СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ И КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

Под редакцией А.А. Петруковича

8.1. Введение

А.А. Петрукович

Наука о *солнечно-земных связях* (СЗС) изучает зависимости между гелиофизическими и геофизическими процессами. Традиционно из рассмотрения исключается действие постоянного потока теплового солнечного излучения, и внимание концентрируется на переменных составляющих солнечного влияния: коротковолновом солнечном электромагнитном излучении, солнечном ветре, солнечных космических лучах. При этом динамика плазмы в Солнечной системе исследуется, прежде всего, с точки зрения передачи к Земле энергии, выделяющейся в нестационарных процессах на Солнце, и ее перераспределения в магнитосфере и ионосфере.

По мере развития технологий проявилось влияние солнечной переменности на технические системы: радиосвязь, трубопроводы и линии электропередач, электронную аппаратуру самолетов и спутников, а также на климат, человека и другие биологические объекты. В этой связи активно развиваются методы прогноза солнечной активности и магнитных бурь. Такие практически важные аспекты СЗС объединяются понятием космическая погода (Space Weather). Этим же термином часто обозначают весь комплекс переменных внешних космических факторов, оказывающих влияние на Землю. Долгопериодические (10–100 и более лет) тенденции космической погоды в последнее время называют космическим климатом (Space Climate).

Восьмая глава посвящена комплексному рассмотрению этой тематики. В разд. 8.2 представлена совокупность явлений в цепочке солнечно-земных связей, систематизированная в виде факторов космической погоды. О физических основах изложенных здесь сведений более подробно рассказано в других главах книги. В разд. 8.3 приведены описания некоторых характерных практических эффектов действия этих факторов. В 8.4 описаны методы, проблемы и история прогноза явлений космической погоды. В приложении приведена подборка источников информации по тематике солнечно-земных связей в сети Интернет.

Так как в таком малом объеме отразить всю достаточно разнородную проблематику данного вопроса невозможно, то основное внимание уделено представлению ключевых фактов и физических механизмов основных явлений, проиллюстрированных отдельными примерами. В дополнение приводятся ссылки на соответствующую специальную литературу.

Глава в значительной степени является независимой от остальных частей книги и может изучаться отдельно. Она может быть полезна как физикам для получения представления о практических аспектах (8.3), так и специалистам по прикладным направлениям для целостного понимания системы солнечно-земных связей (8.2,

8.4). Глава в основном носит обзорный характер, по части направлений приведены оригинальные результаты российских исследователей.

Авторами этой главы являются: А.А. Петрукович (8.1, 8.2, 8.3.1, 8.3.2, 8.3.5, 8.4, 8.5, 8.6), А.В. Белов (8.4), Т.К. Бреус (8.3.6), М.Г. Дёминов (8.3.3), А.В. Дмитриев (8.2, 8.3.1), А.Н. Зайцев (8.6), А.А. Криволуцкий (8.3.5), В.Н. Обридко (8.4), В.М. Петров (8.3.1), С.А. Пулинец (8.3.2), О.М. Распопов (8.3.5), А.Б. Струминский (8.2), Ю.А. Наговицын (8.3.5), Л.Д. Трищенко (8.3.4), О.А. Трошичев (8.3.5).

8.2. Система солнечно-земных связей

А.А. Петрукович, А.В. Дмитриев, А.Б. Струминский

8.2.1. Общие положения

Солнечное воздействие, определяющее солнечно-земные связи, включает следующие факторы:

- коротковолновое солнечное УФ- и рентгеновское излучение;
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- солнечный ветер и межпланетное магнитное поле;
- *галактические космические лучи* (*ГКЛ*), составляющие влияние межзвездной среды, традиционно рассматриваются вместе с солнечными факторами.

Солнечный ветер и коротковолновое ионизирующее электромагнитное излучение формируют плазменные оболочки Земли — магнитосферу и ионосферу. Поэтому помимо солнечных факторов в рамках СЗС рассматривают также условия, создаваемые магнитосферой и ионосферой: потоки заряженных частиц, электрические токи и пр.

Различные факторы действуют постоянно, с некоторыми вариациями (ГКЛ, солнечный ветер) или спорадически (например, СКЛ). Их воздействие, а также состояние оболочек Земли варьируется из-за цикла солнечной активности, вращения Солнца и Земли, эндогенной вариабельности (связанной с неустойчивым турбулентным характером плазмы) солнечной атмосферы, межпланетной среды, магнитосферы и ионосферы. Спорадические явления связаны с взрывными (эруптивными) событиями на Солнце и их действие во всей цепи СЗС может быть охарактеризовано как аномальное усиление постоянной составляющей, различного рода бури — магнитные, радиационные, ионосферные (Эллисон, 1959; Акасофу и Чепмен 1974; Kivelson, Russell, 1995; Ваитјонапп, Тгеитапп, 1996). С историческими аспектами данной проблематики можно ознакомиться в обзорах Штерна (Stern, 1989, 1996, 2002).

8.2.2. Солнечное магнитное поле и солнечная активность

Солнце — основной источник энергии в Солнечной системе. Полная мощность его излучения составляет порядка $4\cdot 10^{26}$ Вт. Энергия, выделяемая в ходе ядерных реакций в центральной части Солнца, транспортируется к его поверхности сначала излучением, а во внешних слоях (более 0,7 радиуса) — конвективными течениями. Во внешнее пространство практически вся она испускается в виде электромагнитного излучения в тонком поверхностном слое — фотосфере. Солнечная переменность, ответственная за космическую погоду и солнечно-земные связи составляет доли процента общего потока энергии. Солнечное магнитное поле, определяющее эту переменность, генерируется в конвективной зоне потоками плазмы, модифицированными дифференциальным вращением Солнца (так называемый динамо-эффект). Периодичность изменений глобального поля (смена полярности) составляет около 22 лет. Его половина — в среднем около 11 лет — формирует цикл солнечной активности. В минимуме активности крупномасштабное поле Солнца близко к дипольному со средней величиной на поверхности порядка 1 Гс. Максимум активности связан

с переполюсовкой поля, во время которой его конфигурация усложняется, что может быть представлено как появление мультипольных гармоник. На спаде активности структура возвращается к дипольной с обратной полярностью поля. Вблизи максимума распределение магнитных полей сильно неоднородно: формируются жгуты силовых линий поля амплитудой до тысяч гаусс, которые из-за повышенной «магнитной плавучести» постепенно поднимаются к фотосфере, образуя на ней солнечные пятна — более темные (холодные) области, перенос тепла (конвекция в традиционном смысле) под которыми заторможен сильным магнитным полем. Над фотосферой, в разреженной плазменной атмосфере Солнца — короне — эти локальные магнитные поля замыкаются, формируя дуги силовых линий, видимые, в частности, по свечению плазмы в рентгеновском диапазоне (рис. 8.2.1). Другая характерная структура на

