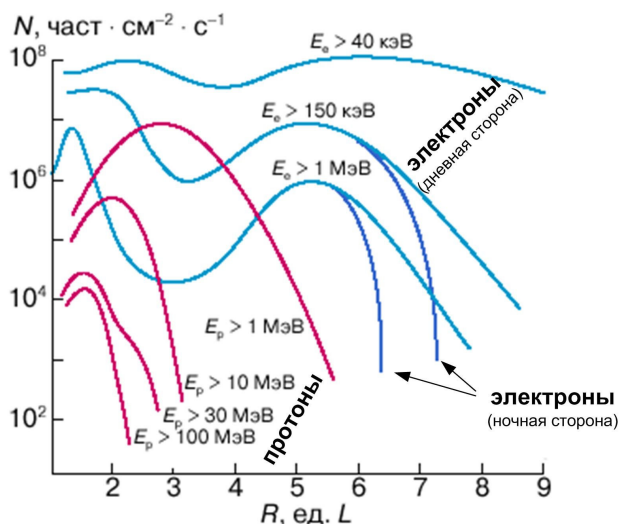


Рис. 1.15. Потоки электронов и протонов различных энергий в плоскости геомагнитного экватора:

R – расстояние от центра Земли, выраженное в радиусах Земли

Из-за смещения оси геомагнитного диполя относительно центра Земли радиационные пояса имеют неодинаковую высоту над поверхностью Земли. В зоне Бразильской магнитной аномалии

внутренний пояс опускается до высот ~ 500 км, что приводит к тому, что орбитальные станции и спутники "задевают" его при пролете над Южной Атлантикой.

Можно выделить несколько механизмов захвата частиц в радиационных поясах. Основным является распад альбедных нейтронов космических лучей. Такие нейтроны служат основным источником протонов с $E_p > 30$ МэВ. Для протонов меньших энергий существует другой процесс – захват протонов на границе замкнутых дрейфовых оболочек ($L \sim 7-8$) и дальнейшая радиальная диффузия. Источником таких протонов могут быть солнечные космические лучи или протоны солнечного ветра. Большую роль в пополнении радиационных поясов играет захват частиц из межпланетной среды при смещениях магнитопаузы во время внезапных сжатий магнитосферы солнечным ветром.

Важное значение при формировании электронного радиационного пояса имеют различные динамические процессы, протекающие во время геомагнитных возмущений, например, в ходе суббуревой активности. Во время сильных геомагнитных возмущений, вызванных воздействием на магнитосферу сильных неоднородностей солнечного ветра, могут формироваться и дополнительные радиационные пояса.

Хотя теоретически заряженная частица может находиться в магнитной ловушке неограниченно долго, на практике радиационные пояса постоянно теряют частицы. Основной причиной являются ионизационные потери при взаимодействии с атомами и ионами верхней атмосферы. Для электронов внутреннего пояса большую роль играет и кулоновское рассеяние на ядрах. Для внешнего пояса основным механизмом утечек является циклотронная неустойчивость. Быстрые потери частиц наблюдаются во время главной фазы магнитных бурь. Для протонов этот процесс связан с нарушением условий адиабатичности (15). Вопрос о причинах быстрых потерь электронов пока до конца не решен, поскольку здесь играют роль несколько возможных физических механизмов.

Частицы РПЗ представляют собой серьезную опасность для космических аппаратов на орбитах вокруг Земли, поскольку могут проникать через обшивку аппаратов и вносить заметный вклад в радиационное облучение космонавтов. В первую очередь, это

относится к протонам внутреннего пояса, из-за чего высоты орбит выбираются не выше 600 – 800 км. Другой поражающий фактор связан с потоками релятивистских электронов, способных проникать через обшивку ИСЗ и накапливаться в материалах, из-за чего внутри ИСЗ образуется объемный заряд. Кроме высокоэнергичных частиц РПЗ на всех высотах заполнен потоками заряженных частиц с низкими энергиями в десятки – тысячи эВ. Потоки этих частиц настолько велики, что способны создавать достаточно большой поверхностный заряд, неоднородно распределенный по обшивке ИСЗ. При этом возникает разность потенциалов, способная достигать десятков кВ и приводить к электрическим разрядам между различными частями ИСЗ. Все процессы крайне отрицательно сказываются на работе электронной аппаратуры ИСЗ.

1.5 Внешние оболочки атмосферы

Атмосфера Земли не имеет четкой верхней границы и прослеживается вплоть до радиационных поясов и даже дальше. Атмосфера обычно делится на несколько оболочек, причем классификации по различным критериям – температуре, физическим свойствам, химическому составу – могут пересекаться (рис. 1.16). Одна из наиболее важных оболочек, с точки зрения космической погоды, – это ионосфера.

Ионосфера представляет собой область атмосферы Земли на высотах 60–1000 км, содержащую частично ионизированную плазму. В основном ионосфера состоит из смеси газов нейтральных кислорода O_2 и азота N_2 и квазинейтральной плазмы (с примерно одинаковой концентрацией положительных и отрицательных частиц). Обычно считается, что нижняя граница ионосферы расположена на высотах 50–60 км. Таким образом, ионосфера занимает часть мезосферы и термосферы и делится на несколько областей, обозначаемых *D*, *E*, *F*, последняя подразделяется на *F1* и *F2* (рис. 1.17).

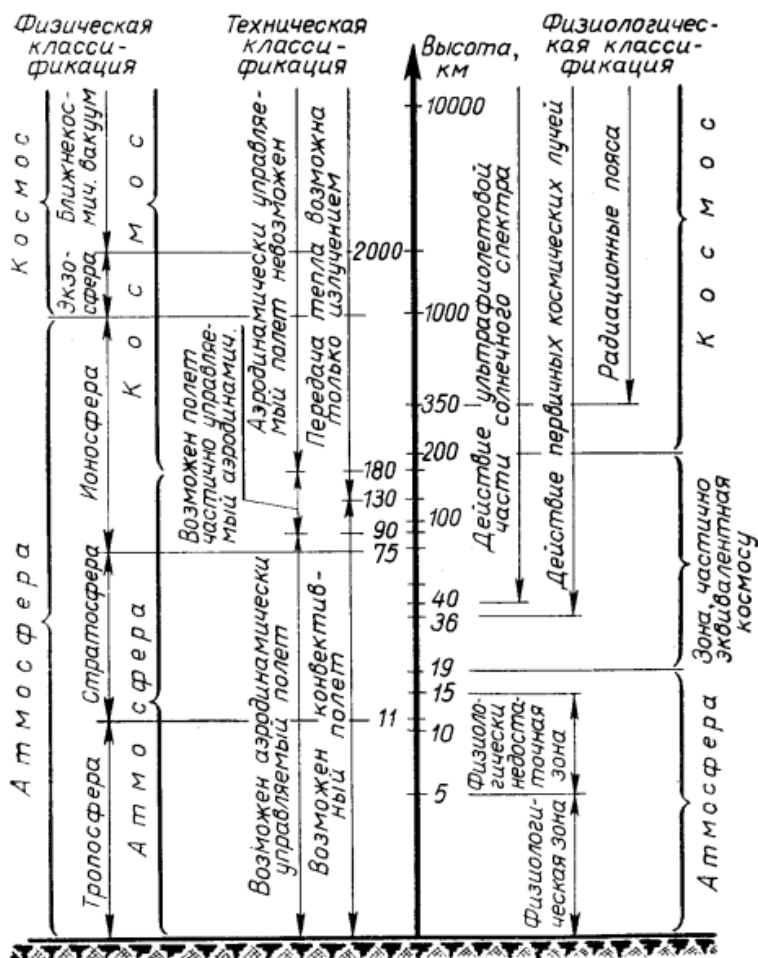


Рис. 1.16. Различные классификации атмосферных оболочек

Верхний слой F соответствует главному максимуму ионизации ионосферы. Ночью он поднимается до высот 300—400 км, а днем (преимущественно летом) раздваивается на слои F_1 и F_2 с максимумами на высотах 160—200 км и 220—320 км. На высотах 90—150 км находится область E , а ниже 90 км область D . Слоистость ионосферы обусловлена резким изменением по высоте условий ее образования.

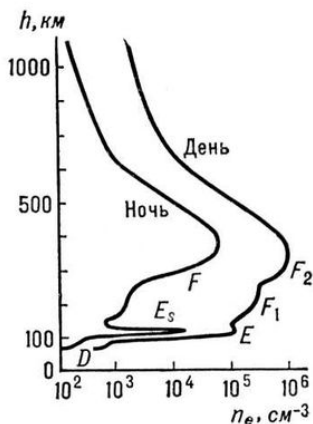


Рис. 1.17. Типичное распределение электронной концентрации в ионосфере

образует в ионосфере в области 120—200 км (но действует и выше), тогда как более длинноволновое излучение с $\lambda = 911—1038 \text{ \AA}$ вызывает ионизацию на высотах 95—115 км, т. е. в области E. Рентгеновское излучение с λ короче $85 \text{ \AA}$ вносит основной вклад в верхней части области D на высотах 85—100 км. В нижней части области D, ниже 60—70 км днем и ниже 80—90 км ночью ионизация осуществляется галактическими космическими лучами.

Ионосфера обладает свойством отражать падающие на нее радиоволны. Критическая частота, при которой возникает отражение, определяется выражением:

$$\omega_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}}. \quad (19)$$

Здесь e и m_e — заряд и масса электрона, n_e — электронная концентрация. Для слоя F2 критическая частота составляет от 5 до 10 МГц и может варьироваться в течение суток и от года к году. Свойство ионосферы полностью отражать радиоволны с частотами ниже нескольких МГц широко используется для загоризонтного радиообмена на коротких волнах. В то же время ионосфера пропускает высокочастотные сигналы, на которых обычно идет связь с космическими аппаратами.

Основным источником ионизации днем является коротковолновое излучение Солнца с длиной волны λ короче $1038 \text{ \AA}$, однако важны также галактические и солнечные космические лучи и другие источники. Каждый тип ионизирующего излучения оказывает наибольшее действие на атмосферу лишь в определённой области высот, соответствующих его проникающей способности. Так, мягкое коротковолновое излучение Солнца с $\lambda = 85—911 \text{ \AA}$ большую часть ионов

Ионосфера в большой степени пересекается с **термосферой** – атмосферной оболочкой, в которой происходит быстрый рост температуры с высотой. Термосфера простирается от высот 80 км до 800 км. За счет поглощения солнечной радиации (в основном атомарным кислородом) термосфера нагревается до сотен и тысяч градусов. При этом температура зависит от времени суток и от солнечной активности. Именно в термосфере наблюдаются полярные сияния. Здесь же, ниже радиационных поясов, проходят орбиты большинства спутников, в частности, Международной космической станции (320–380 км).

Выше ионосферы и термосферы находится **экзосфера** – область с наиболее низкой концентрацией атомов. Здесь концентрация атомов по высоте определяется их массой. На больших расстояниях от Земли (2—3 тыс. км и более) нейтральную экзосферу образуют почти исключительно атомы водорода, на более низких высотах заметную долю составляют атомы гелия, а ещё ниже — также и атомы кислорода. На высоте около 2000—3000 км экзосфера постепенно переходит в так называемый ближнекосмический вакуум, который заполнен сильно разреженными частицами межпланетного газа и пылевидными частицами кометного и метеорного происхождения. Здесь же начинается область захваченной плазмы радиационных поясов.

Верхние оболочки атмосферы чрезвычайно чувствительны к солнечной активности и магнитосферным возмущениям. Во время геомагнитных возмущений или солнечных вспышек свойства ионосферы могут существенно изменяться, что зачастую негативным образом сказывается на функционировании искусственных спутников Земли и радиосвязи. Таким образом, ионосфера играет роль одного из индикаторов космической погоды, чутко реагируя на состояние магнитосферы, потоки заряженных частиц и электромагнитное излучение. Кроме того, рентгеновское излучение, которое во время солнечных вспышек увеличивается на несколько порядков, может привести к разогреву термосферы и увеличению ее плотности на данной высоте, что необходимо учитывать при коррекции спутниковых орбит.

Задачи к разделу 1

1.1. Значение солнечной постоянной (плотности потока энергии на орбите Земли) равно 1360 Вт/м^2 . Оценить полную светимость Солнца, а также среднюю температуру его поверхности.

1.2. Температура фотосферы Солнца составляет около 6000 К , а хромосферы – порядка 10000 К . Найти длины волн, соответствующие максимуму спектра абсолютно черного тела с такими же температурами.

1.3. По данным сети Интернет построить график чисел Вольфа в одном из последних циклов солнечной активности (номер цикла задается преподавателем). Определить время максимума цикла (с точностью до месяца) и значение числа Вольфа в максимуме. Сделать заключение о мощности данного солнечного цикла.

1.4. Считая, что скорость и плотность солнечного ветра слабо зависят от гелиошироты и составляют на расстоянии 1 а.е. от Солнца 400 км/с и 5 см^{-3} соответственно, оценить потоки энергии и массы, переносимых солнечным ветром.

1.5. В рамках модели Паркера определить расстояния от Солнца, на которых в плоскости эклиптики отклонения вектора межпланетного магнитного поля от радиального направления составляют 30° , 45° , 60° .

1.6. Вычислить длину силовой линии межпланетного магнитного поля от Солнца до Земли.

1.7. Считая поток галактических космических лучей изотропным, определить плотность потока энергии, переносимой ГКЛ. Минимальную энергию ГКЛ принять равной 1 ГэВ , спектр считать степенным с показателем -2.7 .

1.8. Оценить радиус магнитосферы Земли в дипольном приближении для случаев спокойного (скорость 400 км/с) и высокоскоростного потоков солнечного ветра (скорость 700 км/с).

1.9. С помощью зависимости концентрации электронов в ионосфере от высоты, изображенной на рис. 1.17, оценить изменение критической частоты, связанное с суточным циклом для различных ионосферных слоев.

Контрольные вопросы

1. Что такое космическая погода?
2. Какова структура строения Солнца (перечислить основные параметры его оболочек)?
3. Какие основные характеристики используются при анализе солнечных циклов?
4. Что такое солнечный ветер и каковы его характерные параметры?
5. Какие положения используются в модели Паркера?
6. Как устроена магнитосфера Земли?
7. Каковы физические механизмы образования радиационных поясов Земли?
8. Опишите строение верхней атмосферы Земли и основные свойства ионосферы.

2. Основные явления космической погоды

2.1 Классификация явлений

Космическая погода изучает совокупность явлений, происходящих в системе Солнце – межпланетная среда – магнитосфера/атмосфера Земли. Соответственно, основные процессы можно разбить на три группы, в зависимости от места и характера их развития. Солнечные процессы являются источником и спусковым механизмом для процессов во внутренней гелиосфере. Гелиосферные процессы служат передаточным звеном для переноса энергии солнечных возмущений в околоземное пространство. Геомагнитные возмущения приводят к множеству процессов в магнитосфере и ионосфере. На рис. 2.1 представлена общая схема связей различных процессов космической погоды в системе Солнце–гелиосфера–Земля. Как можно видеть, эти связи весьма сложны и запутаны, что отражает многообразие и взаимозависимость явлений космической погоды

Основные солнечные возмущения связаны с активными областями на Солнце, к которым относятся пятна, группы пятен, факелы и т.д. Наиболее яркими проявлениями активности являются солнечные вспышки, однако в последнее время все больше внимания уделяется корональным выбросам массы (КВМ²) солнечного вещества в межпланетное пространство. Особую роль в процессах космической погоды играют и корональные дыры.

К гелиосферным возмущениям относятся ударные волны, вызванные как распространением сгустков солнечного вещества, образованных в процессе КВМ, так и потоками быстрого солнечного ветра. Часто солнечное вещество, выброшенное из короны, уносит с собой петлю магнитного поля, образуя локальную структуру с сильно упорядоченным магнитным полем и относительно низкой температурой плазмы – магнитное облако, которое может распространяться в гелиосфере на расстояния несколько астрономических единиц.

² В англоязычной литературе – *CME* (*coronal mass ejection*).

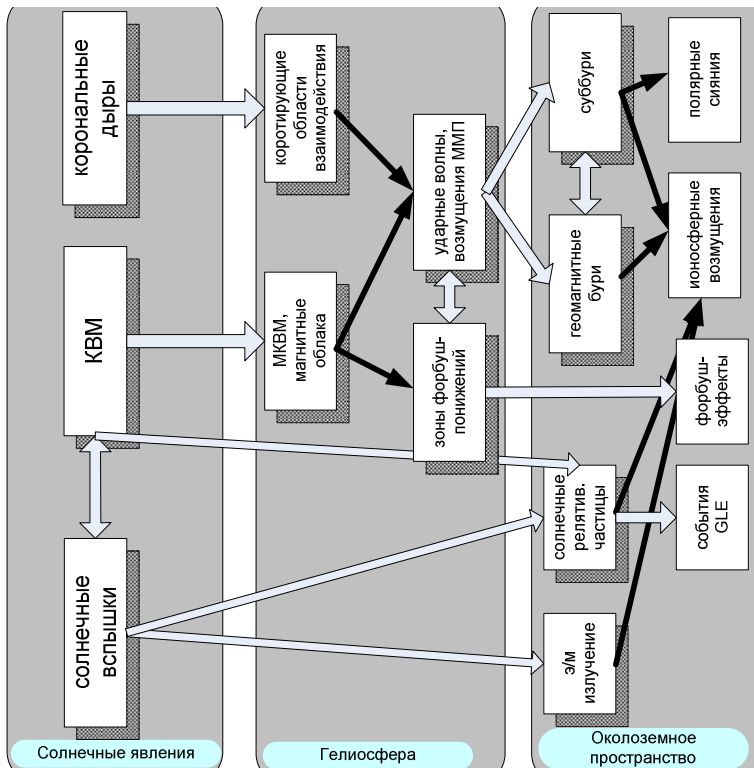


Рис. 2.1. Общая схема связей различных явлений космической погоды

Быстрые потоки солнечного ветра из корональных дыр формируют так называемые коротирующие области взаимодействия, которые приводят к повторяющимся каждые 27 дней геомагнитным возмущениям. Границы секторов межпланетного магнитного поля, представляющие собой токовый слой толщиной порядка 10^5 км, также могут рассматриваться как возмущенные области.

Наиболее существенными проявлениями воздействия гелиосферных возмущенных областей на магнитосферу являются геомагнитные бури и суббури – резкие изменения геомагнитной обстановки соответственно по всему земному шару или только в приполярных широтах.