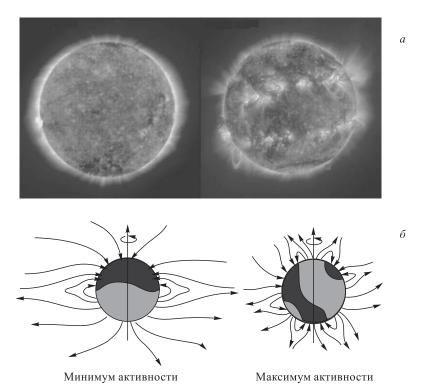


Рис. 8.2.1. Солнце в минимуме (слева, 23.01.1997) и начале максимума (справа, 9.11.1998) цикла активности (а). Темные области у полюсов в минимуме — корональные дыры. В максимуме локальные магнитные поля формируют яркие активные области и петли в солнечной короне. (Снимки КА SOHO в полосе линии 17,1 нм). Схема структуры крупномасштабного поля Солнца (б). Растянутая квазидипольная в минимуме (слева) и более сложная мультипольная конфигурация в максимуме (справа)

поверхности Солнца — корональные дыры, крупномасштабные области с магнитным полем, силовые линии которого уходят на «бесконечность». Более крупномасштабные поля определяют структуру истечения солнечного ветра, а локальные сгустки поля представляют собой, прежде всего, резервуар свободной энергии. Характерное время динамики крупномасштабной структуры магнитного поля составляет несколько оборотов Солнца (период вращения равен 26–30 дней, в зависимости от широты).

Потеря равновесия в сложных магнитоплазменных конфигурациях над пятнами приводит к так называемым эруптивным событиям (резкому высвобождению энергии): солнечным вспышкам, солнечным протонным событиям (СПС) и выбросам плазмы (корональным выбросам массы — KBM). Вспышки — всплески коротковолнового УФ-, рентгеновского и гамма-излучения общей энергетикой 10^{22} – 10^{25} Дж. Наиболее мощные вспышки заметны и в белом свете. В ходе СПС генерируются нетепловые протоны (в основном) и другие частицы — солнечные космические лучи. КВМ характеризуются выбросом в солнечный ветер больших количеств солнечной плазмы и магнитного поля $(10^{11}$ – 10^{14} кг). На первом этапе КВМ наблюдаются вблизи Солнца в рассеянном свете фотосферы, а непосредственно регистрируемые проявления этих выбросов в солнечном ветре называют магнитными облаками. В настоящее время не до конца ясно насколько вспышки, СПС и КВМ взаимосвязаны, например, часть КВМ происходит и вне активных областей. Однако, наиболее мощные эруптивные события сопровождаются всеми этими проявлениями (см., например, Yashiro et al., 2005; Yermolaev et al., 2005).

С точки зрения баланса энергии в ходе солнечного цикла часть энергии вращения и энергии конвективных движений Солнца переходит (запасается) в энергию магнитного поля (так называемый механизм «динамо»). В зоне сильных полей часть ее затем высвобождается во время эруптивных событий, переходя в энергию излучения и плазмы короны, по всей видимости, посредством пересоединения (аннигиляции) противоположно направленных магнитных полей. Физические процессы, формирующие солнечную активность, не всегда ясны и являются предметом интенсивных исследований. Более подробно о строении Солнца и солнечной активности рассказано в соответствующих главах этой книги. Можно также порекомендовать книги Паркера (1982), Приста (1985) и Стикса (Stix, 2004).

Самое заметное проявление солнечной активности — солнечные пятна, а их характеристики являются наиболее распространенной мерой солнечного цикла. $\mathit{Чис-}$ ла $\mathit{Вольфа}$ (цюрихские относительные числа солнечных пятен) определяются как Rz = k(10G+n), где G — число групп солнечных пятен, n — полное число пятен, k — калибровочный коэффициент для приведения различных наблюдений к единой системе. В максимуме активности число Вольфа превышает сотню единиц, а в минимуме приближается к нулю (рис. 8.2.2).

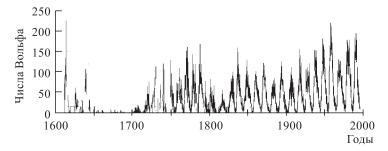


Рис. 8.2.2. Числа Вольфа за весь период наблюдений солнечных пятен

8.2.3. Излучение Солнца

Электромагнитное излучение. Полный поток солнечного излучения у Земли называется *солнечной постоянной* и составляет (в среднем, с учетом эллиптичности земной орбиты) $1366~{\rm Bt/m^2}$. В ходе 11-летнего цикла солнечной активности эта величина варьируется в пределах 0,1%. Практически вся энергия заключена в непре-

рывном тепловом излучении фотосферы в диапазоне длин волн от 150 нм до 0,5 см, спектр в котором близок к спектру излучения абсолютно черного тела с температурой около 6000 К. Нетепловое радио-, рентгеновское и гамма-излучение Солнца генерируется в основном в расположенной над фотосферой хромосфере ($T \sim 10^4 \text{ K}$) и в солнечной короне ($T \sim 10^6 \; {\rm K}$) электронами и протонами, ускоряемыми вплоть до релятивистских энергий в ходе процессов, связанных с динамикой магнитного поля (см. гл. 1, 2, обзоры МасКіппоп, 2006; Lin, 2006). С уменьшением длины волны интенсивность электромагнитного излучения быстро падает, но его вариабельность сильно увеличивается. На достаточно стабильное мягкое УФИ (100-400 нм), поглощаемое озоновым слоем атмосферы, приходится около 9% излучения. Солнечно-циклические вариации жесткого УФИ (10-100 нм) составляют уже десятки процентов. Основным его источником является так называемый «средний класс» областей с повышенной светимостью (Veselovsky et al., 2001, 2004). По мере уменьшения длины волны растет вклад активных областей, связанных с солнечными пятнами, и на длинах волн менее 1 нм практически все излучение обусловлено ими. Более жесткое рентгеновское и гамма-излучение (< 0.2 нм) появляется в спектре Солнца всего лишь на короткое время во время солнечных вспышек. Более подробно состав солнечного излучения рассматривается в (Макарова и Харитонов, 1972; Stix, 2004).

Коротковолновое излучение задерживается атмосферой, поэтому может измеряться только на борту космических аппаратов. Для характеристики вспышечной активности Солнца удобно использовать величину потока рентгеновского излучения, так как во время вспышки его интенсивность может возрасти на несколько порядков. Вспышки разделяются на классы по пиковой мощности, измеряемой в диапазоне 0,1-0,8 нм: класс $B~(<10^{-3}~\text{MBT/m}^2)$, $C~(10^{-3}-10^{-2}~\text{MBT/m}^2)$, $M~(10^{-2}-10^{-1}~\text{MBT/m}^2)$, $X~(>10^{-1}~\text{MBT/m}^2)$. Вспышек класса более $X10~(\text{т. e. более 1 MBT/m}^2)$ происходит порядка 10~за солнечный цикл, класса более M5~- несколько сотен (http://sec.noaa.gov/NOAAscales). Длительность вспышки — от нескольких минут до нескольких часов. Пример регистрации серии мощных вспышек в октябре 2003~г. приведен на рис. 8.2.3.