2.2 Процессы на Солнце

Солнечная активность – спонтанное возникновение различных нестационарных образований в солнечной атмосфере, к которым относятся солнечные пятна, протуберанцы, вспышки, корональные выбросы массы и др. Часть солнечной атмосферы, где появляются такие образования, называется **активной областью**. Возникновение активной области представляет собой развитие структур на всех уровнях солнечной атмосферы и, в первую очередь, элементов структуры магнитного поля, фотосферной грануляции, ячеек хромосферной сетки, а также конденсаций плазмы в короне.

Основным механизмом выделения энергии в активной области считается преобразование энергии локального магнитного поля в энергию электромагнитного излучения и кинетическую энергию частиц солнечного вещества. Эволюция активной области представляет собой возникновение, развитие и распад концентрированного магнитного поля, заметно превышающего среднее по поверхности Солнца. Магнитный поток отдельной активной области, составляющей $\sim 10^{21}$ – 10^{23} Мкс, сравним со средним полным потоком, проходящим через атмосферу Солнца.

Наиболее известными и легче всего наблюдаемыми проявлениями солнечной активности являются солнечные пятна (рис. 2.2). Пятна редко бывают одиночными и обычно располагаются группами, занимая протяженные активные области, простирающиеся на сотни тысяч километров. Напряженность

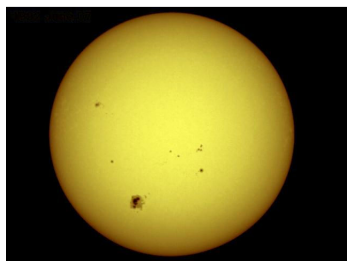


Рис. 2.2. Снимок Солнца с пятнами (НАСА, США)

магнитного поля в группах пятен может достигать значительных величин вплоть до нескольких тысяч эрстед. В обсерватории Маунт Вилсон в 1919 г. Хейлом была разработана магнитная классификация групп солнечных пятен, основанная на распределении магнитных полярностей, согласно которой

группы пятен были разделены на четыре класса: α , β , γ и δ . Класс α – униполярный; группы пятен этого класса наблюдаются на фазе окончания жизни биполярных групп, когда пятна одной из полярностей уже исчезли. Класс β – биполярный; считается, что такие пятна являются результатом выхода из глубины в фотосферу магнитной трубки, изогнутой в форме арки. Группы пятен γ являются сложными, в них полярности распределены нерегулярно, а группах класса δ наблюдается столь запутанное переплетение магнитных полей, так что нельзя выделить пятна одной или другой полярности.

Солнечные пятна в фотосфере всегда сопровождаются светлыми яркими волокнистыми образованиями – **факелами**. Факелы всегда возникают при усилениях магнитных полей и могут существовать без пятен, обычно предвеля их появление. Факел горячее соседних областей на 200–300 К и в целом слегка выступает над уровнем невозмущенной поверхности.

Одно из наиболее значительных проявлений солнечной активности – солнечные вспышки. Самые мощные вспышки видны даже в белом свете, как, например, знаменитая кэррингтоновская вспышка 1 сентября 1859 года. **Солнечная вспышка** представляет собой реакцию солнечной атмосферы (в основном хромосферы и короны) на внезапный быстрый процесс выделения магнитной энергии, который приводит к локализованному нагреву, коротковолновому электромагнитному излучению, а также к ускорению электронов, протонов и тяжелых ионов. При этом энергии солнечных космических лучей могут достигать нескольких ГэВ. Во время вспышки температура в хромосфере повышается до

10^4 К, а в короне до 10^7 К. Полная энергия, выделяющаяся во время наиболее сильных вспышек, достигает 10^{32} эрг.

Вспышка сопровождается электромагнитным излучением в широком диапазоне длин волн от жесткого рентгеновского ($\lambda \sim 10 \text{ \AA}$) до километровых радиоволн. Излучение различных длин волн генерируется в разных слоях солнечной атмосферы в активной области. Большинство вспышек наблюдается в областях с большими пятнами, сложной конфигурацией и большими градиентами магнитного поля. Однако порядка 10 % вспышек происходят между активными областями или в старых активных областях.

В оптическом диапазоне вспышки принято характеризовать баллами. Балл (класс) вспышки – оценка величины вспышки в линии H α в момент максимальной яркости. Площадь и яркость вспышки оцениваются отдельно. Площадь вспышки определяется как площадь всех участков хромосферы с повышенной яркостью в H α (рис. 2.3). Площадь выражается либо в миллионных долях площади солнечной полусферы (100 м.д.п. = $3.04 \cdot 10^8 \text{ км}^2$), либо в квадратных гелиографических градусах в центре солнечного диска (1 квадратный градус = $1.48 \cdot 10^8 \text{ км}^2$). По площади все вспышки подразделяются на пять групп следующим образом (табл. 2.1)

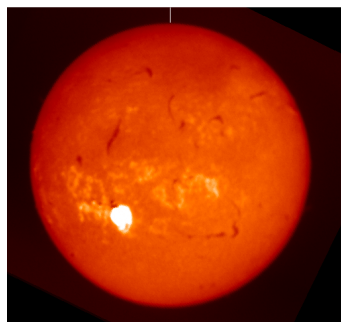


Рис. 2.3. Солнечная вспышка в линии H α

Таблица 2.1

Балл	Площадь, м.д.п.	Площадь, квадратные градусы
S	< 100	< 2.0
1	100–250	2 – 5
2	250–600	5 – 12.5
3	600–1200	12.5 – 24.7
4	> 1200	>24.7

Яркость вспышки обозначается буквами F , N и B , что соответственно означает: слабая, нормальная и яркая вспышка. Сочетание индекса площади с индексом яркости дает двойной балл или класс вспышки, например $1N$, SB .

Часто используется классификация по интенсивности вспышки в рентгеновском диапазоне. Для этого используют плотность потока рентгеновского излучения в диапазоне длин волн $0,1 - 0,8$ нм, который измеряется геостационарными спутниками серии GOES. В рентгеновском диапазоне также различают несколько уровней вспышек, самыми мощными считаются вспышки X-класса – когда плотность потока превышает 10^{-4} Вт / м². Градация классов вспышек в рентгеновском диапазоне приведена в табл. 2.2. На рис. 2.4 представлен снимок солнечного диска в рентгеновском диапазоне во время вспышки.

Таблица 2.2

Класс вспышки	Плотность потока, Вт/м ²
A	$10^{-8} - 10^{-7}$
B	$10^{-7} - 10^{-6}$
C	$10^{-6} - 10^{-5}$
M	$10^{-5} - 10^{-4}$
X	$> 10^{-4}$

Вспышки могут сопровождаться генерацией высокоэнергичных заряженных частиц (электронов, протонов, альфа-частиц) и нейтронов. Такие потоки релятивистских частиц от Солнца представляют серьезную радиационную опасность для космонавтов и даже пассажиров и экипажей самолетов во время высотных авиарейсов, особенно в приполярных областях.

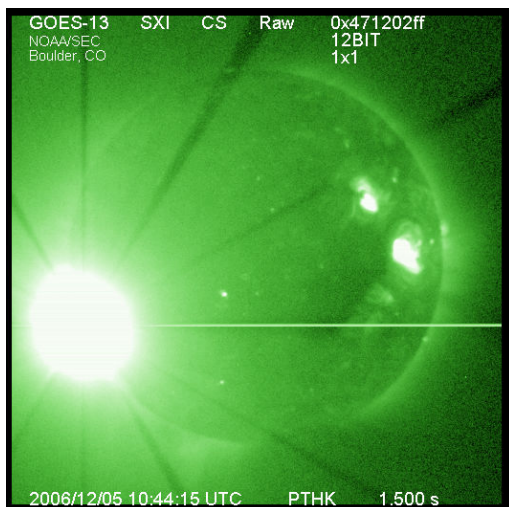


Рис. 2.4. Вспышка на Солнце 5 декабря 2006 года в рентгеновских лучах.
Данные GOES

В хромосфере и короне наиболее характерными проявлениями солнечной активности являются протуберанцы, которые представляют собой как бы облака сравнительно холодного ($T = 10^4$ К) и плотного ($n = 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$) хромосферного вещества, вынесенного или выброшенного в результате взрыва в солнечную корону до высот нескольких сотен тысяч километров. Протуберанцы часто располагаются вдоль арок магнитного поля. Возникновение, развитие и движение протуберанцев тесно связано с эволюцией солнечных пятен. Во время активной фазы протуберанец усиливает свое движение, что может привести к выбросу вещества в корону и образованию эруптивного протуберанца.

Иногда этот процесс заканчивается **корональным выбросом массы**, во время которого солнечное вещество и связанное с плазмой магнитное поле выбрасываются в межпланетное пространство. Впервые процесс выброса вещества солнечной короны наблюдался в 1971 г. у на OSO-7 (*Orbiting Solar Observatory*) и в 1973–1974 гг. на орбитальной станции Skylab с помощью коронографа белого света. Вот как определяет явление KBM Хундхаузен: "... KBM – процесс в солнечной короне,

который: 1) происходит за времена от нескольких минут до нескольких часов; 2) представляет собой появление новой, яркой, удаляющейся от Солнца структуры белого цвета в поле зрения коронографа."

Корональные выбросы наблюдаются с помощью специальных приборов – коронографов – которые позволяют выделить излучение короны и получать ее фотографии в белом свете. В настоящее время основные наблюдения ведутся с помощью коронографа *LASCO*, который находится на космическом аппарате *SOHO*. На основе анализа изображений коронографа (рис. 2.5) можно провести оценку скорости выброса, которая может достигать 1500–2000 км/с.

В зависимости от места на Солнце и направления выброса КВМ охватывает определенный угловой сектор на лимбе Солнца. Иногда этот сектор может достигать 360° , т.е. охватывать весь солнечный лимб. Возникает ощущение, что все Солнце "взорвалось". Такой ракурс означает, что выброс коронального вещества направлен прямо на наблюдателя, т.е. на Землю. Подобные события называются КВМ типа "гало" и наиболее часто вызывают различные геомагнитные возмущения (рис. 2.5б).

На сегодняшний день считается, что не солнечные вспышки, а именно гало-КВМ являются причиной наиболее мощных геомагнитных бурь. В то же время, наиболее высокоскоростные выбросы солнечного вещества в межпланетное пространство, как правило, ассоциированы с самыми мощными солнечными вспышками, и разделить их роль в различных процессах нелегко. Например, распространение КВМ в короне и медленном солнечном ветре вызывает образование ударной волны, на которой может проходить ускорение заряженных частиц, электронов, протонов и ядер до очень высоких энергий. Поэтому сейчас активно обсуждаются различные механизмы образования солнечных космических лучей, связанные с КВМ и с солнечными вспышками.

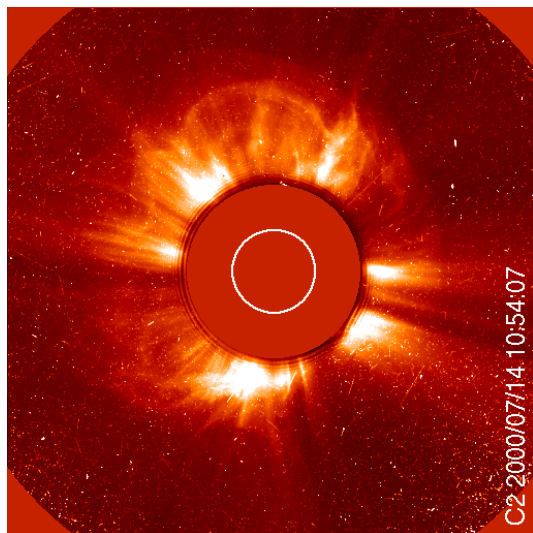
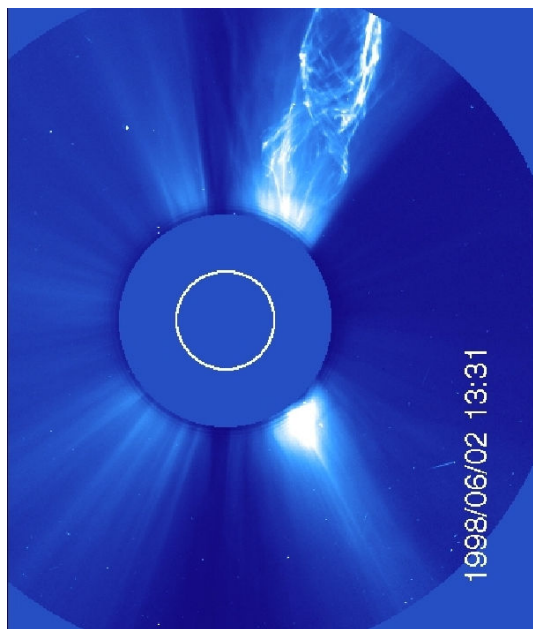


Рис. 2.5. Фотографии CME, полученные на коронографе LASCO: а) пример CME на западном лимбе Солнца;
б) CME типа “гало”

2.3 Гелиосферные явления

Различные явления, которые приводят к крупномасштабным возмущениям межпланетного магнитного поля и потока солнечного ветра, можно разделить на два типа: повторяющиеся (рекуррентные) и внезапные. К первым относятся высокоскоростные потоки солнечного ветра, которые вытекают из корональных дыр в солнечной короне, а также границы между секторами межпланетного магнитного поля. Ко вторым относятся структуры, которые являются развитием корональных выбросов массы при их распространении в межпланетном пространстве. Подобные объекты называют “межпланетные корональные выбросы” – МКВМ³. Часто такой выброс уносит петлеобразные силовые линии магнитного поля, образуя локальную область с квазирегулярным магнитным полем – магнитное облако.

Солнечный ветер часто испытывает вариации с характерным временем в несколько дней. На фоне стационарного потока со скоростью 400 км/с наблюдаются высокоскоростные потоки, в которых скорость за день-два повышается до 600–800 км/с. Последующее уменьшение скорости происходит более постепенно, при этом уменьшается и протонная температура. Плотность частиц и напряженность магнитного поля вблизи переднего края потока возрастает до очень высоких значений. За этими максимумами следуют районы разряжения, сохраняющиеся несколько дней. Высокоскоростные потоки истекают из областей короны с расходящимися линиями магнитного поля, которые связаны с корональными дырами. Кроме того, установлено, что потоки в основном униполярны или, по меньшей мере, имеют преобладающую магнитную полярность. Такие магнитные условия стабильны и существуют в течение нескольких солнечных оборотов, вследствие чего высокоскоростные потоки имеют заметную тенденцию к повторению.

Высокоскоростной поток, изогнутый по спирали вращением Солнца, будет догонять движущиеся медленнее окружающие потоки солнечного ветра и сталкиваться с ними. Высокая

³ В англоязычной литературе – *Interplanetary coronal mass ejection (ICME)*.

электрическая проводимость намагниченной плазмы препятствует взаимопроникновению различных плазменных образований, вследствие чего окружающая быстрый поток плазма с меньшей скоростью истечения сжимается и отклоняется от первоначального направления, двигаясь параллельно границе раздела. Подобным же образом быстродвижущаяся плазма будет замедлена и сжата на своем переднем крае. Так как граница раздела между двумя плазменными областями – область взаимодействия – развивается в межпланетном пространстве по направлению от Солнца, образуется система ударных волн, ограничивающих область взаимодействия: головная ударная волна, движущаяся от Солнца относительно границы раздела, и, соответственно, обратная ударная волна, движущаяся к Солнцу.

Качественно этот процесс можно описать следующим образом. Область высокого давления, связанная с высокоскоростным потоком, расширяется в обе стороны: и вперед, и назад (в системе отсчета, связанной с солнечным ветром). Расширение происходит со скоростью звука, но так как относительная скорость высокоскоростного потока относительно медленного течения является сверхзвуковой, то образуются две ударных волны: зоны скачкообразного изменения давления, скорости и плотности. При условии "вмороженности" магнитного поля в плазму резкое изменение испытывает и магнитное поле. Одна из ударных волн распространяется назад от центральной области высокоскоростного потока, другая – вперед (рис. 2.6).

Ударные волны распространяются быстрее, чем звуковые. Фактически, скорость распространения ударных волн определяется величиной прироста давления, и эта скорость как раз такова, что удерживает ударную волну от опрокидывания и разрушения. Хотя одна из двух ударных волн распространяется назад от области максимального давления, для неподвижного наблюдателя обе ударных волны двигаются наружу от Солнца. Причина этого – скорость быстрого солнечного ветра, которая больше чем скорость ударных волн.

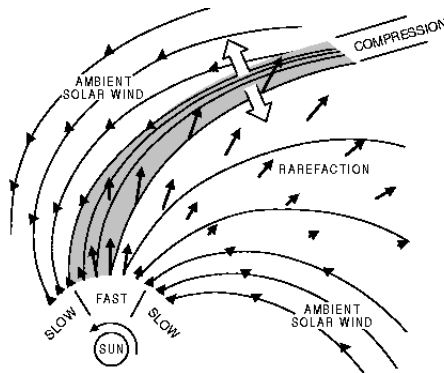


Рис. 2.6. Взаимодействие быстрого и медленного потоков солнечного ветра

Высокоскоростной поток и сопровождающие его ударные волны формируют в межпланетном пространстве так называемую **коротирующую область взаимодействия** (КОВ), которая может вращаться (*co-rotate*) вместе с Солнцем с периодом около 27 дней в течение одного или нескольких оборотов. Зона КОВ простирается от нескольких солнечных радиусов до нескольких астрономических единиц, представляя в первом приближении гигантскую ветвь архимедовой спирали. При пересечении Землей таких областей в земной магнитосфере примерно каждые 27 дней возникают рекуррентные (повторяющиеся) магнитные возмущения.

Более редким гелиосферным возмущением, но приводящим к более значительным последствиям для магнитосферы Земли, являются так называемые **межпланетные корональные выбросы масс** (МКВМ). Подобные структуры в гелиосфере развиваются из корональных выбросов масс на Солнце, когда выброшенная из короны солнечная плазма увлекает с собой силовые петли магнитного поля (рис. 2.7). Межпланетный корональный выброс представляет собой сильно магнетизированное образование, движущееся со скоростью 200–2000 км/с. При движении в солнечном ветре МКВМ может изменять свою скорость: медленные МКВМ ускоряются, в то время как быстрые – замедляются. Если скорость выброса превышает 500 км/с, то обычно перед ним образуется ударная волна, как следствие того, что в системе координат, движущейся с солнечным ветром, скорость МКВМ превышает магнитозвуковую скорость. Между

ударной волной и выброшенным в межпланетное пространство облаком солнечной плазмы образуется зона сильной турбулентности солнечного ветра и магнитного поля, которая называется оболочкой⁴.