Радиоизлучение Солнца также является хорошим индикатором уровня солнечной активности (см. также 8.4). Например, поток радиоизлучения на волне 10,7 см (индекс $F_{10,7}$) коррелирует с солнечным УФИ и часто используется как характеристика ионизирующего излучения Солнца.

Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле. Солнечный ветер — это поток плазмы (порядка 10^9 кг/с), истекающий из солнечной короны в межпланетное пространство и состоящий в основном из электронов, протонов и ядер гелия (последних в среднем $\sim 4\,\%$). Солнечный ветер вытесняет межзвездную плазму из области с радиусом порядка 100 а. е., формируя таким образом *гелиосферу* (см. гл. 3).

Параметры истечения контролируются магнитным полем Солнца, которое довольно близко к дипольному в минимуме активности. Угол наклона диполя к оси вращения Солнца относительно мал, исключая периоды длительностью 1-2 года в максимуме солнечной активности, когда происходит магнитная переполюсовка. В дипольной конфигурации на высоких и средних гелиоширотах формируются корональные дыры, из которых силовые линии магнитного поля уходят на «бесконечность» (рис. 8.2.1). Из этих областей истекает быстрый и разреженный солнечный ветер, имеющий на удалении 1 а. е. скорость ~ 700 км/с и концентрацию менее 5 частиц в см 3 . Корональные дыры меньшего масштаба могут формироваться и на низких широтах (см. рис. 8.4.3 на с. 244). Вне корональных дыр структура солнечного и гелиосферного магнитного поля более сложна и характеризуется, в частности, замкнутыми силовыми линиями. Эти зоны являются источником «медленного» ветра,

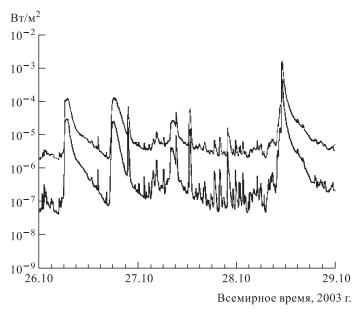


Рис. 8.2.3. Серия солнечных вспышек, зарегистрированных KA GOES в октябре-ноябре 2003 г. (данные реального времени http://sec.noaa.gov)

имеющего на орбите Земли скорость $\sim 300-400$ км/с и концентрацию ~ 10 см $^{-3}$. Межпланетное магнитное поле (ММП) формируется как сумма солнечного поля, и поля создаваемого гелиосферным токовым слоем, разделяющим зоны противоположно направленных (исходящих и входящих на Солнце в разных полушариях) магнитных силовых линий. Средняя напряженность ММП вблизи Земли составляет 5-10 нТл и зависит от фазы солнечного цикла.

Из-за высокой проводимости плазмы солнечного ветра магнитное поле вморожено в плазму, т. е. солнечный ветер уносит от Солнца не только вещество, но и магнитное поле. Из-за вращения Солнца и вмороженности магнитное поле закручено в спираль Архимеда (рис. 8.2.4). Граница между входящими и исходящими силовыми линиями проходит не точно по солнечному экватору, поэтому токовый слой в межпланетном пространстве имеет сложную форму — «юбка балерины» (рис. 8.2.4). Наблюдатель, находящийся в плоскости эклиптики (на Земле), будет то выше, то ниже токового слоя. При этом будет меняться доминирующее направление вектора ММП. В этой связи говорят, что ММП имеет секторную структуру.

В целом, плотность и магнитное поле могут варьироваться по величине в десятки раз на различных пространственных и временных масштабах, что связано как с источниками на Солнце, так и с собственной динамикой плазмы, развивающейся в ходе распространения в межпланетной среде. Особенно важны аномальные усиления солнечного ветра и ММП, вызываемые различными проявлениями солнечной активности.

Корональные дыры и гелиосферный токовый слой достаточно устойчивы и могут сохранять свою конфигурацию в течение нескольких оборотов Солнца. Поэтому в заданной точке межпланетного пространства высокоскоростные потоки солнечного ветра из данной корональной дыры будут появляться примерно через каждые 27 дней. В зоне столкновения быстрого и медленного потоков солнечного ветра формируется так называемая коротирующая область взаимодействия (КОВ), которая

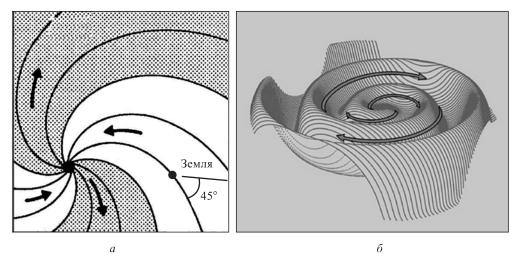


Рис. 8.2.4. Межпланетное магнитное поле: a — спиральная структура; δ — «юбка» гелиосферного токового слоя

также вращается вместе с Солнцем. Плазма, сжатая в КОВ, характеризуется высокой концентрацией более $10~{\rm cm}^{-3}$ и сильно флуктуирующим магнитным полем напряженностью более $10~{\rm hT}$ л. КОВ вызывают так называемые рекуррентные магнитные бури (Tsurutani et al., 1995), которые могут повторяться в течение многих солнечных оборотов. Такая квазистационарная картина крупномасштабной структуры солнечного ветра и ММП наиболее характерна для фазы спада и минимума активности.

С ростом солнечной активности одним из наиболее ярких ее проявлений становятся корональные выбросы массы. Магнитные облака, связанные с ними, могут распространяться на фоне спокойного (фонового) солнечного ветра со скоростями до 2000 км/с и иметь сильное и упорядоченное магнитное поле в десятки нТл. Если скорость выброса превышает скорость основного потока на локальную скорость звука, то перед ним образуется ударная волна, в переходной области за которой магнитное поле усилено сжатием. Именно такие образования вызывают самые мощные бури (Bothmer, Schwenn, 1995; Dmitriev et al., 2005а). Пример регистрации около Земли нескольких магнитных облаков в ходе всплеска солнечной активности октября—ноября 2003 г.) представлен на рис. 8.2.5.

Основным фактором, определяющим динамику магнитосферы, является величина z-компоненты $MM\Pi$ (далее обозначаемого как B_z) в гео-солнечно-магнитосферной системе координат (см. http://www.kosmofizika.ru/spravka/coordinates.htm). Ось x этой системы направлена на Солнце, ось z — приблизительно перпендикулярна плоскости эклиптики и отклоняется от направления в зенит синхронно с направлением геомагнитного диполя. Компоненты $MM\Pi$, лежащие в плоскости эклиптики, в значительной степени определяются крупномасштабной спиральной структурой $MM\Pi$, а вертикальная компонента варьируется более свободно.

Для дальнейшего изучения можно рекомендовать книги (Meyer-Vernet, 2007; Хундхаузена, 1976; Коваленко, 1983). Обзор последних результатов по тематике КОВ и КВМ приведен в недавних публикациях (Recurrent magnetic storms: Corotating Solar Wind Streams, 2006; Coronal Mass Ejections, 2006).

Солнечные космические лучи. Солнечные космические лучи (CKJ) — это спорадически появляющиеся потоки ионов и электронов, с энергиями обычно до $10 \, \Gamma$ эВ на нуклон. Если на орбите Земли (вне радиационных поясов) поток протонов

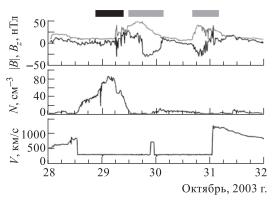


Рис. 8.2.5. Данные реального времени наблюдений солнечного ветра и ММП 28–31 октября 2003 г. на КА АСЕ. Периоды магнитных облаков (сильного упорядоченного ММП) отмечены серыми прямоугольниками. Область сжатия за ударной волной и перед облаком (большая плотность и варьирующееся ММП) — черным прямоугольником. Низкие (менее 300 км/с) значения скорости связаны с отказом прибора в высоких потоках СКЛ. В действительности пиковое значение скорости было более 2000 км/с

с энергией > 10 МэВ превышает $10 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{c}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$, то считается, что произошло солнечное протонное событие (СПС). СПС обычно наблюдаются после вспышек или других эруптивных явлений на Солнце (рис. 8.2.6). Поэтому считается, что частицы ускоряются непосредственно во время солнечных вспышек и на ударных волнах КВМ в короне или межпланетном пространстве (гл. 3; Дорман и Мирошниченко 1968; Gosling 1993; Kahler, 2001; Cane et al., 2002). Полное число частиц, инжектиру-

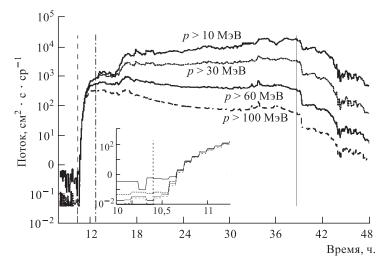


Рис. 8.2.6. Интегральные потоки протонов СКЛ, ускоренных в СПС 14-15 июля 2000 г., по наблюдениям на КА GOES-10 (http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr). Вертикальная пунктирная линия указывает время солнечной рентгеновской вспышки $\sim 10:20\,\mathrm{UT}$ (всемирного времени) 14 июля. Вертикальная штрих-пунктирная линия указывает приблизительно время первого максимума потока протонов с энергией более 100 МэВ. Момент прихода к Земле ударной волны отмечен сплошной вертикальной линией. Шкала абсцисс в часах с начала суток 14.07.2000 г.

емых в межпланетное пространство в ходе события, может превышать 10^{32} , а их суммарная энергия может быть более 10^{24} Дж, что сравнимо с электромагнитной энергией солнечных вспышек. Для задач радиационной безопасности наибольший интерес представляют всплески потоков протонов с энергией > 30~ МэВ, пиковая интенсивность которых может достигать сотен частиц на $(cm^2 \cdot c \cdot cp)^{-1}$.

Энергетический спектр СКЛ в источнике, скорее всего, является степенной функцией от энергии, но спектр, наблюдаемый в той или иной точке межпланетного пространства, может отличаться от степенного. Локальный спектр и временной профиль интенсивности СКЛ определяются функцией инжекции частиц в межпланетное пространство и закономерностями распространения до наблюдателя (в частности, диффузией на неоднородностях магнитного поля). Простейшие временные профили соответствуют мгновенной инжекции протонов в межпланетное пространство на силовую линию ММП, идущую непосредственно к наблюдателю и, как правило, хорошо описывают распространение СКЛ высоких энергий (более 100 МэВ). В этом случае форма временного профиля близка к диффузионной волне с экспоненциальным ростом, дисперсией по скоростям (более энергичные частицы долетают от Солнца до Земли быстрее) и постепенным спадом интенсивности (рис. 8.2.6, время прихода составляет порядка 1,5 ч). Временной профиль протонов с меньшими энергиями (~ 10 МэВ) существенно отличается от диффузионного. В то время как задержка их прихода после моментального ускорения должна составлять порядка 6 ч, в данном примере потоки продолжают расти в течение ~ 18 ч после солнечной вспышки вплоть до прихода ударной волны, что может объясняться, в частности, их дополнительным ускорением в межпланетном пространстве. Интенсивность потоков солнечных протонов с энергией порядка 100 МэВ после наиболее мощных событий солнечного цикла спадает в течение нескольких суток, а 10 МэВ — до нескольких оборотов Солнца. Собственный фон большинства детекторов СКЛ на космических аппаратах выше уровня потоков низкоэнергичных ГКЛ (см. следующий раздел).

Следует отметить, что поперечный (относительно направления магнитного поля) коэффициент диффузии КЛ в межпланетном пространстве подавлен по сравнению с продольным коэффициентом в 10^{-3} – 10^{-4} раз, поэтому СКЛ преимущественно распространяются вдоль силовой линии ММП. Поэтому, если источник СКЛ связан с земным наблюдателем силовой линией ММП, то говорят о благоприятном (геоэффективном) расположении источника (см. 8.4.6).

Галактические космические лучи. Галактические космические лучи (ГКЛ) — это потоки ядер и электронов, приходящих из межзвездного пространства (Мурзин, 1988). Энергетический спектр космических лучей тянется в область сверхвысоких энергий до 10^{20} – 10^{21} эВ. В области энергий 10^9 – 10^{14} эВ это степенная функция с показателем -2,75 (для дифференциального спектра). В области энергий порядка $100~{\rm M}$ эВ $-10~{\rm Г}$ эВ, поток энергетический спектр и угловое распределение ГКЛ модулируются гелиосферой и зависят от времени. Поток ГКЛ на этих энергиях составляет около $10^{-4}~{\rm cm}^2/({\rm c}\cdot{\rm cp}\cdot{\rm M}$ эВ). Заряженные частицы КЛ распространяются к наблюдателю в плазме солнечного ветра, испытывая диффузию на магнитных неоднородностях, конвекцию потоком солнечного ветра (зависящую от скорости ветра) и дрейф в крупномасштабном поле. Все эти три фактора зависят от солнечной активности, а действие первых двух усиливается и препятствует проникновению ГКЛ в гелиосферу вблизи максимума. В результате поток ГКЛ, регистрируемый на Земле антикоррелирует с циклом солнечной активности.