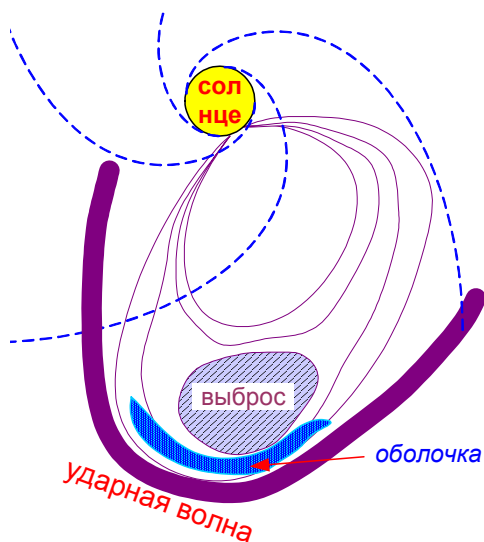


Рис. 2.7. Корональный выброс масс в межпланетном пространстве

На рис. 2.8 представлены данные спутника АСЕ, которые получены во время прохождения межпланетного выброса масс рядом с Землей. Здесь хорошо видно прохождение ударной волны, во время которого наблюдается резкий скачок плотности и скорости солнечного ветра. На рисунке можно видеть ударную волну, оболочку, которая характеризуется повышенным значением плотности и резкими вариациями магнитного поля, которые подчеркивают турбулентный характер движения плазмы в этой зоне. Далее наблюдается непосредственно выброс солнечной плазмы. Часто в нем плотность и температура плазмы ниже, чем в окружающем солнечном ветре. Если при этом наблюдается меняющееся регулярным образом магнитное поле, то такое образование называется **магнитным облаком**.

⁴ В англоязычной литературе – *sneath*.

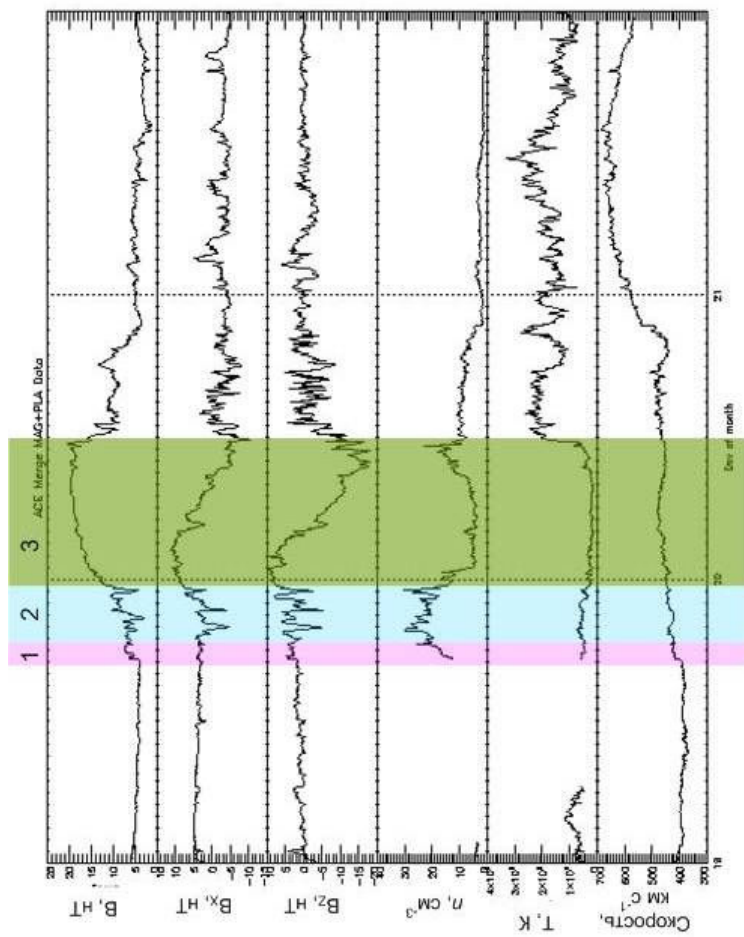


Рис. 2.8. Параметры солнечного ветра и ММП во время прохождения магнитного облака. Оттенками серого показаны: 1 – ударная волна, 2 – оболочка, 3 – выброс

На рисунке хорошо видно, что при прохождении магнитного облака флуктуации резко уменьшаются и поле становится практически регулярным. Кроме того, наблюдается еще один интересный эффект, который проявляется при сравнении поведения различных проекций вектора магнитной индукции: по мере прохождения внутренней области МКВМ направление **B** поворачивается.

При столкновении МКВМ с земной магнитосферой происходит резкое сжатие последней (почти в два раза в направлении Земля–Солнце). Наиболее существенные для геомагнитной обстановки характеристики магнитного облака – величина и знак z -компоненты магнитного поля (в системе GSM, в которой ось x направлена на Солнце, а ось z — по геомагнитному диполю). Если магнитосфера Земли несколько часов находится внутри области с большим по модулю и отрицательным значением B_z , то происходит "открытие" магнитосферы. Межпланетное поле и геомагнитное поле на дневной стороне оказываются противоположно направленными (так называемое "южное" ММП). В этом случае согласно модели Данжи (Dungey, 1961) может происходить пересоединение магнитных полей, которое приводит к переносу солнечным ветром магнитного потока (открытых силовых линий) с дневной стороны на ночную. Все это сопровождается инжекцией заряженных частиц внутрь магнитосферы и, при достаточной величине гелиосферного возмущения, к образованию кольцевого тока и развитию геомагнитной бури.

2.4 Геомагнитные возмущения

По своей природе геомагнитные возмущения можно разделить на два типа: геомагнитные бури и суббури.

Геомагнитной бурей называется сильное (десятки и сотни нТл) изменение горизонтальной составляющей геомагнитного поля, измеренного на поверхности Земли на низких широтах. Бури обычно вызываются приходом межпланетного коронального выброса с большим отрицательным значением компоненты B_z межпланетного магнитного поля. Магнитные бури

имеют следующие характерные черты: внезапное начало бури⁵, начальную фазу, главную фазу и фазу восстановления.

Внезапное увеличение H -компоненты (параллельной земной поверхности) геомагнитного поля означает начало геомагнитной бури и происходит одновременно по всей Земле. Нарастание поля начинается внезапно, но его длительность зависит от местного времени наблюдения, составляя 150 с вблизи полудня и 300 с около полуночи. Амплитуда SSC может меняться от 20 – 30 нТ в низких широтах и до сотен нТ вблизи экватора и в высоких широтах. Интервал между SSC и началом уменьшения H -компоненты поля называется **начальной фазой**. Продолжительность начальной фазы является важным параметром с теоретической точки зрения, так как внезапное начало бури означает приход ударной волны к Земле, а в течение начальной фазы Земля погружается в плазму и магнитное поле за фронтом ударной волны. Исследования показывают, что начальная фаза может продолжаться от 30 мин до нескольких часов.

Главная фаза геомагнитной бури представляет собой уменьшение H -компоненты поля на средних и низких широтах. Типичное уменьшение от 50 до 400 нТ продолжается от нескольких часов до нескольких суток и более. Объяснение уменьшения поля в главной фазе состоит в том, что пересоединение силовых линий межпланетного и геомагнитного полей приводит к проникновению новых частиц в магнитосферу или ускорения в ней плазмы до энергий порядка тысяч эВ, значительно усиливая кольцевой ток, текущий на расстоянии 3–5 R_3 . Этот кольцевой ток, который направлен с "вечера" на "утро" (то есть против вращения Земли), порождает магнитное поле, направленное противоположно геомагнитному, и таким образом ослабляет его. Главной причиной возможности пересоединения магнитных линий и развития кольцевого тока является наличие в течение достаточно длительного времени (порядка часа) большой южной компоненты межпланетного магнитного поля ($B_z < 0$). В такой конфигурации ММП оказывается связанным с геомагнитным полем и открывает возможность перекачки энергии гелиосферных возмущений внутрь магнитосферы (рис. 2.9). Проведенный

⁵ В англоязычной литературе SSC – *Storm Sudden Commencement*.

Гонсалесом и Цуратани в середине 80-х гг. анализ экспериментальных данных по геомагнитным бурям за достаточно большой период показал, что наиболее мощные бури ($Dst < 100$ нТ) вызваны большим значением южной компоненты межпланетного магнитного поля ($B_z < -10$ нТ), которое поддерживалось в течение длительного времени (более 3 часов).

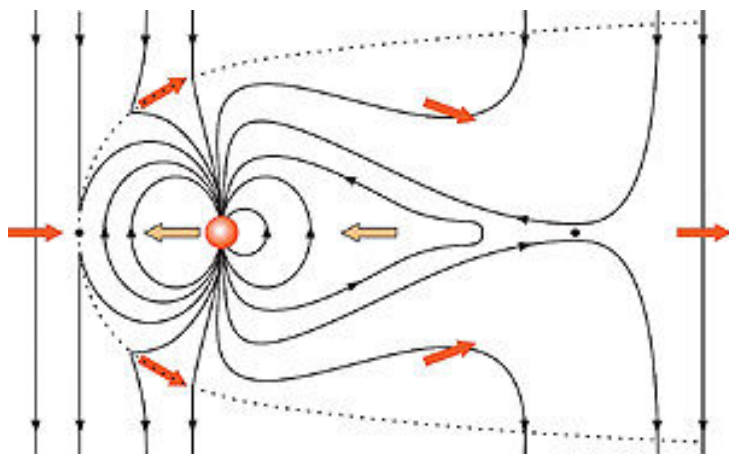


Рис. 2.9. Механизм пересоединения магнитных линий, открытия магнитосферы и развития кольцевого тока

Солнечный ветер обычно не обеспечивает подобного поведения ММП, так как в нормальных условиях вектор магнитного поля лежит в плоскости эклиптики. Однако иногда в солнечном ветре распространяются крупномасштабные возмущения: магнитные облака, корональные выбросы массы в потоках солнечного ветра. Эти возмущения изменяют условия в межпланетной среде таким образом, что появление зоны с большим отрицательным значением B_z становится возможным.

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.

Исторически исследование солнечно-земных связей развивалось таким образом, что долгое время все возмущения в солнечном

ветре и земной магнитосфере связывались с солнечными вспышками. Однако в начале 90-х гг. прошлого века Гослинг предположил, что именно корональные выбросы солнечного вещества, а не вспышки являются ключевым эффектом при развитии мощных геомагнитных бурь, межпланетных ударных волн и солнечных протонных событий. При исследовании солнечно-земных связей часто используется понятие **геоэффективности**, которое представляет собой процент событий на Солнце, приводящий к геомагнитным возмущениям. Исследования показали, что геоэффективность КВМ очень высока и для мощных геомагнитных бурь выше чем геоэффективность солнечных вспышек. Этот факт является следствием того, что в отличие от солнечных вспышек корональные выбросы, как правило, чаще приводят к образованию в межпланетном пространстве областей с отрицательным B_z .

В качестве количественной характеристики магнитной бури используется специальный геомагнитный индекс Dst , который показывает среднее отклонение значения магнитной индукции поля во время возмущения (рис. 2.10). В настоящее время этот индекс определяют по значениям H -компонент поля четырех обсерваторий: Гонолулу (США), Сан-Хуан (Пуэрто-Рико), Какиока (Япония), Херманус (ЮАР), которые равномерно распределены по долготе и не подвергаются влиянию авроральной и экваториальной электроструй, которые также могут возмущать геомагнитное поле.

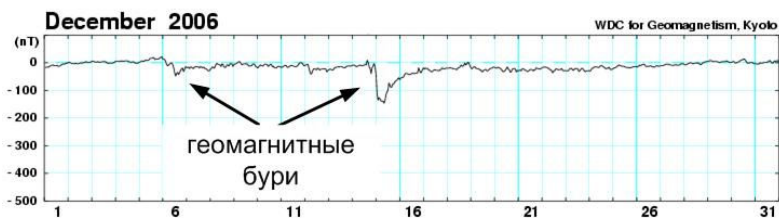


Рис. 2.10. Вариации Dst -индекса во время геомагнитных бурь 6 и 14 декабря 2006 года. Данные Всемирного центра данных по геомагнитизму, Киото

Широко распространенным индексом геомагнитной возмущенности также является планетарный индекс K_p , который выводится из K -индексов нескольких специально отобранных магнитных обсерваторий. Величина K -индекса для данной обсерватории получается из значений H -, D - и Z -компонент

магнитного поля Земли для восьми трехчасовых интервалов в течение суток. Наибольшая амплитуда в каждом интервале используется для получения K -индекса из стандартных таблиц. Такая таблица для каждой обсерватории подбирается таким образом, чтобы наибольшие и наименьшие вариации магнитного поля на данной станции были представлены значениями $K = 9$ и $K = 0$ соответственно. Таким образом, K -индекс основан на полулогарифмической шкале. Трехчасовой K_p -индекс получается усреднением K -индексов, измеренных на 12 обсерваториях.

Другим часто используемым индексом является A_p -индекс. Это линейный индекс, получаемый из каждого трехчасового планетарного индекса K_p . Преобразование K_p в A_p проводится таким образом, чтобы на 50° дипольной магнитной широты A_p приблизительно представлял максимальную амплитуду возмущенности наибольшего из трех элементов H , D и Z в единицах 2 нТ. Индекс A_p меняется в пределах от 0 до 400.

Термин **суббуря**⁶ был введен в 1961 г. американским физиком С.-И. Акасофу для обозначения авроральных возмущений в зоне полярных сияний длительностью порядка часа. В магнитных данных еще раньше были выделены возмущения, совпадающие по времени с суббурей в полярных сияниях. Со временем термин "магнитосферная суббуря" объединил большую совокупность процессов в магнитосфере и ионосфере.

Часто суббури происходят вследствие прохождения Земли через КОВ. Общим источником магнитосферных возмущений и полярных сияний на активной фазе суббури является высыпание в атмосферу авроральных электронов, которые ускорены в электрических полях магнитосферы. Высыпание частиц создает специфические условия в ионосфере. Ионосферные станции перестают принимать отраженные сигналы, наступает так называемый блэкаут – полное экранирование на частотах 1–5 МГц. Специальные приборы, риометры, измеряющие поглощение космического радишума на частотах 25–30 МГц, в этот момент регистрируют всплески поглощения. Причиной этого является повышенная ионизация в нижнем D -слое ионосферы.

⁶ В англоязычной литературе – *substorm*.

Основным механизмом ускорения и высыпания частиц (в первую очередь, кэВ-ных электронов) является смена токовых систем в хвостовой и авроральных частях магнитосферы во время развития суббури. Измерения показывают, что во время подготовительной фазы в хвостовой токовой системе возникает разрыв, из-за чего токовая система перестраивается и замыкается через ионосферу (рис. 2.11). При этом происходит ускорение и сброс в ионосферу авроральных электронов из зоны квазизахвата и из хвостовой зоны магнитосферы. Существование трехмерных токовых систем в магнитосфере было предсказано норвежским ученым Биркеландом. Измерения на спутниках подтвердили догадку норвежского исследователя.

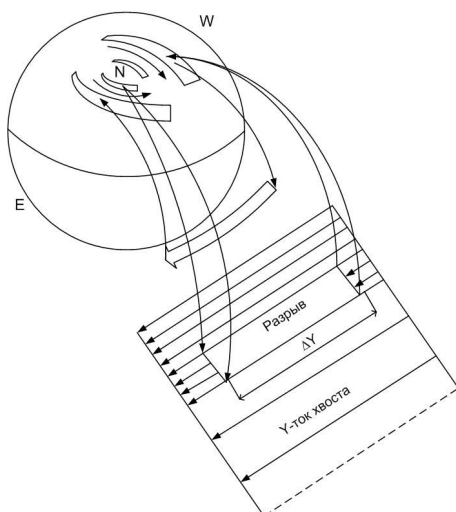


Рис. 2.11. Токовая система во время развития суббури

Высыпание частиц (в основном электронов с энергиями 1–100 кэВ) в ионосферу на высоты 80–150 км приводит к их интенсивному взаимодействию с атомами и молекулами термосферы. В результате этих столкновений происходит возбуждение атомных или молекулярных энергетических уровней. Возбуждение снимается, как правило, испусканием фотонов или в столкновениях с другими атомами или молекулами. Свечение большинства полярных сияний, которое имеет красный или зеленый цвета, вызвано атомарным кислородом. Молекулы и ионы

азота формируют либо темно-красные (менее энергичные фотоны ближе к инфракрасной области), либо ярко-голубые/фиолетовые полярные сияния. Богатые комбинации расцветок, вызванные излучением возбужденных атомов и молекул атмосферных газов, образуют одно из красивейших явлений природы (рис. 2.12).



Рис. 2.12. Полярные сияния – одно из красивейших явлений природы

Согласно принятой классификации, формы полярных сияний делятся на три группы: лентообразные, диффузные и лучи. К **лентообразным** относятся дуги и полосы. Они характеризуются непрерывной нижней границей; такие сияния простираются в направлении восток-запад на несколько тысяч километров, а по вертикали – на несколько сотен километров, хотя сама лента имеет ширину всего несколько сотен метров. **Диффузные сияния** имеют вид пятен с нечеткими границами и вид вуалей. **Лучи** представляют собой узкие пучки света, расположенные в пространстве вдоль силовых линий магнитного поля Земли, и подразделяются на три группы в зависимости от их длины: короткие, средние и длинные. Могут наблюдаться пучки лучей, расположенных тесно около друг друга либо разбросанных.

Полярные сияния классифицируются также по их активности (изменчивости) и яркости, которая определяется по самой интенсивной линии полярного сияния (557.7 нм), принадлежащей атомарному кислороду. Единицей измерения интенсивности служит релей (R). Один релей соответствует эмиссии 10^6 квантов, испускаемых в одну секунду в столбе атмосферы сечением 1 см^2 .

Элементарная изолированная суббуря обычно представляется последовательностью трех фаз: фазой роста, активной и фазой восстановления, во время которых происходят формирование, развитие и затухание как возмущений магнитного поля в высоких широтах, так и интенсивности полярных сияний. В активной фазе выделяют момент начала (*onset*) и фазу расширения, или экспансии, которая заканчивается, как только в процессе расширения активности к полюсу достигается максимальная широта.

Подготовительная фаза, как правило, начинается с поворота вектора межпланетного магнитного поля в околоземном пространстве к югу, что усиливает поступление энергии в магнитосферу. Определяющая роль в этом отводится крупномасштабному электрическому полю, направленному с утра на вечер поперек хвоста и авроральной магнитосфере. Подготовительная фаза хорошо прослеживается по спутниковым наблюдениям приполярных районов земного шара – время от времени на севере возникают движущиеся к югу диффузные дуги (рис. 2.13). Длительность подготовительной фазы обычно около одного часа.