Помимо долговременных вариаций ГКЛ (Дорман, 1981), связанных с глобальными изменениями в гелиосфере в ходе цикла, существуют и кратковременные, связанные с локальной структурой солнечного ветра (КВМ, КОВ и т. д.) (рис. 8.2.7)

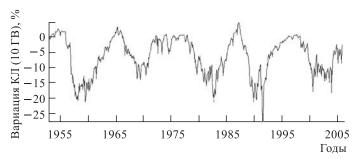


Рис. 8.2.7. Временной ход амплитуды вариаций ГКЛ на Земле (для ГКЛ с энергией более 10 ГэВ). (% к началу интервала)

(Белов и др., 1999). В частности, приход к Земле отдельных крупномасштабных структур с повышенным ММП (магнитного облака) вызывает так называемые ло-кальные Форбуш-понижения потока ГКЛ, которые имеют характерное время порядка часов-дней и амплитуду вариации до десятков процентов по сравнению со спокойным периодом.

Поток ГКЛ на несколько порядков меньше потоков СКЛ в максимуме СПС в сравнимой области энергий, однако, так как он присутствует постоянно, то на временном масштабе порядка года интегральный поток ГКЛ может быть сравним с потоком СКЛ.

8.2.4. Магнитосфера Земли

Динамика магнитосферы. *Магнитосфера* Земли формируется при обтекании солнечным ветром почти дипольного магнитного поля Земли. На дневной стороне геомагнитное поле поджато давлением солнечного ветра, и граница проходит на

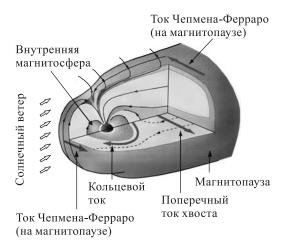


Рис. 8.2.8. Магнитосфера Земли и основные токи

расстоянии порядка 60 000 км от центра Земли, а хвост магнитосферы вытянут в антисолнечном направлении на миллионы километров. Такая искаженная относительно диполя конфигурация, создаваемая солнечным ветром, поддерживается электрическими токами, величина которых может достигать миллионов Ампер (рис. 8.2.8). Выделяют пограничные слои, заполненные замедленной и нагретой на околоземной ударной волне плазмой солнечного ветра, и отделенные от собственно магнитосферы магнитосферы магнитосферы магнитосферы магнитосферым полем.

Для лучшего понимания солнечноземного взаимодействия необходимо представлять себе сопряжение магнитосферы с ионосферой и атмосферой вдоль силовых линий магнитного по-

ля, лежащее в основе магнитосферно-ионосферных связей. Внешняя магнитосфера, структура магнитного поля в которой определяется в первую очередь его внешними источниками — магнитосферными токами (т. е., в значительной степени, зависит от межпланетной среды) проецируется в авроральные широты (авроральный овал),

в обычных условиях располагающиеся на $65-75^{\circ}$ геомагнитной широты. Полярная шапка — область на широтах выше авроральной зоны, содержит открытые силовые линии магнитного поля, уходящие в межпланетное пространство. Внутренние области магнитосферы со стабильным почти дипольным полем проецируются на умеренные широты.

Хотя гидродинамическое давление солнечного ветра определяет форму магнитосферы, передача энергии по этому каналу малоэффективна, и внутренняя динамика земной магнитосферы определяется в первую очередь $MM\Pi$, составляющим всего около 2% полной энергии солнечного ветра (Burton et al., 1975; Iijima, Potemra, 1982; Petrukovich, Rusanov, 2005). Как и в случае эруптивных событий в солнечной короне, ключевым механизмом динамики магнитосферы вероятно является процесс пересоединения (аннигиляции) магнитных полей. Магнитосфера omkpima, если B_z -компонента omkpima и геомагнитное поле на дневной стороне противоположно направлены (так называемое omkpima), пересоединение противоположно направленных (Dungey, 1961) (рис. 8.2.9), пересоединение противоположно направленных

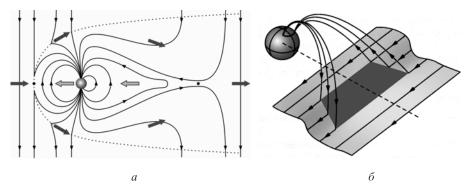


Рис. 8.2.9. Схема конвекции по Данжи при южном $MM\Pi$ (*a*). Схема формирования аврорального электроджета (*б*)

магнитных полей в подсолнечной зоне магнитопаузы приводит к переносу солнечным ветром магнитного потока (открытых силовых линий) с дневной стороны на ночную. По мере накопления потока в хвосте (в котором магнитные поля также противоположно направлены), поперечный ток хвоста периодически разрушается и пересоединение приводит к «обрыву хвоста» — к сбросу магнитного потока и плазмы частично в межпланетное пространство и частично обратно к Земле. В результате внутренняя магнитосфера наполняется горячей плазмой и происходит возврат магнитного потока на дневную сторону. Этот круговорот, составляющий основу динамики внешней магнитосферы, называют глобальной конвекцией. При разрушении тока хвоста часть его замыкается через авроральные области ионосферы, формируя авроральный электроджет (рис. 8.2.9). В ходе этого процесса возникает и одно из наиболее ярких проявлений магнитосферной активности — северное сияние, генерируемое в верхней атмосфере частицами, высыпающимися вдоль авроральных силовых линий.

При северном ММП B_z -компонента ММП сонаправлена с геомагнитным полем на дневной магнитопаузе и магнитосфера закрыта. Пересоединение возможно только между противоположно направленными линиями ММП и линиями поля, выходящими из полярных шапок. Глобальная конвекция плазмы в магнитосфере относительно слаба и, в основном, связана с динамикой пограничных слоев. Конвекция характеризуется величиной электрического поля «утро—вечер» (перепадом электрического потенциала поперек магнитосферы), которое в значительной степени

определяется соответствующей компонентой переносного электрического поля солнечного ветра (так называемым $\emph{геоэффективным}$ параметром): VB_z — произведением скорости солнечного ветра на B_z -компоненту $MM\Pi$ (см. также 8.4.5).

Подробнее эта проблематика изложена в монографиях Лайонса и Уильямса (1987), Пудовкина и Семенова (1995), Нишиды (1980).

Геомагнитные возмущения, бури и суббури. Варьирующиеся условия в солнечном ветре вызывают изменения структуры магнитосферы и, соответственно, магнитосферных токов, которые проявляются на поверхности Земли как *нерегулярные геомагнитные вариации*. Удобно характеризовать магнитосферную динамику в целом по уровню этих геомагнитных вариаций, в частности, *геомагнитными индексами* (Яновский, 1978).

Для оценки возмущенности геомагнитного поля на данной геомагнитной станции принята логарифмическая девятибалльная шкала K, где каждому баллу соответствует определенный диапазон отклонений от кривой регулярного суточного хода поля в трехчасовом промежутке. Для оценки магнитной активности всего земного шара введен индекс K_p , получаемый осреднением по 13 обсерваториям, расположенным между 50 и 63° геомагнитной широты. Индекс a_p содержит эквивалентные амплитуды в линейной шкале. Индекс A_p определяется как среднесуточное значение a_p .

Сила авроральных токов — электроджетов — характеризуется индексами AU, AL и AE = AU - AL. AU соответствует максимальному положительному отклонению горизонтальной составляющей магнитного поля от спокойного уровня по всем обсерваториям авроральной зоны, а AL — максимальному отрицательному отклонению.

 $D_{\rm st}$ -индекс — мера интенсивности кольцевого тока, проявляющегося во внутренней магнитосфере только во время магнитных бурь. На земной поверхности его влияние сказывается в уменьшении горизонтальной составляющей магнитного поля. Вычисляется $D_{\rm st}$ -индекс по сети низкоширотных станций.

Если K_p -индекс используется для общей характеристики возмущенности магнитосферы, то AE- и $D_{\rm st}$ -индексы более удобны для описания основных составляющих: seomarhumhix суббурь и бурь. Появление терминов «буря» и «суббуря» объясняется, прежде всего, историческими причинами. Магнитными бурями называют периоды экстремальных вариаций геомагнитного поля, регистрирующихся по всему земному шару и сопровождающихся значительными возмущениями и по всем другим каналам наблюдений (радиопомехи в ионосфере, северное сияние не только в полярных, но и в умеренных широтах и пр.). Наблюдаемые более часто магнитные вариации в полярных широтах и связанные, в том числе, с обычным северным сиянием, названы магнитными суббурями.

Со временем стало ясно, что магнитные суббури — в некотором смысле элементарный процесс, связанный с накоплением и сбросом энергии в хвосте как при обычных условиях в межпланетной среде (южное ММП в пределах 5 нТл, электрическое поле солнечного ветра до 2–4 мВ/м) так и во время бурь. Длительность изолированной суббури составляет 1–2 ч, общая энергетика — до 10^{15} Дж, индекс AE — до сотен нТл, повторяемость — один раз в несколько часов.

Магнитные бури обладают значительно большей энергетикой — 10^{16} – 10^{18} Дж и вызываются солнечным ветром с аномально большими величинами скорости, плотности, ММП (Gonzalez et al., 1994). Одним из общепринятых критериев начала бури считается наличие южной компоненты ММП более 10 нТл в течение не менее чем 3 ч. Усиленное внешнее воздействие приводит к интенсификации магнитосферных токов, приводящей к распространению их влияния вглубь магнитосферы, и возрастанию суббуревой активности (AE до тысяч нТл). Поэтому во время бурь авроральная зона, в которую проецируются внешние зоны магнитосферы, сдвигается к экватору

(до $40-50^\circ$ магнитной широты во время очень сильных событий), что приводит к распространению зоны сияний и авроральных геомагнитных вариаций в умеренные широты. Плазма, попавшая из хвоста во внутреннюю магнитосферу, начинает дрейфовать вокруг Земли, формируя кольцевой ток на удалении $15\,000-40\,000$ км от Земли. Его величина по индексу $D_{\rm st}$ является основной характеристикой бури.

Соотношение между бурями и суббурями иллюстрирует рис. 8.2.10 (Petrukovich, 2004). При появлении южного ММП $B_z \sim -10$ нТл, развивается магнитная буря,

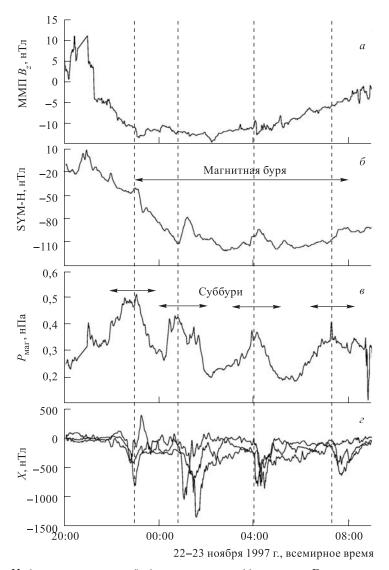


Рис. 8.2.10. Наблюдения магнитной бури и серии суббурь: $a-B_z$ -компонента ММП по данным KA «Wind»; $\delta-$ геомагнитный индекс SYM-H (аналог $D_{\rm st}$); $\delta-$ магнитное давление (мера свободной магнитной энергии) в хвосте магнитосферы по данным KA IMP-8; $\epsilon-$ магнитограммы ряда станций авроральной зоны. Показаны периоды магнитной бури и четырех мощных суббурь (начала помечены вертикальными линиями)

характеризующаяся индексом SYM-H (аналогом $D_{\rm st}$) ~ -100 нТл и длительностью более двенадцати часов. За это время зарегистрировано четыре мощных суббури — периоды накопления и сброса магнитного потока в хвосте (регистрируемые как максимумы в магнитном давлении по данным KA IMP-8). В моменты сброса наблюдаются всплески геомагнитных вариаций на ряде станций авроральной зоны, формирующие индекс AL. Более подробно о геомагнитной активности можно прочитать в книге Нишиды (1980).

Часто бурями называют периоды с $D_{\rm st}<-50$ нТл или $K_p>4$. В солнечный максимум бури следуют раз в несколько дней ($K_p>5$ регистрируется порядка тысячи дней за цикл). Супербури ($K_p=9$, $D_{\rm st}\sim-(300$ –400)) — происходят несколько раз за солнечный цикл. Необходимо отметить, что какого-либо взаимооднозначного соотношения между различными индексами не существует, например, умеренные бури с $D_{\rm st}\sim-(100$ –200) могут иметь K_p от 4 до 8 (Yermolaev, Yermolaev, 2006). Этот факт объясняется тем, что разные индексы характеризуют различные физические явления в магнитосфере, вклад которых в динамику конкретных событий может варьироваться.

Источники рядовых суббурь в межпланетной среде — обычно собственные вариации $MM\Pi$ и солнечного ветра, а источники бурь — это зоны KOB и KBM, в которые попадает Земля (Recurrent magnetic storms: Corotating Solar Wind Streams, 2006; Coronal Mass Ejections, 2006; Yermolaev et al., 2005). Сила рекуррентных бурь от KOB невелика ($D_{\rm st}$ -вариация находится в пределах 200 нТл), но они могут длиться вплоть до нескольких суток. Это связано с относительно большой продолжительностью высокоскоростных потоков и умеренными характеристиками $MM\Pi$ в них (электрическое поле солнечного ветра до 6–8 мВ/м). Слабые бури с K_p 3–4 могут вызываться и просто достаточно длительными высокоскоростными потоками солнечного ветра. В KBM электрическое поле солнечного ветра может достигать десятков мВ/м и бури могут быть гораздо мощнее. О связи солнечной и геомагнитной активности с точки зрения прогноза рассказано в разд. 8.4.

Внутренняя магнитосфера. Внутренние области магнитосферы выделяются прежде всего по стабильной почти дипольной конфигурации магнитного поля. В этой зоне находятся радиационные nosca — области захвата энергичных частиц, $nnasmoc\phiepa$ — холодная плазма ионосферного происхождения, вращающаяся вместе с Землей, а также, во время магнитных бурь, кольцевой ток. Размер внутренней магнитосферы условен (30 000–60 000 км) и зависит от степени возмущенности магнитосферы. Динамика плазмы здесь определяется дрейфовыми движениями с сохранением адиабатических инвариантов в относительно стабильном магнитном поле (Редерер, 1972). Характерным параметром внутренней магнитосферы является L-оболочка, равная удалению данной силовой линии от Земли в плоскости магнитного экватора в единицах радиуса Земли.