Фаза экспансии является наиболее ярко выраженным процессом активной фазы. Она проявляется в форме движения зоны активных сияний к полюсу. Это может быть плавным движением дуги или ее сегментов или скачкообразным, с образованием новых активных форм ближе к полюсу (рис. 2.13). Расширение активной области на запад и на восток происходит по-разному: на западном направлении в активной зоне формируется выступ с резкой границей северно-южного фронта сияний. Не все возмущения приводят к экспансии, но причины этого неясны. С прекращением экспансии активная фаза не заканчивается: полярные сияния, может быть не такие яркие, как в начале, продолжают возникать и двигаться по небу.

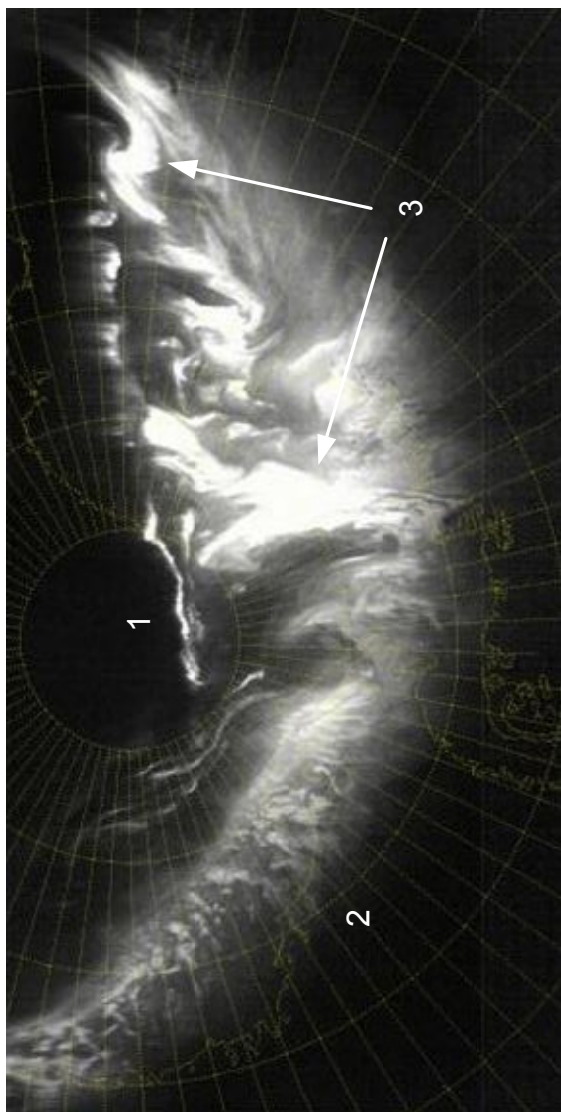


Рис. 2.13. Картина полярных сияний по измерениям на спутнике DMSP: 1 – приполюсная дуга; 2 – диффузные формы; 3 – активные сияния

Во время магнитосферных суббурь в высоких широтах происходят возмущения геомагнитного поля (горизонтальной компоненты) с амплитудой в несколько сотен нТл и длительностью около 1 ч, наблюдаемые на поверхности Земли на высоких геомагнитных широтах (более 70°). Для описания суббуревой активности используется целый набор геомагнитных индексов: AL (наибольшая отрицательная вариация магнитного поля, в нанотеслах), AU (наибольшая положительная вариация магнитного поля), AE (разность AL и AU).

Суббури в некотором смысле являются элементарным процессом, связанным с накоплением и сбросом магнитной энергии в хвосте магнитосферы. Они сопровождают геомагнитные бури, но могут проходить и на фоне обычных условий межпланетной среды. В целом суббури характеризуются более низкой энергетикой (до 10^{15} Дж), нежели геомагнитные бури ($10^{16} - 10^{18}$ Дж). Следует заметить, что хотя суббури являются неотъемлемыми спутниками магнитных бурь, однако интенсивность и длительность суббуревой активности имеет неоднозначную связь с мощностью магнитной бури. Несомненным проявлением такой связи является непосредственное влияние мощности геомагнитной бури на минимальную геомагнитную широту, на которой развиваются суббури, что приводит, например, к наблюдению полярных сияний на средних широтах.

2.5 Возмущения в ионосфере

Ионосфера является одним из наиболее восприимчивых объектов по отношению к солнечной активности. Причем, возмущения в ионосфере обычно опережают магнитосферные, так как ионосфера крайне чувствительна как к электромагнитному излучению солнечных вспышек, так и к потокам солнечных космических лучей, ускоренных в активных областях на Солнце. Так как эти излучения распространяются либо со световой скоростью, либо со скоростями близкими к световой, то уже через несколько минут после вспышки в ионосфере начинают наблюдаться различные ответные реакции.

Влияние солнечных космических лучей, ускоренных во время вспышек, наиболее велико в приполярных областях, в которых магнитные силовые линии открыты, и заряженные частицы могут

легко проникать в атмосферу. Нижняя граница проникновения космических лучей сильно зависит от типа частиц и их энергии. Прямое проникновение солнечных протонов в ионосферу возможно только в случае мощных вспышек, когда энергии частиц могут достигать значений 1–10 ГэВ и выше. Обычно солнечные космические лучи проникают сначала в магнитосферу и потом различными путями попадают в атмосферу Земли. Например, низкоэнергетичные частицы (в основном электроны с энергией 1–100 кэВ) проникают в верхнюю атмосферу из магнитосферного плазменного слоя. Именно они вызывают полярные сияния на высотах 80–150 км. Во время сильных геомагнитных возмущений заряженные частицы могут ускоряться в радиационных поясах и в авроральной зоне (на широтах 70°–75°) проникать в термосферу, мезосферу и даже в стратосферу. Такие явления называются **"высыпанием"** частиц.

Увеличение потоков заряженных частиц в ионосфере может привести к возрастанию скорости ионизации на несколько порядков до значений 10^2 – 10^4 см⁻³ с⁻¹, при том, что в нормальных условиях эта величина порядка 10 см⁻³ с⁻¹. Это приводит к резкому возрастанию плотности электронов и ионов и может сопровождаться резким поглощением радиоволн в приполярных областях.

Как известно, во время солнечных вспышек наиболее сильные вариации интенсивности потока происходят в рентгеновском диапазоне электромагнитного спектра. При этом происходят значительные искажения и аномалии в распространении радиосигналов, которые обусловлены реакцией атмосферы на резкое возрастание плотности потока коротковолнового излучения от Солнца. Эти возмущения, которые носят внезапный, импульсный характер, известны под общим названием **"внезапные атмосферные возмущения"**⁷. Различают несколько типов SID, отражающих различные аномалии в распространении радиосигналов.

1. Коротковолновое затухание. На частотах выше 500 кГц эффект появляется как поглощение или подавление сигнала. Сильные солнечные вспышки могут вызвать полное поглощение

⁷ Более распространен англоязычный термин *SID* – *Sudden Ionospheric Disturbances*.

("блэк-аут") и прекращение всей дальней коротковолновой радиосвязи.

2. Внезапное усиление атмосфериков (радишума от электрических сигналов, создаваемых радиоволнами, излучаемых разрядами молний). Это низкочастотное явление вызвано усилением *D*-слоя для низких частот, что приводит к увеличению амплитуды естественного радишума.

3. Внезапное поглощение космического радишума. Снижение интенсивности радиоволн от внеземных источников также вызвано усилением способности *D*-слоя отражать радиоволны, на этот раз обратно в космическое пространство. Этот эффект непрерывно и систематически наблюдается мировой сетью станций, оснащенных риометрами (измерителями относительной непрозрачности).

4. Различного рода фазовые возмущения в радиосигналах, в частности девиация (отклонения от несущего значения) частот в мегагерцовом диапазоне. Эффект вызван изменением коэффициента преломления радиоволн в областях *E* и *F*.

Следует также отметить, что поглощение коротковолнового солнечного излучения во время солнечных вспышек приводит к существенному разогреванию верхней атмосферы и, как следствие, к ее расширению. Этот эффект вызывает увеличение плотности атмосферы на высотах более 100 км и сопровождается возрастанием силы трения для спутников на низких орбитах. Кроме этого, возрастание концентрации ионов приводит к дополнительному взаимодействию между ионными и нейтральными компонентами, которое приводит к возрастанию скорости образования окислов азота и водорода (NO и OH). Эти соединения разрушают озон в каталитических реакциях, что ведет к изменению широтных температурных контрастов и, как следствие, к изменению режима циркуляции атмосферы.

Задачи к разделу 2

2.1. Площадь вспышки на снимке Солнца в линии Na составляет 125, 330, 1100 м.д.п. Определить балл вспышки. Перевести площадь вспышки в квадратные градусы.

2.2. Для нескольких мощных вспышек последнего солнечного цикла (даты задаются преподавателем) найти в сети Интернет данные спутника GOES и определить по ним класс каждой вспышки.

2.3. Определить время прилета на Землю солнечных релятивистских частиц с кинетической энергией 500 МэВ, считая, что эти частицы: а) электроны; б) протоны; в) нейтроны.

2.4. Разница между началом солнечной вспышки, зафиксированной по данным околоземных КА, и временем прихода солнечных протонов различных энергий составило 2, 10 и 30 минут. Считая, что протоны ускорились одновременно с началом испускания рентгеновского излучения, определить характерные энергии протонов.

2.5. Временные промежутки между приходом на Землю рентгеновского излучения, потока солнечных нейтронов и солнечных протонов составили 5 и 20 мин соответственно. Найти характерные энергии протонов и нейтронов.

2.6. По данным коронографа KBM произошло 30 декабря в 09:00 универсального времени (UT) и его скорость составила 1000 км/с. Считая, что выброс распространяется в межпланетном пространстве вдоль магнитной силовой линии, определить ожидаемое время его прихода к Земле. Какой вывод можно сделать, если приход зафиксирован на три часа раньше ожидаемого?

2.7. Оценить значение силы кольцевого тока, если Dst -индекс в максимуме главной фазы геомагнитной бури составил 300 нТл.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные проявления солнечной активности.
2. Что такое корональный выброс масс, его типы и способы его исследования?
3. Назовите основные виды гелиосферных возмущений, поясните механизмы их формирования.
4. В чем сходство и различия между межпланетным корональным выбросом и магнитным облаком?
5. Перечислите основные фазы геомагнитных бурь.
6. Какая связь между суббурями и полярными сияниями?
7. Назовите основные проявления ионосферных возмущений.

3. Влияние процессов космической погоды

Совокупность различных динамических процессов на Солнце, в гелиосфере и непосредственно в околоземном пространстве вызывает целый комплекс различных последствий для космических аппаратов (КА), средств связи, наземных энергетических и других технологических систем, здоровья космонавтов и людей на Земле. В основном эти последствия связаны с резкими изменениями параметров окружающей среды и носят негативный характер. Среди факторов, которые могут привести к особо негативным последствиям, можно выделить следующие: солнечные частицы высоких энергий, солнечное электромагнитное излучение, геомагнитные бури, суббури, потоки заряженных частиц в магнитосфере и другие.

3.1 Факторы космического пространства

Общее представление о негативном влиянии различных физических процессов и явлений на космические аппараты дает табл. 3.1, в левом столбце которой указаны названия воздействующих факторов и их основные параметры. В среднем столбце указаны физические источники или области локализации этих факторов, а в правом – возникающие эффекты. В нижней части таблицы выделены вторичные (индуцированные) явления. Особенность факторов этой группы заключается в том, что они возникают в результате воздействия космической среды на КА, но каждый из них имеет собственные характеристики и физические механизмы воздействия на материалы и оборудование.

Таблица 3.1

Факторы космического пространства	Источники и области локализации	Эффекты
Поток нейтральных атомов $F \sim 10^{18} - 10^{20} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ Вакуум $P \sim 10^{-4} - 10^{-11} \text{ Па}$	Верхняя атмосфера Земли, межпланетное пространство	Сублимация материалов, эрозия
Электромагнитное солнечное излучение $F \sim 1.4 \cdot 10^3 \text{ Дж м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Межпланетное и околоземное пространство	Усиление потерь массы, изменение свойств материалов, нагрев
Холодная плазма $T \sim 10^3 - 10^5 \text{ К}$ $n \sim 10^6 - 10^{12} \text{ м}^{-3}$	Ионосфера и плазмосфера Земли	Заряжение материалов (до 10 В), токи утечки, свечение в окрестности КА
Горячая магнитосферная плазма $T \sim 10^3 - 10^5 \text{ эВ}$ $n \sim 10^6 \text{ м}^{-3}$	Магнитосфера Земли: область геостационарной орбиты, плазменный слой, авроральные области	Заряжение материалов (до 30 кВ), радиационные эффекты
Электроны и ионы РПЗ $E \sim 0.1 - 30 \text{ МэВ}$ $F \sim 10^8 - 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Область радиационных поясов	Значительные радиационные эффекты
Протоны солнечных вспышек $E \sim 1 - 10^4 \text{ МэВ}$ $F \sim 10^7 - 10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Солнечные космические лучи. Межпланетное и околоземное пространство, верхняя атмосфера (до высот 10-20 км)	Радиационные эффекты
Космические лучи высоких энергий $E \sim 10^3 - 10^9 \text{ МэВ}$ $F \sim 10^{-8} - 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Галактические космические лучи. Межпланетное и околоземное пространство, верхняя атмосфера (до высот 10-20 км)	Локальные радиационные повреждения, сбои в элементах микроэлектроники, световые вспышки
Вторичные (индуцированные) факторы:	Поверхности КА и его внутренние отсеки	
● электризация КА ($\varphi \sim 0,1 - 10^4 \text{ В}$)		Электрические разряды, электромагнитные помехи, разрушение элементов оборудования и конструкции
● объемный заряд в диэлектриках		

Степень влияния различных факторов на работоспособность космического аппарата в значительной степени определяется параметрами его орбиты. Примеры характерных орбит, используемых в практике космонавтики, приведены в табл. 3.2.

На материалы внешней поверхности космических аппаратов, функционирующих в интервале высот 200–1000 км, существенное влияние может оказывать поток атомарного кислорода верхней атмосферы Земли. На эти же высоты в полярных орбитах могут проникать потоки авроральных частиц, а также галактических, солнечных космических лучей и частиц, захваченных в радиационных поясах.

Таблица 3.2

Орбита	Высота, км	Наклонение, градусы
Орбита МКС	400	51.6
Орбита станции "Мир"	350	51.6
Полярная орбита	600–800	80–90
Геостационарная орбита	35 790	0
Орбита спутников системы ГЛОНАСС	19 100	64.8
Высокоэллиптическая орбита спутников типа "Молния-1"	500/39 660	65

Для космических аппаратов с высокими орбитами (3000 – 20000 км) частицы РПЗ становятся одним из главных воздействующих факторов. За пределами магнитосферы Земли на КА воздействуют неослабленные потоки частиц СКЛ и ГКЛ, а также плазма солнечного ветра.

3.2 Солнечные космические лучи

Потоки солнечных частиц высоких энергий, образующиеся во время солнечных вспышек или в процессах ускорения на ударных волнах КВМ, являются одним из основных источников радиации в космосе. Эти потоки имеют большую интенсивность, в сотни и тысячи раз превышающую фоновые значения для галактических космических лучей, и энергии до нескольких ГэВ.

На рис. 3.1 приведены результаты измерения потока протонов различных энергий с помощью детекторов на геостационарном спутнике GOES. Хорошо видно, что утром 13 декабря 2006 г. потоки протонов различных энергий в околоземном пространстве возросли на несколько порядков.

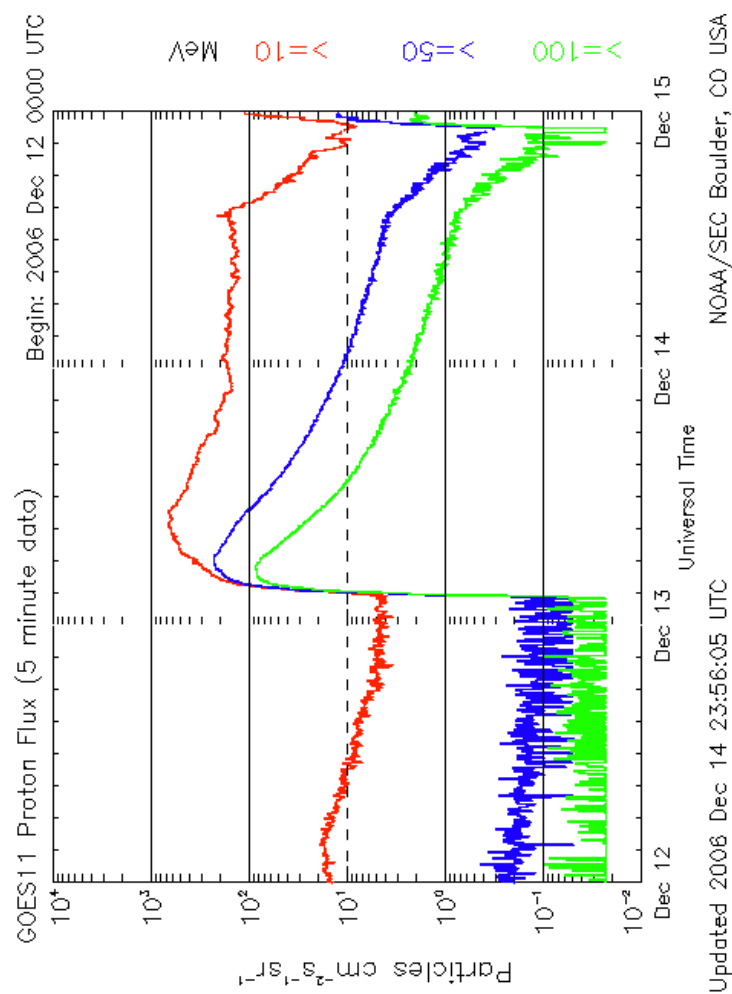


Рис. 3.1. Солнечное протонное событие 13 декабря 2006 года

Такие интенсивные потоки проникающего излучения не лучшим образом сказываются на работе электронных приборов на спутниках и орбитальных станциях, вызывая функциональные сбои. В западной литературе их обычно называют SSE (*Single Events Effects*) – эффекты одиночных сбоев (рис. 3.2). Кроме этого, оказываются сильно зашумлены оптические полупроводниковые приборы, обычно используемые для ориентации спутников по звездам, что приводит к потере ориентации, дополнительным топливным затратам на коррекцию, а при отсутствии топливных резервов – к выходу спутника из строя или сходу с орбиты.

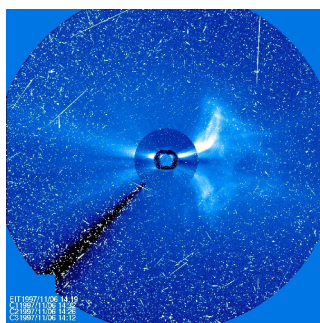


Рис. 3.2. Зашумливание оптической матрицы, вызванное попаданием энергичных заряженных частиц

Солнечные космические лучи могут нести значительную радиационную опасность. В результате поглощения ионизирующих излучений в материалах протекают процессы, приводящие к изменениям их первоначальных свойств. Кроме того, радиация крайне опасна и для экипажей космических кораблей и орбитальных станций, особенно в тех случаях, когда космонавт проводит работы в открытом космосе вне

защитной обшивки станции. Такой случай произошел в декабре 2006 г., когда во время работ на Международной космической станции, произошла серия мощных солнечных вспышек, вынудивших НАСА спешно свернуть работы.

Здесь стоит напомнить систему единиц измерения ионизирующих излучений. Действие ионизирующих излучений представляет собой сложный процесс. Эффект облучения зависит от величины поглощенной дозы, ее мощности, вида излучения, объема облучения тканей и органов. Для его количественной оценки введены специальные единицы, которые делятся на внесистемные и единицы в системе СИ. Сейчас используются преимущественно единицы системы СИ. Ниже в табл. 3.3 дан перечень основных единиц измерения радиологических величин и проведено сравнение единиц системы СИ и внесистемных единиц.

Таблица 3.3

Величина	Наименования и обозначения единиц измерения		Соотношения между единицами
	СИ	Внесистемные	
Экспозиционная доза	Кулон/кг	Рентген (Р)	$1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ $1 \text{ Кл/кг} = 3.88 \cdot 10^3 \text{ Р}$
Поглощенная доза	Грей	рад	$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$ $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$
Эквивалентная доза	Зиверт (Зв)	бэр	$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$

Экспозиционная доза соответствует ионизации (в первую очередь воздуха), в то время как поглощенная доза определяет величину энергии, поглощенную в веществе. Эквивалентная доза учитывает относительный эффект, который оказывает различные типы излучений на живые организмы.

Опасность солнечных космических лучей состоит также в том, что они не имеют постоянного потока, а приходят к Земле внезапно. При этом суммарные поглощенные дозы от солнечных космических лучей за год активного Солнца составляют 10–100 Гр, в то время как эффект от галактических космических лучей составляет менее 10 Гр в год. Одно из недавних солнечных протонных событий вызвало существенное увеличение величины эквивалентной дозы в приполярных районах (рис. 3.3), которое в максимуме достигло уровня 50 мкЗв/час, хотя опасным считается уровень около 1 мкЗв/час. Таким образом, в течение нескольких минут организм может получить несколько процентов от предельной годовой дозы.

Особую опасность солнечные протонные события несут для пассажиров и экипажей авиалайнеров, рейсы которых проходят в полярных широтах. Эти области подвергаются бомбардировке более интенсивных потоков космического излучения, и в них вероятность оказаться в зоне радиационного облучения, вызванного потоком солнечных протонов, гораздо выше, чем для пассажиров или экипажей на рейсах в более низких широтах.

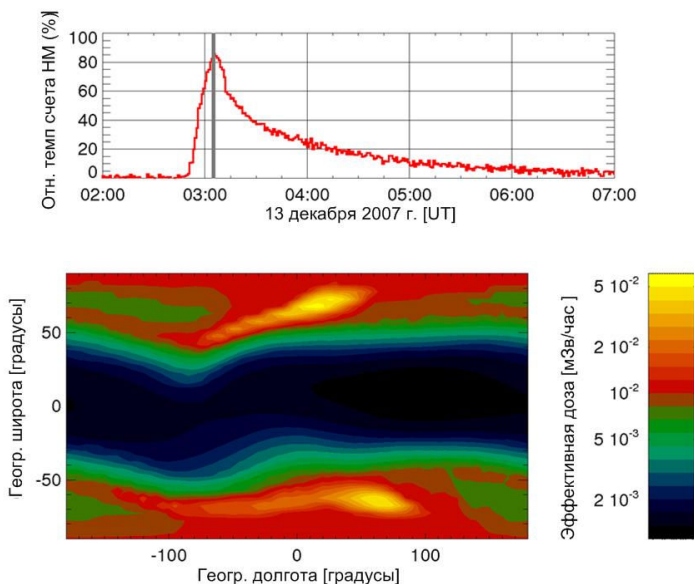


Рис. 3.3. На верхнем графике – интенсивность космических лучей по данным нейтронных мониторов. На нижнем – распределение радиационного уровня от солнечного протонного события по земному шару

3.3 Электромагнитное излучение

Солнце постоянно излучает в широком электромагнитном диапазоне как абсолютно черное тело с температурой 6000 К. Излучение в наиболее опасной части спектра – рентгеновской и гамма – ничтожно во время спокойного Солнца. Во время солнечных вспышек потоки жесткого электромагнитного излучения возрастают на много порядков (до ста тысяч раз), что приводит к сильному разогреву и ионизации атомов атмосферы. Оба этих процесса по-своему приводят к серьезным проблемам, которые несут опасность для космических аппаратов.

В результате разогрева под воздействием электромагнитного излучения ионосфера расширяется, т.е. ее плотность на фиксированной высоте увеличивается. Это представляет серьезную опасность для низковысотных ИСЗ и пилотируемых орбитальных станций, поскольку, попадая в плотные слои атмосферы, космический аппарат теряет скорость и соответственно высоту. Такая участь, например, постигла американскую космическую

станцию Skylab, на которой из-за ошибки прогноза максимума 21-го солнечного цикла не хватило топлива для коррекции орбиты, что привело к преждевременному сходу с орбиты.

Другая проблема связана с сильной ионизацией внешней области атмосферы вследствие прихода электромагнитного ионизирующего излучения. При этом резко изменяются условия прохождения радиосигналов через ионосферу и отражения от нее, в результате чего нарушается радиосвязь как со спутниками, так и на Земле. Следует отметить, что потеря радиосвязи со спутником во время маневрирования приводит к его утрате. Известно также несколько примеров, когда посадка авиалайнеров затруднялась из-за проблем со связью с Землей.

3.4 Геомагнитные бури

Геомагнитное поле является одним из важнейших свойств Земли, как планеты, и определяет базовые условия в околоземном пространстве. Естественно, что любые изменения величины или конфигурации геомагнитного поля инициирует многочисленные вторичные процессы, которые, как правило, приводят к негативным последствиям. В первую очередь, это сказывается на состоянии ионосферы, которая насыщена заряженными частицами. Вариации плотностей ионов и электронов в ионосфере приводит к ухудшению и перебоям радиосвязи, особенно во время главной фазы магнитной бури.

Вторым негативным фактором, связанным с геомагнитными бурями, является потеря ориентации спутниками, навигация которых осуществляется именно по геомагнитному полю. Далее, в результате глобальной перестройки геомагнитного поля и возмущения магнитосферы условия проникновения в околоземное пространство энергичных частиц солнечного или галактического происхождения улучшаются, в результате их потоки могут существенно возрасти. Это, в свою очередь, ведет к увеличению числа сбоев в бортовой электронике и росту дозовых радиационных нагрузок как на орбитальных станциях, так и на борту высотных авиалайнеров, чьи трассы проходят в области высоких и средних широт. Особенно опасно сочетание начала магнитной бури с приходом солнечных космических лучей от мощной вспышки на Солнце, как, например, в период последнего

солнечного максимума 6-7 апреля и 14-15 июля 2000 года. Во время этих магнитных бурь мощные потоки СКЛ проникли в магнитосферу и атмосферу Земли вплоть до средних широт (Вашингтон), на которых наблюдалось красное свечение ночного неба, вызванное вторжением в атмосферу энергичных протонов.

Возмущения геомагнитной обстановки могут значительно сместить границы радиационных поясов Земли, в результате чего под их воздействием окажутся космические аппараты, не обладающие достаточной защитой от вредного воздействия электронов и протонов РПЗ. Наконец, во время очень мощных геомагнитных бурь может произойти прямой заброс заряженных частиц из межпланетной среды внутрь магнитосферы и их последующий захват в магнитной ловушке, что приводит к образованию нового радиационного пояса, который может просуществовать несколько месяцев и существенно увеличить радиационные нагрузки на ИСЗ и на экипаж пилотируемых орбитальных станций. Такой процесс наблюдался, например, 24 марта 1991 г. Образованный дополнительный РПЗ просуществовал до сентября 1991 года, в результате чего радиационная дозовая нагрузка на станции «Мир» возросла в несколько раз.

Радиационные пояса вообще являются одним из наиболее поражающих факторов, особенно для космических аппаратов с высокими орбитами (~ 3000 – 20000 км). Для низких орбит, с относительно малым наклоном, например для орбиты Международной космической станции, наиболее опасным, с точки зрения радиационного воздействия на КА, является участок пересечения Южно-Атлантической (Бразильской) магнитной аномалии, где из-за ослабления геомагнитного поля нижняя граница РПЗ значительно опускается.

3.5 Суббури

Суббури являются, пожалуй, наиболее мощным источником электронов во внешней магнитосфере. Сильно возрастают потоки низкоэнергетичных электронов, что приводит к существенному усилению электризации космических аппаратов и возрастанию опасности разрядов между частями спутника с большой разностью потенциалов.

Иногда ударные волны и магнитные облака приходят к Земле непосредственно перед коротящей областью взаимодействия. В этом случае может развиться так называемая комплексная магнитная буря, которая представляет собой наибольшую опасность для космических аппаратов. Вслед за возмущением геомагнитного поля и вторжением в магнитосферу энергичных заряженных частиц, связанных с МКВМ, начинается суббуря и насыщение внешнего радиационного пояса. Возникают мощные потоки релятивистских электронов («электроны-убийцы»), которые способны проникать сквозь обшивку космических аппаратов и представляют серьезную опасность для ИСЗ, поскольку вызывают накопление внутри космических аппаратов объемного заряда, приводящего к выходу из строя бортовой электроники. В качестве примеров можно привести проблемы с электронными приборами на спутниках Equator-S, Polar, Galaxy-4, которые возникли во время длительной (около недели) суббуревой активности в мае 1998 года. Кроме того, такие комплексные события часто развиваются на фоне мощных потоков СКЛ, в результате чего отрицательное воздействие последних усиливается. Подобные явления бывают наиболее разрушительными, вплоть до одновременного выхода из строя ИСЗ, экстремальных радиационных нагрузок на экипажи орбитальных станций, пассажиров авиалайнеров, как на высоких, так и на средних геомагнитных широтах.

3.6 Наземные проявления

Геомагнитные возмущения могут привести к серьезным последствиям не только для аппаратов в ближнем космосе, но и для наземной инфраструктуры, а также для здоровья людей. Сильные вариации магнитного поля Земли, вызванные развитием кольцевого тока, приводят к возникновению индукционных токов (токов Фуко) в массивных проводниках на поверхности Земли. Хотя наводимая разность потенциалов невелика и составляет 10–50 В/км, но в протяженных проводниках с низким сопротивлением – линиях связи, трубопроводах, рельсах железных дорог – полная сила индукционных токов может достигать десятков и сотен ампер. Наибольшую опасность геомагнитные наводки представляют для низкочастотных сетей, которые широко используются в телефонных коммуникациях и в железнодорожной автоматике. Известны

случаи сбоев в системе управления железнодорожным транспортом в высоких широтах во время геомагнитных возмущений. А в трубах нефтепроводов, которые могут тянуться на сотни и тысячи километров, индуцированные токи могут значительно ускорять процесс коррозии металла.

В линиях электропередач, работающих на переменном токе, геомагнитные наводки, меняющиеся со значительно меньшей частотой, вносят только небольшую постоянную добавку к основному сигналу. Поэтому ранее предполагалось, что индуцированные токи не опасны для линий электропередач. Однако после аварии, произошедшей во время сильнейшей геомагнитной бури 1989 г. в канадской энергетической сети и оставившей на несколько часов провинцию Квебек без электричества, такую точку зрения пришлось пересмотреть. Оказывается, что даже небольшая добавка постоянного тока может вывести из строя трансформатор, предназначенный для преобразования переменного тока (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Сгоревшая обмотка трансформатора гидроэлектростанции в Квебеке. Это сделала космическая плазма!

Значительные неудобства геомагнитные возмущения могут создать и в системах пейджинговой и сотовой связи, которые активно используют спутники. Наиболее известный пример – это потеря американского аппарата TELSTAR во время одной из магнитных бурь 1997 г., следствием которой стало отключение пейджинговой связи на значительной части территории США.

Хотя на сегодняшний день прямая связь между геомагнитными возмущениями и ухудшением самочувствия людей пока не доказана, существует достаточно большая категория людей, на которых геомагнитные бури действуют отрицательно: активность человека притормаживается, притупляется внимание, начинаются обострения хронических заболеваний. Результаты в этой области пока противоречивы, но эта проблема также является одним из объектов исследований космической погоды.

Задачи к разделу 3.

3.1. Во время вспышки поток солнечных протонов составил $10^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. Длительность протонного события составила 20 часов. Считая, что поток шел только с солнечной стороны, а оболочка Международной космической станции ослабляет поток в 1000 раз, оценить поглощенную радиационную дозу в МКС. Для простоты считать, что станция представляет собой цилиндр длиной 40 м и радиусом 4 м, обращенный своим торцом к Солнцу. Масса станции составляет 60 т.

3.2. В приближении постоянных потерь вычислить среднюю высоту, на которую проникают протоны с энергией 150 МэВ. Зависимость плотности атмосферы от высоты считать экспоненциальной.

3.3. Получить зависимость глубины проникновения электронов в атмосферу от энергии в области энергий 10–100 кэВ для атмосферы постоянной плотности; для экспоненциальной атмосферы.

Контрольные вопросы

1. Перечислить основные негативные последствия космической погоды.
2. Каковы основные физические механизмы влияния космического пространства на КА?
3. В чем состоит опасность солнечных протонных событий?
4. Назовите негативные последствия геомагнитных возмущений.
5. Какие бывают наземные проявления возмущений космической погоды?

4. Мониторинг космической погоды

Влияние солнечной активности, гелиосферных и магнитосферных явлений на состояние технических объектов и повседневную жизнь людей требует решения задачи заблаговременного обнаружения возмущенных областей и предсказания возможных негативных последствий. Поэтому в последнее время активность исследований и разработок методов мониторинга космической погоды значительно возросла, появляется все больше информации о состоянии гелиосферы и магнитосферы Земли.

В настоящее время исследования в области космической погоды проводятся на основе комплексного и всестороннего анализа огромного экспериментального материала, который получают с помощью многочисленных детекторов и установок, направленных на мониторинг Солнца, межпланетного пространства, магнитосферы и атмосферы Земли. Одной из отличительных черт современных исследований в этом направлении является свободный доступ через Интернет к базам данных различных научных групп. Сотни и тысячи ученых, аспирантов и студентов используют в своей работе эту экспериментальную информацию.

Средства мониторинга можно разделить на два класса: космические и наземные. Космические аппараты и расположенные на них детекторы наблюдают за Солнцем в широком диапазоне электромагнитного спектра (спутники SOHO, TRACE, HINODE, RHESSI, GOES), а также измеряют условия (магнитное поле, плотность и температуру плазмы) и потоки частиц непосредственно в точке своего местонахождения (аппараты ACE, WIND и снова GOES).

В наземных наблюдениях космической погоды участвуют множество солнечных обсерваторий, ведущих наблюдения в окне прозрачности земной атмосферы для электромагнитных волн: от инфракрасных до ультрафиолетовых, а также некоторые радиодиапазоны. Для исследования возмущений солнечного ветра применяется радиосцинтилляционный метод: регистрация флуктуаций интенсивности радиоисточников на радиоволнах окна прозрачности. Особую роль в мониторинге космической погоды

играют детекторы космических лучей: нейтронные мониторы и мюонные телескопы. В последнее время все более активную роль играют мюонные годоскопы – новый тип наземных детекторов космических лучей.

4.1 Космические измерения

В настоящее время для мониторинга космической погоды используется большое число космических аппаратов, находящихся на различных расстояниях от Земли. Особую роль играют два спутника: ACE и SOHO, которые находятся в точке Лагранжа L1 системы Земля-Солнце.

Точки Лагранжа (точки либрации) представляют собой особые точки в системе из двух массивных тел, в которых третье тело с пренебрежимо малой массой находится в равновесии под действием гравитационных сил. В общем случае существует пять точек, в которых такое тело неподвижно во вращающейся системе отсчета, связанной с массивными телами. Точки Лагранжа обозначаются заглавной буквой L и цифровыми индексами от 1 до 5. Схема их расположения приведена на рис. 4.1. Решение для случая Земля–Солнце определяет положение точки L1 на расстоянии 1.5 млн км от Земли. Это примерно одна сотая астрономической единицы.

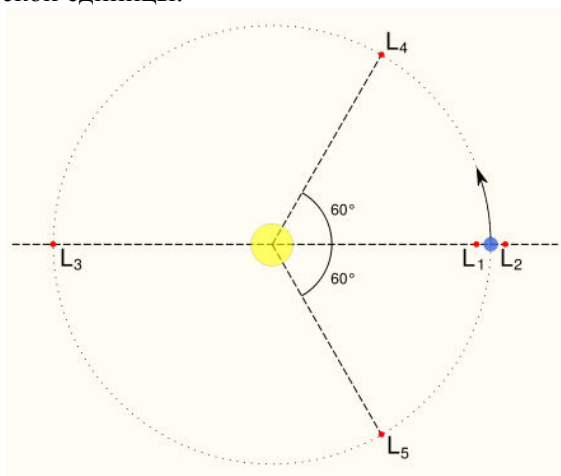


Рис. 4.1. Диаграмма расположения точек либрации

Космический аппарат SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) – проект Европейского космического агентства (ESA) при поддержке NASA направлен на изучение Солнца от внутреннего ядра до внешней короны, а также солнечного ветра. Вместе с другими проектами ESA – космическими аппаратами Cluster и Ulysses – SOHO предназначен для исследования солнечно-земных связей в различных аспектах. Стоимость проекта составляет один миллиард евро. Научной целью SOHO является поиск ответов на следующие вопросы:

- Какова структура и динамика внутреннего Солнца?
- Почему существует солнечная корона, и каким образом она нагревается до огромных температур в миллионы градусов?
- Где зарождается солнечный ветер и как он ускоряется?

SOHO обеспечивает беспрецедентно широкую и подробную информацию о Солнце, его внутренней структуре, а через горячую и динамическую атмосферу – о солнечном ветре и его взаимодействии с межпланетной средой. Кроме наблюдения за Солнцем SOHO является самым плодовитым открывателем комет в астрономической истории: к маю 2003 г. с помощью SOHO было обнаружено более 600 комет.