Радиационные пояса Земли (РПЗ) (Вернов и др. 1965, Тверской 1968, Лайонс и Уильямс 1987) образованы относительно стабильно захваченными в геомагнитной ловушке энергичными заряженными частицами: атомными ядрами (в основном, протонами) с энергиями от сотен кэВ до сотен МэВ и электронами с энергиями от десятков кэВ до десятков МэВ (рис. 8.2.11). Потоки электронов с энергиями > 100 кэВ имеют два максимума: на $L \sim 2$ и $L \sim 5$, и формируют внешний и внутренний пояса. Протонный пояс имеет только один максимум, внутренний. В целом, наполнение и границы поясов определяются балансом характеристик источника, стабильностью захвата и скоростью потерь. Радиационные пояса — главный источник магнитосферной радиации.

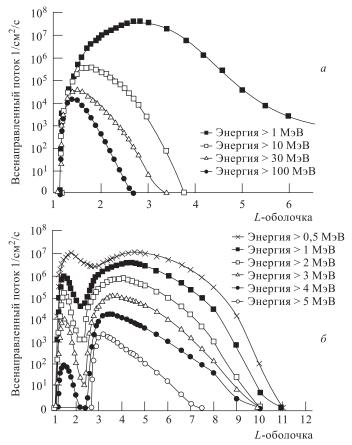


Рис. 8.2.11. Потоки протонов (a) и электронов (б) РПЗ в плоскости геомагнитного экватора (http://www.spenvis.oma.be)

Потоки частиц во внутреннем поясе довольно стабильны. Поскольку в обычных условиях частицы с энергиями даже в сотни МэВ не могут проникнуть в него из межпланетной среды, основным источником внутреннего пояса являются вторичные ионы, рождающиеся при взаимодействии космических лучей с верхней атмосферой. Нижняя граница (зона отражения частиц в магнитной ловушке) внутреннего РПЗ практически соприкасается с атмосферой в области Южно-Атлантической магнитной аномалии (геомагнитное поле здесь наиболее ослаблено и частицы подходят ближе всего к Земле), создавая мощный поглотитель частиц РПЗ за счет их взаимодействия с атомами нейтральной атмосферы. Так как в минимуме солнечного цикла потоки ГКЛ, формирующие внутренний пояс, максимальны, а плотность внешней атмосферы минимальна, то наполнение внутреннего РПЗ антикоррелирует с солнечным циклом. Другой источник — заброс частиц электромагнитным импульсом при резком сжатии магнитосферы, может привести к формированию долгоживущего дополнительного РПЗ. Такого рода явления довольно редки, поскольку вызваны экстремально сильными возмущениями солнечного ветра (Павлов и др., 1993; Гинзбург и др., 1993).

Внешний РПЗ, заполненный энергичными электронами, является гораздо более динамичным образованием. Во время магнитных бурь потоки электронов здесь

возрастают на несколько порядков величины в широком диапазоне энергий от кэВ до МэВ. Источником таких электронов являются внутримагнитосферные процессы ускорения и переноса заряженных частиц (Li, Temerin, 2001; Dmitriev, Chao, 2003).

Проникновение космических лучей в магнитосферу. Земное геомагнитное поле отражает часть космических лучей. В приближении дипольного поля и отсутствия атмосферы импульс p_{\min} , требуемый протону для достижения поверхности Земли под углом ω на магнитной широте λ , определяется из теории Штермера:

$$p_{\min} = \frac{59\cos^4 \lambda}{(1 + \sqrt{1 - \cos \omega \cos^3 \lambda})^2}.$$

На экваторе поверхности Земли могут достигнуть только частицы с достаточно большими энергиями $\sim 15~\Gamma$ эВ. В полярных областях легко проникают вглубь даже протоны с энергией менее 1 МэВ: они проходят через внешнюю магнитосферу с относительно слабым магнитным полем и приближаются к Земле, двигаясь вдоль силовых линий геомагнитного поля, почти перпендикулярных здесь поверхности. Таким образом, с учетом энергетического состава, СКЛ попадают к поверхности Земли главным образом на высоких широтах, а поток ГКЛ существенно уменьшается.

Во время магнитных бурь жесткость геомагнитного обрезания на данной широте уменьшается, что связано с общим ослаблением поля кольцевым током и смещением авроральной зоны (проекции внешней магнитосферы) к экватору (Иванова и др., 1985; Nymmik, 1999; Leske et al., 2001). Во время геомагнитной бури с $D_{\rm st}\sim -(300-400)$ нТл область прямого проникновения СКЛ опускается до магнитной широты $\lambda\sim 50^\circ$.

8.2.5. Ионосфера и атмосфера

Структура атмосферы и ионосферы определяется, прежде всего, высотной зависимостью. Тропосфера (до 20 км) характеризуется падением температуры с высотой, так как здесь основным источником энергии является нагрев поверхности. В стратосфере (20–50 км) температура начинает расти, что связано с поглощением солнечного мягкого УФ-излучения озоном. Выше 50 км, в мезосфере, начинается охлаждение, связанное с возможностью свободной радиации тепла в открытый космос. В термосфере (более 80–90 км) температура снова растет за счет поглощения солнечного коротковолнового излучения.

Атмосфера способна эффективно поглощать космические лучи с энергией до нескольких ГэВ/нук, порождая потоки вторичных частиц меньших энергий и электромагнитное излучение (Мурзин, 1988). Максимумы интенсивностей вторичных частиц наблюдаются на высотах до 15 км. Ниже, у поверхности Земли основным источником ионизации воздуха являются высокоэнергичные ГКЛ. Мягкое УФИ поглощается в стратосфере. УФИ и рентгеновское излучение поглощаются в верхней атмосфере, приводя к ее ионизации и формированию ионосферы (Иванов-Холодный и Никольский, 1969).

Концентрация нейтральных частиц в ионосфере всегда на порядки выше, чем ионов и электронов. Слой D (60–90 км) характеризуется слабой ионизацией (менее 10^3 см $^{-3}$), создаваемой солнечным рентгеновским излучением (и эпизодически СКЛ) и почти пропадает в ночное время (рис. 8.2.12). Ниже слоя D электроны в свободном виде отсутствуют. На высотах 90-120 км находится слой E (концентрация днем 10^5 , ночью — 10^3 см $^{-3}$). Область E исключительно важна в смысле формирования магнитосферно-ионосферных связей, так как потоки высыпающихся магнитосферных частиц приводят к сильной дополнительной ионизации на этих высотах. Здесь же замыкаются магнитосферные токи: в E-слое электроны замагничены (вморожены) —

их гирочастота много больше частоты столкновений), а ионы незамагничены (частота соударений сравнима с гирочастотой), что позволяет ионам двигаться отдельно от электронов поперек силовых линий магнитного поля и переносить таким образом электрический ток. Выше лежит зона F слоя, в которой на высотах 250–400 км достигается абсолютный максимум концентрации электронов.