SOHO (рис. 4.2) был запущен 2 декабря 1995 г. ракетой Atlas с мыса Канаверал, вес аппарата составлял более 1800 кг. Хотя планируемое время работы составляло всего 2 года, SOHO до сих

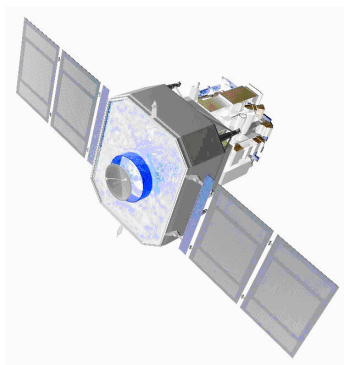


Рис. 4.2. Космический аппарат SOHO

пор функционирует и передает на Землю самую разнообразную информацию о жизни Солнца. В работе SOHO были и настоящие трагические эпизоды. В июне 1998 г. контроль над аппаратом был утерян и восстановлен только три месяца спустя. Зимой 1998/99 гг. вышли из строя гироскопы, которые обеспечивали устойчивую ориентацию аппарата, и проблему пришлось решать с помощью новой системы стабилизации,

программа которой была запущена в феврале 1998 года. Несмотря на трудности все детекторы, размещенные на SOHO, и в настоящее время работают практически без серьезных проблем.

Двенадцать приборов, которыми оснащен SOHO, были разработаны независимыми научными группами, объединяющими ученых из 29 институтов и 15 стран. Каждый из детекторов направлен на исследование отдельной научной задачи. Ниже перечислены некоторые из них:

- *Extreme ultraviolet Image Telescope (EIT)* – телескоп обеспечивает полнодисковое изображение Солнца на четырех выделенных длинах волн (171, 195, 284 и 304 нм). Пример снимка Солнца в ультрафиолетовых лучах, полученного с помощью EIT, представлен на рис. 4.3;

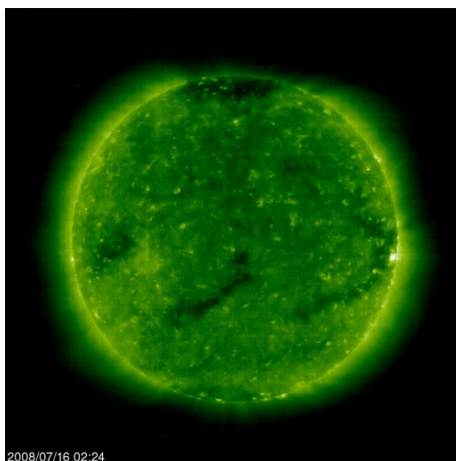


Рис. 4.3. Изображение диска Солнца на волне 195 нм. EIT/SOHO

- *Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO)* – предназначен для наблюдения за внешней солнечной атмосферой (коронай) практически от солнечного лимба до расстояний в 21 млн км (~30 солнечных радиусов). LASCO блокирует прямой свет от Солнца, т.е. создает искусственное солнечное затмение 24 часа в сутки и семь дней в неделю. Благодаря этому детектор LASCO является основным инструментом для регистрации корональных выбросов масс (рис. 4.4). Также LASCO прекрасно обнаруживает кометы при их приближении к Солнцу;

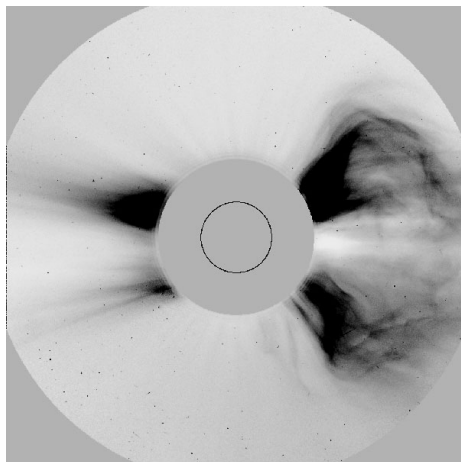


Рис. 4.4. Снимок возмущений солнечной короны, полученный коронографом LASCO/SOHO

- *Coronal diagnostic spectrometer (CDS)* – прибор, который регистрирует эмиссионные линии ионов и атомов в солнечной короне и переходной области, обеспечивая информацию о солнечной атмосфере, особенно о плазме с температурой 10 000 – 1 000 000 K;
- *Michelson Doppler Imager / Solar Oscillation Investigation (MDI/SOI)* – этот детектор фиксирует вертикальное движение в миллионах различных точек солнечной поверхности каждую минуту. С помощью этой информации ученые восстанавливают акустические волны в солнечной фотосфере и исследуют внутреннюю структуру Солнца. MDI также позволяет измерять продольную составляющую магнитного поля Солнца.

Большинство данных вышеперечисленных детекторов находятся в свободном доступе через основной сайт SOHO: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>. Это позволяет тысячам ученых и миллионам любителей пользоваться уникальной информацией SOHO для изучения Солнца.

Американский аппарат ACE (*Advanced Composition Explorer*) был запущен 25 августа 1997 г. ракетой Delta II с мыса Канаверал. Вес аппарата составлял 785 кг. Основная цель ACE – измерение и сравнение состава солнечной короны, солнечного ветра и других частиц в межпланетной среде, в том числе межзвездного и галактического происхождения (рис. 4.5). На его борту находятся девять различных детекторов, которые позволяют в реальном времени измерять величину и направление магнитного поля, плотность, температуру и скорость плазмы солнечного ветра, потоки электронов (до 300 кэВ) и протонов (с пороговой энергией 30 МэВ) и другие характеристики. ACE находится в точке L1 около 10 лет и большинство инструментов на его борту работают нормально. Планируется, что ACE будет функционировать в текущем режиме как минимум до 2011 года, а топлива на его борту хватит до 2024 г.

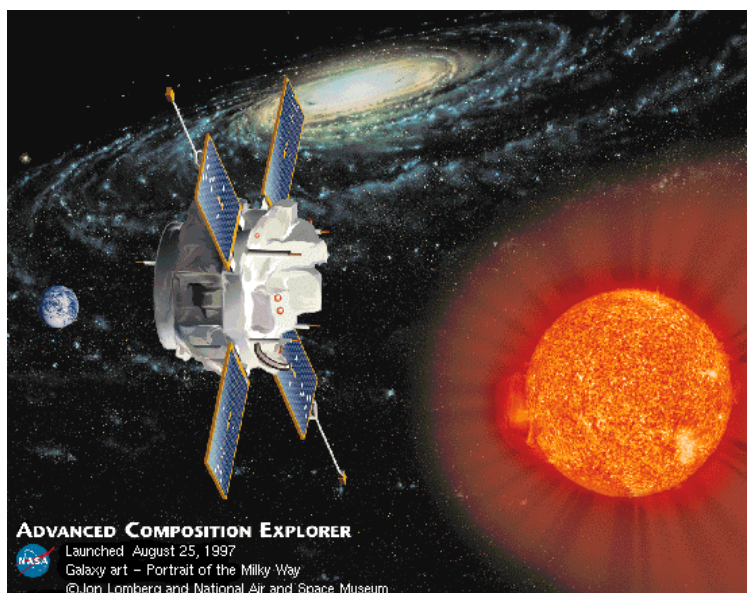


Рис. 4.5. Космический аппарат ACE

Основными инструментами на борту ACE являются:

- *Solar Isotope Spectrometer (SIS)* – спектрометр для низких энергий (10–100 МэВ/нуклон);

- *Electron, Proton and Alpha Monitor (EPAM)* – детектор для изучения вариаций потока электронов и ионов с энергиями от 0.03 до 5 МэВ, которые ускоряются солнечными вспышками и межпланетными ударными волнами;
- *Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor (SWEPAM)* – прибор для измерения трехмерных характеристик солнечного ветра и субтермальных электронов с энергиями 1–900 эВ и ионов с энергиями 0.26–35 кэВ;
- *MAG* – трехкоординатный магнетометр, измеряющий значение компонент вектора магнитного поля. Резкие вариации межпланетного магнитного поля отражают прохождение межпланетных ударных волн, магнитных облаков, секторную структуру межпланетного поля. Прибор является одним из наиболее распространенных на современных космических аппаратах;
- *Cosmic Ray Isotope Spectrometer (CRIS)* – прибор для измерения элементного и изотопного состава галактических космических лучей в диапазоне 100–600 МэВ/нуклон.

Вышеперечисленные приборы дают оперативную информацию о локальных характеристиках межпланетной среды в точке L1: величину и направление вектора магнитного поля, плотность, скорость и температуру солнечного ветра и др. Пример данных ACE, получаемых в режиме реального времени (http://www.swpc.noaa.gov/ace/ace_rtsw_data.html), приведен на рис. 4.6.

На сегодняшний день SOHO и ACE являются форпостом системы мониторинга космической погоды, позволяя предупреждать о приходе различных возмущений примерно за час (столько времени в среднем требуется гелиосферным возмущениям, чтобы преодолеть расстояние от точки Лагранжа L1 до Земли). Следует сказать, что оба космических аппарата хорошо дополняют друг друга. SOHO обеспечивает широкий набор информации о процессах на Солнце, а ACE прекрасно измеряет параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля непосредственно в точке L1.

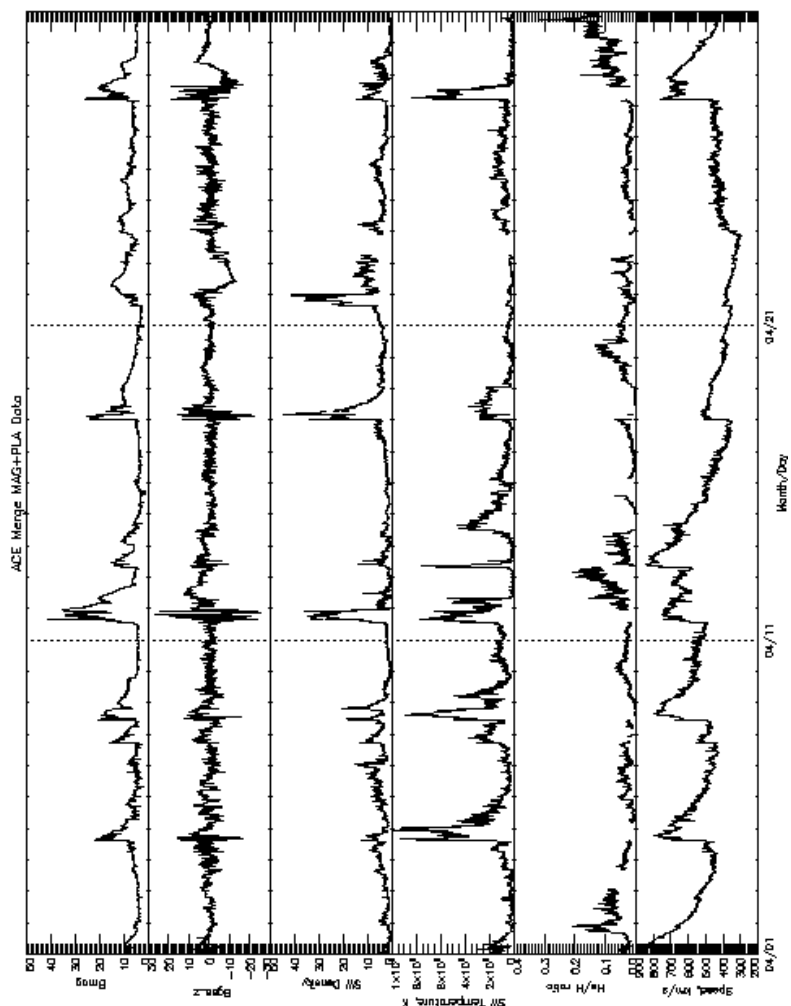


Рис. 4.6. Пример данных ACE. Сверху вниз: модуль и z-проекция вектора магнитного поля, плотность и температура солнечного ветра, отношение H/He, скорость солнечного ветра

Длительный период работы обоих космических аппаратов дал уникальный набор экспериментальной информации о солнечной активности и ее проявлениях в течение 23 цикла. С этой точки зрения, данные с 1996 по 2007 гг. представляют огромную ценность, а 23-й солнечный цикл является первым циклом с таким широким спектром наблюдений за Солнцем и состоянием гелиосферы. Существует достаточно серьезная уверенность, что эти аппараты будут работать и в течение следующего 24-го цикла солнечной активности.

Один из наиболее длительных рядов наблюдений получен с помощью американских спутников серии GOES (*Geosynchronous Operational Environmental Satellites*). Эта серия метеорологических спутников запускается NASA с 1975 года. Управление спутниками ведет Национальная Администрация Океанов и Атмосферы США (*NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration*). Спутники летают на геостационарной орбите высотой 35800 км, причем, один висит над западным побережьем США, а второй – над восточным (рис. 4.7).

Начиная со спутника GOES-1, на них кроме различной метео- и фотоаппаратуры устанавливаются детектор рентгеновских лучей в диапазонах 0.05–0.4 нм и 0.1–0.8 нм, детекторы энергичных частиц (протонов, α -частиц, электронов), магнитометр для измерения геомагнитного поля. Это позволяет вести непрерывный мониторинг проявлений солнечной активности в околоземном пространстве на протяжении нескольких солнечных циклов. Базы данных солнечных вспышек в рентгеновском диапазоне, потоков солнечных релятивистских частиц, возмущений магнитосферы на основе информации GOES насчитывают многие тысячи событий. С 2001 г. на спутники серии GOES (начиная с GOES-12) устанавливается детектор рентгеновского излучения SXI, который позволяет получать изображения солнечного диска в рентгеновском диапазоне (пример подобного изображения представлен на рис. 2.4).

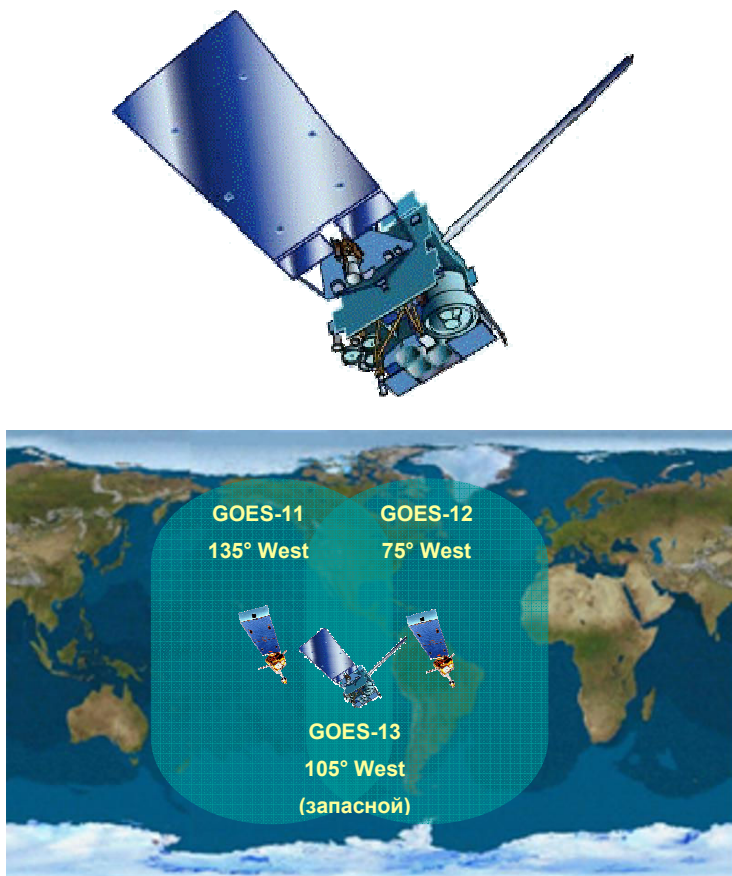


Рис. 4.7. Спутник серии GOES (вверху) и схема расположения (внизу)

На сегодняшний день большая часть активных исследований космической погоды проходит за рубежом. К сожалению, в последнее время Россия потеряла свои, некогда ведущие, позиции в исследованиях околоземного и межпланетного пространства. Резко сократилось количество спутников и аппаратуры орбитального базирования. Последний масштабный российский эксперимент, направленный на исследования в области солнечно-земной физики, связан с аппаратом "КОРОНАС-Ф", который был запущен 31 июля 2001 года. На его борту работало около десятка различных

детекторов, регистрирующих электромагнитное излучение практически во всем диапазоне, детектор заряженных частиц, нейтронный спектрометр, магнитометр. Аппаратура позволяла получать снимки солнечного диска в ультрафиолетовых лучах в различных спектральных диапазонах (рис. 4.8). "Коронас-Ф" сошел с орбиты 6 декабря 2005 года. Планируется, что исследования в этом направлении будут продолжены в ближайшем будущем с помощью спутника нового поколения "КОРОНАС-ФОТОН", который разрабатывается при активном участии сотрудников МИФИ.

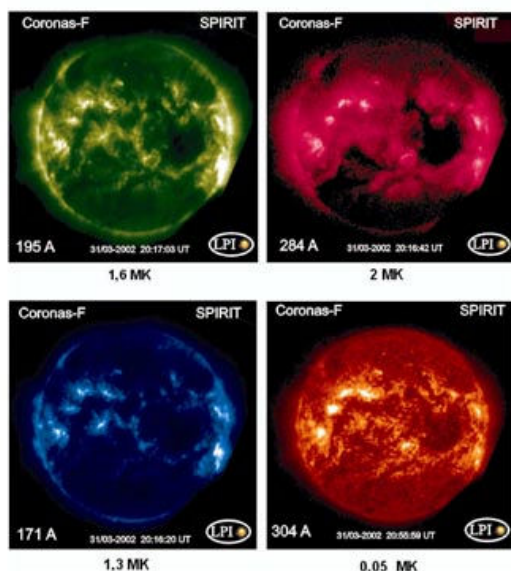


Рис. 4.8. Снимки солнечного диска в четырех различных спектральных диапазонах. Данные детектора SPIRIT (КОРОНАС-Ф)

Ученые МИФИ также принимают самое непосредственное участие в эксперименте на российско-итальянском детекторе ПАМЕЛА, запущенном в 2006 году. Хотя основной целью этого эксперимента является поиск антиматерии в космических лучах, детекторы космического аппарата позволяют получать уникальную информацию о спектре и составе солнечных космических лучей в диапазоне от 80 МэВ до 300 ГэВ.

В перспективе российские ученые планируют осуществление нескольких проектов, направленных на получение прямой информации о состоянии магнитосферы Земли, гелиосферы и Солнца: "Клиппер", РОЙ, Интергелиозонд и др.

Новая эра в исследовании солнечно-земных связей с помощью космических аппаратов началась с запуском американского проекта STEREO (*Solar-TErrestrial RElations Observatory*). Этот проект включает использование двух идентичных космических аппаратов, один из которых (STEREO-A) расположен на земной орбите, но впереди Земли, а второй (STEREO-B) – позади Земли (рис. 4.9). Космические аппараты STEREO были запущены с мыса Канаверал 26 октября 2006 г. и начали работу в режиме научных наблюдений с апреля 2007 г. Оба аппарата STEREO практически одинаковы и содержат широкий набор приборов, позволяющих проводить исследования как Солнца, так и внешней и внутренней гелиосферы.

Основные инструменты STEREO:

- *Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI)* – комплекс из пяти телескопов различного типа, которые наблюдают за солнечной короной и внутренней гелиосферой от Солнца до орбиты Земли. В состав SECCHI входят: EUVI (*Extreme Ultra-violet Imager*) – телескоп, позволяющий получать изображения солнечного диска в четырех диапазонах ультрафиолетовой области спектра (от 17 до 30 нм); коронографы COR1 и COR2 для изучения процессов в солнечной короне и слежения за корональными выбросами. Коронографы представляют собой обычные телескопы с искусственным экраном для прямого солнечного света (наподобие LASCO/SOHO). COR1 покрывает область от 1.3 до 4 солнечных радиусов, COR2 – от 2 до 15 солнечных радиусов. Третьей составляющей SECCHI служат два телескопа для наблюдения за гелиосферой (*Heliospheric Imager*): HI-1 и HI-2. Телескопы чувствительны к красной и инфракрасной (до 1000 нм) областям спектра и позволяют непосредственно наблюдать различные объекты во внутренней гелиосфере, в первую очередь, движение корональных выбросов массы через межпланетную среду (рис. 4.10);

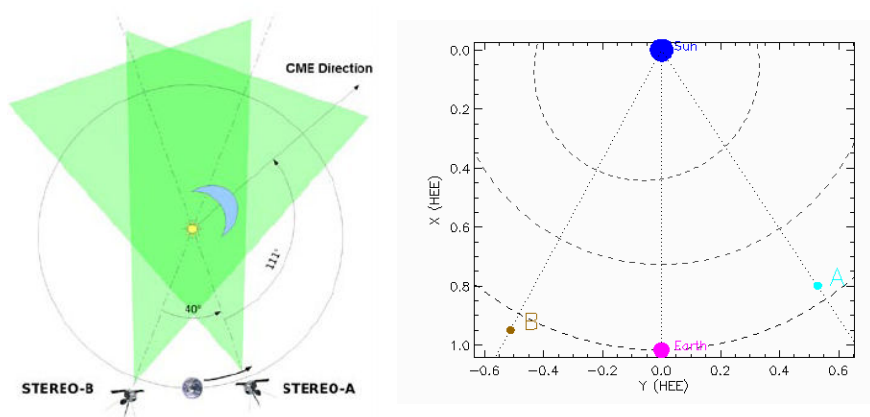


Рис. 4.9. Схема построения 3D изображения с помощью STEREO (справа). Местоположение аппаратов STEREO в июле 2008 года (слева, координаты в а.е.)

- *In-situ Measurements of Particles and CME Transients (IMPACT)* – комплекс из семи детекторов, который позволяет определять 3D-распределение плазмы солнечного ветра, параметры солнечных энергичных частиц (ионов и электронов), измерять локальный вектор межпланетного магнитного поля. Возможности детекторов позволяют проводить измерения потоков электронов с энергиями от нескольких эВ до 5 МэВ, протонов – от 20 кэВ до 100 МэВ, ионов (вплоть до железа) – до энергий 30 МэВ-нуклон. Таким образом IMPACT/STEREO вместе с детекторами ACE дает возможность мониторировать состояние гелиосферы в трех точках одновременно в режиме реального времени.

Синхронное наблюдение за Солнцем с двух разнесенных точек открывает возможность для построения трехмерной картины различных процессов связанных с солнечной активностью. Данные аппаратов STEREO доступны в сети Интернет, например с домашней страницы проекта: <http://stereo.gsfc.nasa.gov>. Планируемое время работы STEREO – 5 лет, однако нет сомнений, что срок его работы будет не менее долгим, чем аппаратов предыдущего поколения: SOHO и ACE.

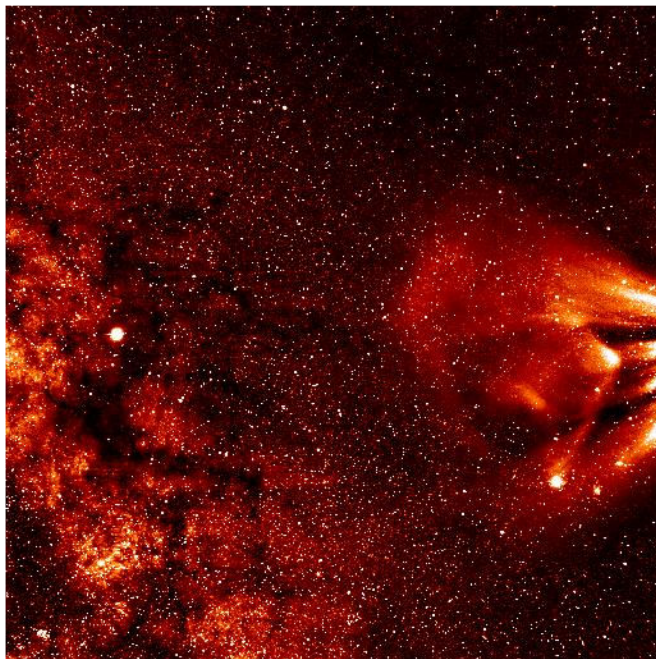


Рис. 4.10. Изображение коронального выброса масс во внутренней гелиосфере (HI/STEREO)

Изображение Солнца в различных диапазонах длин волн получают также с помощью различных спутников на низких орбитах (до 1000 км): TRACE (оптический диапазон), HINODE (рентгеновский телескоп и ультрафиолетовый спектрометр), RHESSI (детектор жесткого рентгена).

4.2 Наземные измерения

Регулярные научные наблюдения за диском Солнца с поверхности Земли насчитывают более 150 лет. В настоящее время постоянные наблюдения за солнечной активностью ведутся в большом числе обсерваторий в различных длинах волн. К сожалению, земная атмосфера прозрачна в сравнительно небольшом диапазоне электромагнитного спектра, что накладывает серьезные ограничения на возможности наземных наблюдений. Поэтому подобные наблюдения ведутся в оптическом и близких к

нему диапазонах электромагнитных волн, которые проходят через земную атмосферу без значительного ослабления. Обычно для этого используют белый свет, линию $\text{H}\alpha$ (656.3 нм), He I (1083 нм), Ca II K (393 нм) и др. Среди основных наземных центров наблюдения за Солнцем можно выделить:

- *Big Bear Solar Observatory* (США, Калифорния);
- *Kanzelhoehe Solar Observatory* (Австрия, Виллах);
- *Kodaikanal Solar Observatory* (Индия, Тамилнаду);
- *National Solar Observatory* (США, Нью-Мексика и Аризона);
- *Mauna Loa Observatory* (США, Гавай);
- *Mount Wilson Observatory* (США, Калифорния);
- *Solar Observatory Tower Meudon* (Франция, Медон);
- *Udaipur Solar Observatory* (Индия, Раджастан);
- *Крымская астрофизическая обсерватория* (Украина, Крым)

и целый ряд других. Практически в каждом крупном научном центре существует отдельный Интернет-портал, на котором можно найти снимки Солнца в различных длинах волн, сделанные за текущие сутки. Пример подобной информации представлен на рис. 4.11.

Важную роль в исследованиях солнечно-земной физики занимают космические лучи. Поток первичных космических лучей, который падает на атмосферу Земли, под влиянием различных солнечных, гелиосферных и геомагнитных процессов модулируется, что дает возможность исследовать первопричину таких модуляций. Вариации первичного потока вызывают изменения потока как адронной, так и проникающей (мюонной) компоненты космических лучей на поверхности Земли. Для регистрации космических лучей на поверхности Земли используются нейтронные мониторы, мюонные телескопы, а также различные детекторы, которые входят в состав установок по регистрации широких атмосферных ливней.

Latest MLSO Images

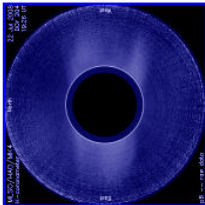
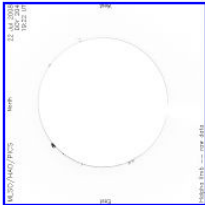
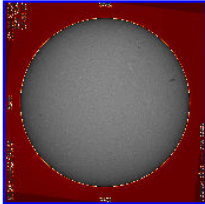
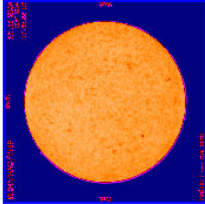
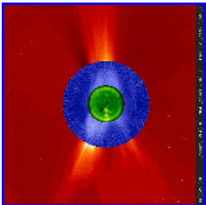
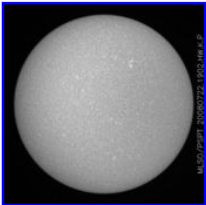
ACOS Mk4	ACOS PICS Limb	ACOS PICS Disc	ACOS CHIP
			
K-Corona 700-950 nm 23-Jul-2008 UT Watch Movie	H-Alpha Limb 656.3 nm 23-Jul-2008 UT Low-res Movie Full-res Movie	H-Alpha Disk 656.3 nm 23-Jul-2008 UT Low-res Movie Full-res Movie	Helium-I 1083 nm 23-Jul-2008 UT Low-res Movie Full-res Movie
Featured Event	PSPT Callik	PSPT Blue	PSPT Red
			
More Information Watch Movie 25-Mar-2008 Funding Courtesy NASA grant: NNX07AI06G	Callik 393 nm 22-Jul-2008 UT	Blue 408-412 nm 22-Jul-2008 UT	Red 605-610 nm 22-Jul-2008 UT

Рис. 4.11. Снимки Солнца на различных длинах волн. Данные обсерватории Мауна Лоа (Гавайи, США)

Нейтронный монитор был изобретен в конце 40-х г. американским ученым Дж.Симпсоном. Основное назначение этого детектора – измерять вариации потока космических лучей глубоко в атмосфере. На низких высотах остаются обычно только вторичные космические лучи, которые образуются при взаимодействии ПКЛ с ядрами атомов атмосферных газов. Низкоэнергетичная компонента вторичных КЛ состоит из нуклонов и, в первую очередь, из нейтронов, которые не испытывают потерь, связанных с ионизацией атомов атмосферы. Соответствующие расчеты показывают, что нейтронные мониторы чувствительны к вариациям спектра первичных космических лучей в области энергий 1–20 ГэВ. Дж. Симпсон предложил использовать магнитное поле Земли как спектрометр для измерения спектра первичных космических лучей в области низких (~ ГэВ) энергий. Дело в том, что магнитная широта расположения нейтронного монитора определяет наименьшую энергию (а точнее – жесткость) частиц первичных космических лучей, которые могут достигнуть границы атмосферы – так называемая **пороговая жесткость**. Расположенные по всему земному шару, на различных геомагнитных широтах нейтронные мониторы объединены в сеть, позволяющую одновременно измерять поток космических лучей с различными жесткостями (рис. 4.12). Подобные измерения ведутся с 1956 г., когда в рамках Международного геофизического года были объединены усилия исследователей из различных стран.

Существует несколько наиболее ярких типов вариаций потока космических лучей. Это форбуш-понижения, вызванные распространяющимися в гелиосфере ударными волнами или МКВМ, которые "выметают" поток галактических космических лучей из околоземного пространства, что приводит к резкому снижению интенсивности. Уменьшение может достигать нескольких десятков процентов в потоке нейтронов (рис. 4.13) или нескольких процентов в потоке мюонов на поверхности Земли.



Рис. 4.12. Мировая сеть нейтронных мониторов

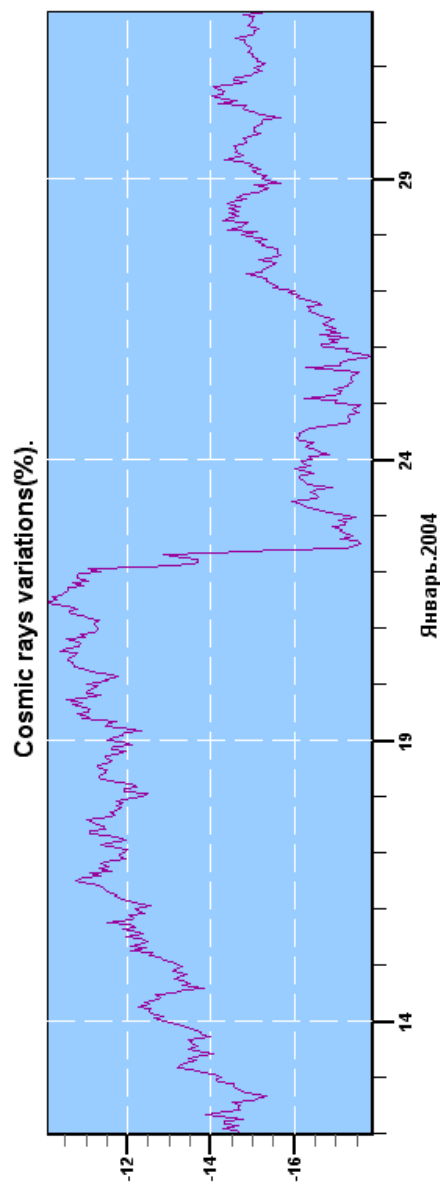


Рис. 4.13. Пример форбуш-понижения в космических лучах. Данные московского нейтронного монитора (ПЗМНРАН)

Расположенные в различных точках земного шара нейтронные мониторы каждую минуту регистрируют вариации космических лучей со всех направлений полной небесной сферы. Сотрудниками ИЗМИРАН (г. Троицк, Россия) был разработан эффективный метод анализа данных сети нейтронных мониторов, который позволяет использовать эти детекторы, опоясывающие всю планету, как огромный детектор космических лучей, «смотрящий» сразу во всех направлениях. На рисунке 4.14 представлен пример такого анализа. По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной – гелиодолгота. Кружками показаны отклонения интенсивности от номинального значения. В правой части рисунка видны сильные возмущения потока космических лучей, связанные с форбуш-понижением. Как можно заметить, понижение наблюдается со всех направлений небесной сферы. Однако в некоторой области долгот понижение началось практически на сутки раньше основного падения (центральная область рисунка). Эти долготы соответствуют направлению на ударную волну в гелиосфере, которая двигалась к Земле несколько суток. Таким образом, использование данных глобальной сети нейтронных мониторов позволяет обнаруживать гелиосферные возмущения на значительных расстояниях до Земли.

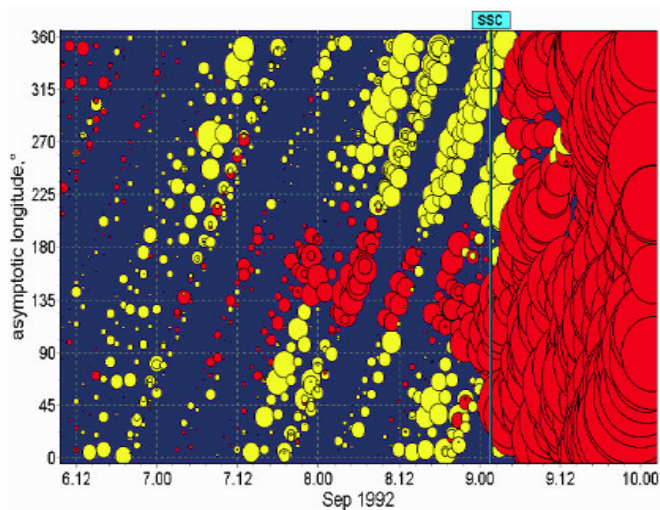


Рис. 4.14. Динамика анизотропии космических лучей по данным нейтронных мониторов

Отдельное направление использования нейтронных мониторов – это слежение за солнечными протонными событиями, во время которых темп счета нейтронных мониторов увеличивается в десятки раз (рис. 4.15). Такие события называются GLE (*Ground-Level Enhancement*) и являются достаточно редкими. К настоящему времени (июль 2008) зафиксировано всего 70 подобных событий за период наблюдений с 1942 года. Следует отметить, что солнечные космические лучи высоких (~ГэВ) энергий, которые дают основной вклад в возрастание темпа счета нейтронных мониторов, летят практически со скоростью света, в то время как основной и наиболее опасный поток солнечной радиации (протоны с энергиями в десятки и сотни МэВ) движется значительно медленней. Ученые из Бартольского исследовательского института (Делавер, США) показали, что использование сети нейтронных мониторов позволяет выдать предупреждение на 15–20 мин раньше, чем по информации спутниковых детекторов. Этого времени может быть достаточно, чтобы принять необходимые меры для защиты здоровья космонавтов, работающих в открытом космосе, или экипажей и пассажиров авиалайнеров.

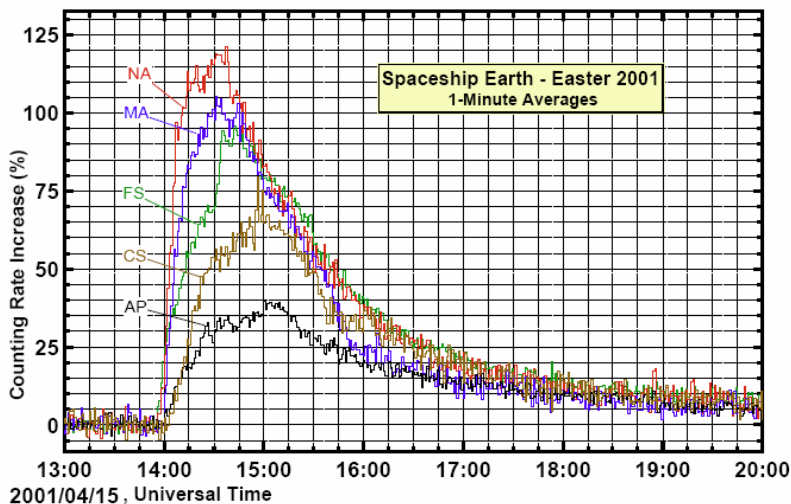
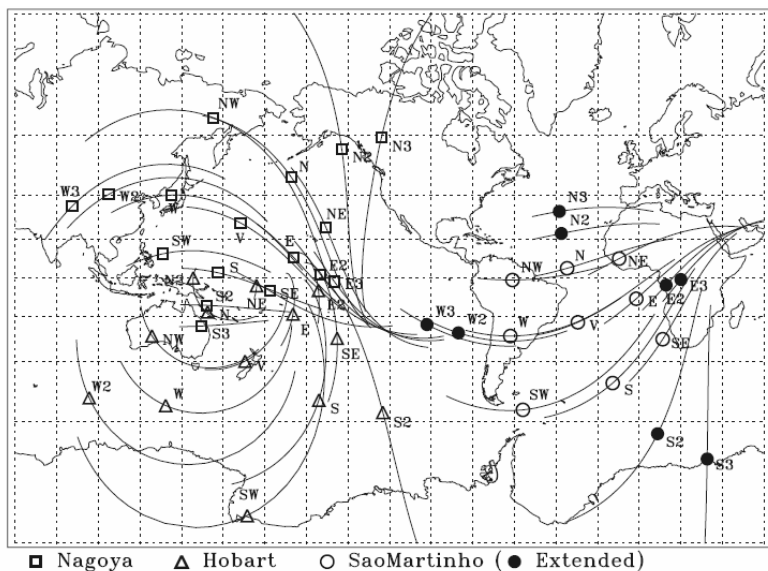


Рис. 4.15. Наземное повышение интенсивности космических лучей в сети нейтронных мониторов. Обозначения станций: NA – Нейн, MA – Моусон, FS – Форт Смит, CS – Мыс Шмидта, AP – Апатиты

Сейчас функционирует специальный проект *Spaceship Earth*, объединяющий приполярные станции нейтронных мониторов, который в реальном времени проводит мониторинг солнечных протонных событий (<http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/minute.html>).

Наряду с нейтронными мониторами в настоящее время исследования вариаций потока космических лучей проводится на нескольких многонаправленных мюонных телескопах. Стандартный **мюонный телескоп** представляет собой два счетчика заряженных частиц, между которыми находится свинцовый поглотитель, который подавляет мягкую электромагнитную компоненту. Такой детектор позволяет измерять вариации потока мюонов с заданного направления небесной полусферы. Из-за низкого темпа счета и сильной зависимости потока мюонов от атмосферных условий такие детекторы сейчас практически не используются для исследования вариаций космических лучей, поскольку уступают нейтронным мониторам по всем параметрам. Однако объединение нескольких мюонных телескопов в единую установку, позволяющую регистрировать вариации потока мюонов одновременно из нескольких направлений небесной полусферы, дает важную информацию об угловых модуляциях космических лучей, которая недоступна нейтронным мониторам, измеряющим только полный поток. На сегодняшний день в различных странах работают несколько подобных многонаправленных мюонных телескопов: Нагоя (Япония), Хобарт (Австралия), Сао Мартиньо (Бразилия), Грейсфальд (Германия), а также Кувейт. Подобные установки могут покрывать достаточно большую область на небесной сфере, так как представляют собой несколько (до 100) одновременно работающих мюонных детекторов, "смотрящих" в различных направлениях. Карта направлений приема для трех многонаправленных мюонных телескопов изображена на рис. 4.16.



*Рис. 4.16. Направления приема космических лучей для различных
многонаправленных мюонных телескопов*

Новым шагом в развитии методов наземного мониторинга процессов, модулирующих потоки космического излучения, является создание следующего поколения мюонных детекторов – мюонных годоскопов. **Мюонный годоскоп** представляет собой сборку из нескольких координатных плоскостей, расположенных друг над другом и оснащенных детекторами с высоким пространственным разрешением треков заряженных частиц. Двухкоординатная система считывания информации в каждой плоскости позволяет определять точку прохождения частицы и на основе этой информации в реальном времени проводить 3D-реконструкцию трека (рис. 4.17). При этом мюонный годоскоп способен регистрировать мюоны одновременно со всех направлений небесной сферы. Количество возможных значений зенитного и азимутального углов прилета мюонов настолько велико, что позволяет говорить об измерении интенсивности потока мюонов непрерывно по зенитному и азимутальному углам. Это принципиально отличает мюонные годоскопы от многонаправленных мюонных телескопов, где количество возможных направлений регистрации счетно и невелико.

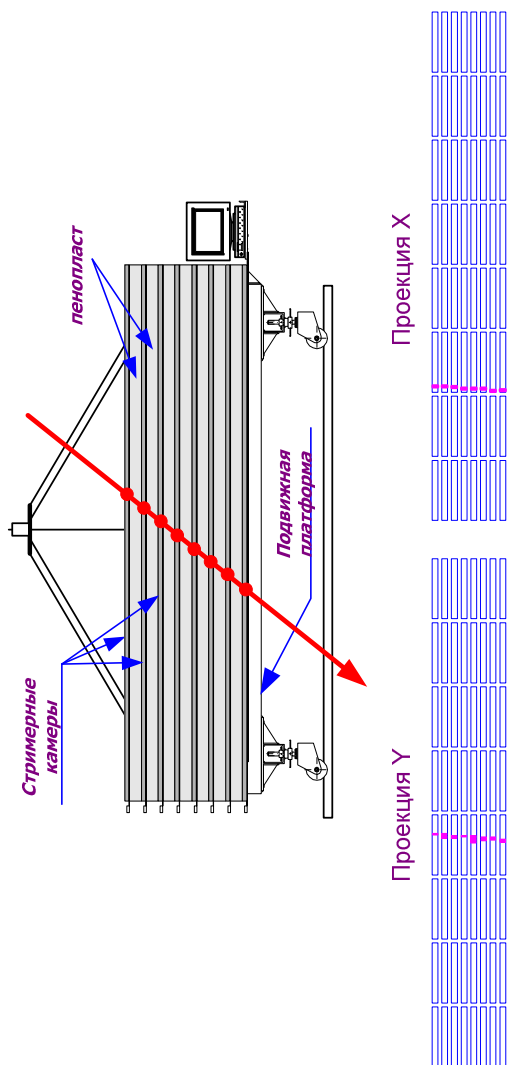


Рис. 4.17. Схема мюонного годоскопа УРАГАН и пример реконструкции трека мюона

Первый в мире мюонный годоскоп ТЕМП площадью 9 м^2 представляет собой две координатные плоскости, набранные из узких сцинтилляционных полосок, которые просматриваются малогабаритными ФЭУ (рис. 4.18). Точность реконструкции трека мюона в таком детекторе составляет 1–2 градуса. Анализ вариаций потока мюонов по данным ТЕМП показал, что существует определенная зависимость между пространственно-временными изменениями интенсивности мюонов из различных направлений небесной полусферы и динамическими процессами в околоземном пространстве. В частности, было зафиксировано проявление волновых возмущений в потоке мюонов во время геомагнитных бурь. Этот результат явился отправной точкой для дальнейшего использования мюонных годоскопов для исследования процессов в гелиосфере и магнитосфере Земли.



Рис. 4.18. Мюонный годоскоп ТЕМП

Создание на базе супермодулей российско-итальянского координатного детектора ДЕКОР нового мюонного годоскопа УРАГАН позволило проводить исследования вариаций потока мюонов на качественно новом уровне. Мюонный годоскоп УРАГАН (рис. 4.19) имеет блочную структуру и состоит из

четырёх сборок-супермодулей. Каждый супермодуль содержит восемь слоев, набранных из газоразрядных трубок, работающих в режиме ограниченного стримера. Площадь одного супермодуля 11.5 м^2 , угловая точность реконструкции достигает 0.7 градуса, пространственное разрешение составляет 1 см . Такие характеристики делают УРАГАН самым прецизионным в мире наземным детектором космических лучей большой площади. Данные мюонного годоскопа УРАГАН доступны в сети Интернет (<http://nevod.mephi.ru/English/graph.htm>).



Рис. 4.19. Базовый супермодуль установки УРАГАН

Основным форматом данных мюонного годоскопа является не темп счета мюонов из одного или нескольких направлений, а особая матрица, накапливаемая, как правило, за одну минуту, которая содержит информацию о дифференциальной интенсивности потока мюонов со всей небесной полусферы. Непрерывный набор подобных данных позволяет проводить «мюонную съемку» околоземного пространства и непосредственно в реальном времени наблюдать динамику гелиосферных возмущений. Данный метод аналогичен использованию рентгеновских лучей для получения изображений, только в качестве проникающего излучения используются галактические

космические лучи высоких энергий, а в качестве исследуемого объекта – разнообразные структуры солнечного ветра.

Новый подход к исследованиям возмущений в гелиосфере и околоземном пространстве, основанный на использовании данных по пространственно-угловым вариациям потока мюонов, получил название **мюонная диагностика**. В его основе лежит глубокая корреляция между динамическими процессами в гелиосфере и земной магнитосфере, с одной стороны, и изменениями потока мюонов на поверхности Земли с различных направлений небесной полусферы, с другой.

4.3 Космическая погода в сети Интернет

Одна из уникальных особенностей политики исследований космической погоды заключается в том, что большинство экспериментальных данных, получаемых на различных детекторах как спутниковых, так и наземных, находится в свободном доступе в сети Интернет. Для удобства работы существуют несколько мировых центров данных, которые объединяют информацию, получаемую из различных источников.

Наиболее широко известным центром является Центр предсказаний космической погоды (Space Weather Prediction Center – SWPC)⁸, организованный NOAA (рис. 4.20). На интернет-странице Центра представлен последний снимок Солнца в линии H α , информация о геомагнитных бурях, солнечной активности и отсутствии радиосвязи. В режиме реального времени приводятся данные GOES по интенсивности потока протонов и электронов, а также рентгеновского излучения. Кроме того, имеется информация по K-индексу за последние трое суток. На этой же странице присутствуют ссылки, по которым можно найти и скачать необходимую информацию в цифровом виде.

Огромный массив данных по различными областям космической погоды находится на сайте Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR). Здесь представлены как наземные, так и спутниковые снимки Солнца, данные ACE по солнечному ветру, карты авроральных овалов на текущий момент, индексы

⁸ <http://www.swpc.noaa.gov/>

геомагнитной активности. Удобный интерфейс позволяет получить информацию в цифровом виде за интересующий интервал времени (рис. 4.21).

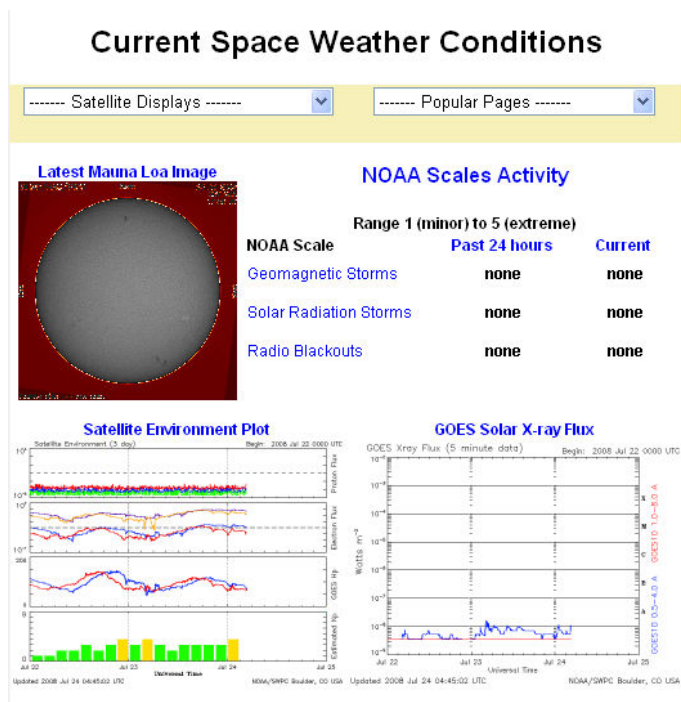


Рис. 4.20. Скриншот интернет-страницы Центра предсказаний космической погоды (SWPC)

Данные наземных детекторов можно найти на одном из трех Мировых центров данных по космическим лучам:

в США (Колорадо)

ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/COSMIC_RAYS/

Японии (Ибаракки)

http://www.env.sci.ibaraki.ac.jp/database/html/WDCCR/data_e.html

и в России (Троицк)

<http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm>

Select Data Type, Parameters and Stations

Data Sets						
	Info	Metadata	FTP	Coverage	Native Time Step	Available Dates
Index Data						
AMIE derived Indices				global	1 min	Jan, 1991 - Dec, 2002 Moscow
Geomagnetic Indices				global	1, 3 hr, 1 day	Jan, 1868 - Dec, 2008 Moscow
HPI DMSP Data				10 satellites	floating: about 50 min	Jan, 1983 - Feb, 2001 Moscow
HPI NOAA Data				10 satellites	floating: about 100 min	Nov, 1978 - Mar, 2003 Moscow
Solar Data				global	1 day	Jan, 1610 - Oct, 2007 Moscow
Station Data						
Cosmic Ray Data (Hour Sampling - NEWUII)				143 stations	1 hour	Jan, 1953 - Dec, 2006 Moscow
Cosmic Ray Data (Minute Sampling - NEWUII)				28 stations	1 min	Feb, 1971 - Dec, 2006 Moscow
Geomagnetic Annual Means				581 stations	1 month	Jan, 1813 - Jan, 2002 Moscow
Geomagnetic Hourly Means				229 stations	1 hr	Apr, 1901 - Dec, 2005 Moscow
Geomagnetic Minute Means				209 stations	1 min	Jan, 1969 - Apr, 2005 Moscow
Ionospheric Data				220 stations	floating: 15 min, 1 hr	May, 1900 - Nov, 2007 Moscow
Precipitation				216 stations	1 month	Jan, 1966 - Jan, 1990 Moscow
Radio Solar Telescope Network (RSTN)				N/A stations	1 sec	N/A
Satellite Data						
GOES - Space Environment Monitor				7 satellites	1, 5 min	Jan, 1986 - Jul, 2001 Moscow
IMF - Interplanetary Magnetic Field by Minute				3 satellites	1, 5 min	Jan, 1974 - Jul, 2008 Moscow
IMF OMNI - Interplanetary Magnetic Field by Hour				global	1 hr	Jan, 1973 - Dec, 2002 Moscow
POES - Polar Orbiting Environmental Satellites				global	16 sec	1998 - present
Images						
DMSP Images Visible and IR				N/A satellites	8 images per 101 min orbit	N/A
DMSP SSJ4				6 satellites	floating: 1-15 sec	Oct, 1992 - May, 2008 Boulder
GOES - Solar X-ray Imager				global	random	2003 - present
Nighttime Lights of the World				global	no sampling	2000
Solar Images				global	1 day	1915 - 2003
Modeling Data						
Space Weather Analysis				global	15 min	1995 - present
Other Data						
						Moscow

Рис. 4.21. Скриншот страницы SPIDR: перечень доступных данных по космической погоде

Российский портал содержит наиболее полную базу данных по нейтронным мониторам. Здесь представлена информация по 98 нейтронным мониторам, которые использовались с 1953 года.

Существует специальный портал, посвященный космической погоде: www.spaceweather.com, на котором представлена сборная информация о текущем состоянии межпланетного и околоземного пространства. Кроме того, в последнее время становится популярным создание различными институтами и научными группами, занимающимися проблемами космической погоды, собственных дежурных web-страниц с последней информацией о гелиосферных и магнитосферных возмущениях.

Задачи к разделу 4

4.1. Рассчитать положение точки Лагранжа L1 в системах Солнце–Земля; Земля–Луна; Солнце–Марс.

4.2. Телескопы HI-I и HI-II, расположенные на КА STEREO, направлены под углами 13.65 и 53.35° от Солнца соответственно. Учитывая, что ширина поля зрения телескопов составляет 20° (HI-I) и 70° (HI-II), определить угловую ширину зоны перекрытия.

4.3. Вычислить для телескопа HI-II диапазон расстояний на линии Солнце–Земля, попадающих в поле зрения, если отставание космического аппарата STEREO-B от Земли составляет 60°.

4.4. Темп счета нейтронного монитора составляет примерно 200 Гц. Определить среднеквадратичную погрешность в процентах для часовых данных.

4.5. Мюонный детектор размещен в здании под бетонной крышей толщиной 10 см. В приближении постоянных потерь вычислить минимальный импульс мюона, который сможет достичь детектора. Плотность бетона 2.5 г/см³.

Контрольные вопросы

1. Перечислить основные космические аппараты, проводящие мониторинг космической погоды. Какие из них расположены на околоземных орбитах?
2. Какую информацию о Солнце и гелиосфере получают с помощью космических аппаратов?
3. Опишите проект STEREO.
4. Назвать основные длины волн, в которых проводится съемка Солнца наземными обсерваториями. Чем обусловлен выбор этих значений?
5. Перечислить основные типы наземных детекторов для измерения вариаций потока космических лучей.
6. Какой принцип используется при измерении энергетического спектра вариаций ПКЛ с помощью сети нейтронных мониторов?
7. Что такое эффект Форбуша?
8. Что такое событие GLE?
9. Опишите принцип работы многонаправленных мюонных телескопов.
10. Что такое мюонные годоскопы и мюонная диагностика?

Список литературы для самостоятельной работы

1. Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир, 1975.
2. Авдюшин С.И., Данилов А.Д. Рассказ о космической погоде. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993.
3. Альвен Х. Космическая плазма. М.: Мир, 1983.
4. Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971.
5. Гальпер А.М. Космические лучи. – 2-е изд. М.: МИФИ, 2002.
6. Модель Космоса: Научно-информационное издание / М.И. Панасюк, Л.С. Новиков. М.: КДУ, 2007.
7. Сборник трудов БМШ-2007. М.: МИФИ, 2008.
8. Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстративный словарь терминов / А. Бруцек, Ш. Дюран М.: Мир. 1980.

Список обозначений

ГКЛ – галактические космические лучи
ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система
ГТС – гелиосферный токовый слой
ИСЗ – искусственный спутник Земли
КА – космический аппарат
КВМ – корональный выброс масс (CME – coronal mass ejection)
КЛ – космические лучи
КОВ – коротярующая область взаимодействия
КОРОНАС – комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности Солнца
МГД – магнитогиродинамика
МКВМ – межпланетный корональный выброс масс (ICME – interplanetary coronal mass ejection)
МКС – международная космическая станция
ММП – межпланетное магнитное поле
ПКЛ – первичные космические лучи
РПЗ – радиационный пояс Земли
СКЛ – солнечные космические лучи
ТЕМП – телескоп мюонный поворотный
УРАГАН – установка для распознавания грозвых аномалий
ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ACE – Advanced Composition Explorer
ESA – European Space Agency
GLE – Ground Level Enhancement
GOES – Geosynchronous Operational Environmental Satellites
GPS – Global Positioning System
GSM – Geocentric Solar Magnetospheric (coordinate system)
IGRF – International Geomagnetic Reference Field
IGY – International Geophysical Year
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
OSO – Orbiting Solar Observatory
SID – Sudden Ionospheric Disturbances
SOHO – Solar and Heliospheric Observatory
SPIDR – Space Physics Interactive Data Resource
SSC – Storm Sudden Commencement
SSE – Single Events Effects
STEREO – Solar-Terrestrial Relations Observatory
SWPC – Space Weather Prediction Center
UT – Universal Time