Широтная структура ионосферы определяется магнитосферно-ионосферными связями (Ляцкий и Мальцев, 1983), зависит от сезона, местного времени, особенностей местной динамики атмосферы (прежде всего нейтральных ветров), фазы солнечного цикла и пр. (Sojka, 1989). Модельный широтный профиль максимальной концентрации для момента солнцестояния показан на рис. 8.2.13. В авроральной зоне (65–75°),

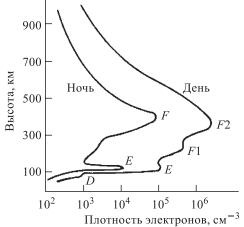


Рис. 8.2.12. Высотная структура ионосферы

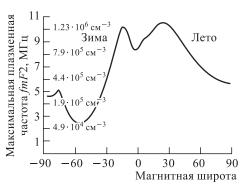


Рис. 8.2.13. Модельный профиль широтной структуры ионосферы в единицах максимальной плазменной частоты и плотности плазмы (см. также 8.3.2)

связанной с внешней магнитосферой, формируется локальный пик концентрации плазмы. В умеренных широтах расположен главный ионосферный провал — резкое уменьшение характерной плотности ионосферы. Он тянется до низких широт, где формируется абсолютный максимум плотности — экваториальная аномалия, имеющая двугорбую структуру (на $\pm 20^\circ$ широты) (Фаткуллин, 1982; Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Гальперин и др. 1990).

Во время магнитных бурь (Karpachev et al., 1995; Prölss, 1995; Szuszczewicz et al., 1998) полярная шапка расширяется, авроральная зона и главный ионосферный провал сдвигаются в сторону низких широт, а горбы экваториальной аномалии расходятся от экватора. Движение ионосферной плазмы, высыпания магнитосферных частиц, дополнительные электрические поля и токи создают условия для развития плазменных неустойчивостей и, как результат, формирования неоднородностей электронной концентрации различных пространственных масштабов. Наиболее интенсивные неоднородности тяготеют к авроральной зоне и экваториальным широтам. Развивающиеся в Е-слое две токовые системы — авроральный и экваториальный электроджеты приводят к сильному разогреву плазмы. В ночной авроральной зоне неоднородности электронной концентрации формируются во основном из-за варьирующих и неоднородных высыпаний магнитосферных частиц, становящихся основным источником ионизации. В экваториальной ионосфере магнитные возмущения приво-

дят к резкому усилению интенсивности формирования неоднородностей в результате развития плазменной неустойчивости Рэлея—Тэйлора (Heelis, 2004). Более разреженная холодная плазма нижней ионосферы начинает «всплывать» наверх в более плотную и горячую плазму области F, образуя так называемые «пузыри» пониженной плотности (plasma bubbles) (рис. 8.2.14).

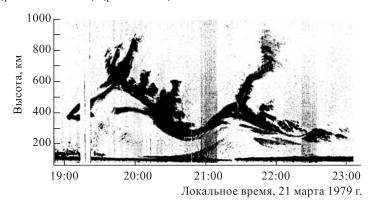


Рис. 8.2.14. Радиоотражения от плазменных пузырей, полученные с помощью радара некогерентного рассеяния (длина волны 3 м) в Джикамарке (Перу)

Для дальнейшего изучения можно также рекомендовать книги Харгривса (1982), Schunk, Nagy (2004), Ondoh, Marubashi (2001).

8.3. Эффекты космической погоды

К основным практически важным условиям окружающей среды, определяемым СЗС, относятся: космическая радиация (коротковолновое солнечное излучение, СКЛ, ГКЛ, магнитосферная радиация), степень ионизации и нагрева ионосферы и атмосферы, вариации геомагнитных и геоэлектрических полей. Несмотря на то, что их влияние невидимо человеческому глазу, ему подвержены многие современные технологические системы, и, через сложную систему взаимодействия, живые организмы. Выделяют следующие эффекты «космической погоды»:

- 1) воздействие космической радиации на аппаратуру космических аппаратов и самолетов, радиационная угроза для космонавтов и экипажей высотных самолетов;
- 2) изменения в условиях распространения радиоволн и помехи в системах связи и навигации, создаваемые ионосферой;
 - 3) изменение орбит спутников из-за нагрева верхней атмосферы;
- 4) геоиндуцированные (паразитные) токи в протяженных проводящих объектах и системах: трубопроводах, кабелях, линиях электропередач и связи, железных дорогах в приполярных широтах;
 - 5) модификация химического состава и свойств атмосферы Земли;
 - 6) воздействие на биологические объекты и человека.
- В данном разделе кратко описаны основные механизмы воздействия, приведены примеры некоторых практических задач. В силу многообразия обсуждаемой тематики, это изложение носит вводный характер и снабжено большим количеством ссылок на специальную литературу. Приведенный здесь перечень эффектов, конечно, не является полным. Например, практически не рассмотрены факторы воздействия, приводящие к деградации различных поверхностей, и определяемые, например, потоками атомарного кислорода O^+ , другими заряженными частицами низкой энергии,

УФ-излучением Солнца, эффекты воздействия метеорной материи и т. д. В целом, изучением данной проблематики занимается отдельная дисциплина — «космическое материаловедение».

8.3.1. Космическая радиация

А.А. Петрукович, А.В. Дмитриев, В.М. Петров

Введение. Под радиацией (часто также используется термин ионизирующее излучение) понимают потоки элементарных частиц, ядер и электромагнитных квантов в широком диапазоне энергий, взаимодействие которых с веществом вызывает ионизацию его атомов и молекул. Конкретные механизмы передачи энергии веществу определяются типом и энергией частицы и сводятся к следующим основным взаимодействиям (см. например Акимов и др., 1967; Чумаков, 2004):

- ионизационные и радиационные потери ядерных частиц;
- рассеивание частиц на ядрах среды;
- рассеяние квантов на электронах атомов;
- ядерные реакции.

В результате этих взаимодействий разрушается атомная и молекулярная структура вещества. Воздействие космической радиации является одной из основных причин выхода из строя космических аппаратов, а также существенным ограничивающим фактором при выборе их рабочих орбит (Barbieri, 2004; Iucci, 2005; Baker, 1998). Доза, получаемая космонавтами на орбитальной станции, существенно превышает годовые пределы доз, установленные для персонала предприятий атомной промышленности, а выход в открытый космос во время солнечного протонного события может привести к значительному дополнительному облучению космонавта. Поэтому и прогноз радиационной обстановки в космическом пространстве и изучение влияния космической радиации на биологические объекты и технические системы, функционирующие в космосе, составляют одну из основных прикладных задач современной гелиогеофизики.

Основные практически важные источники космической радиации это галактические космические лучи (энергетический спектр до 10^{19} эВ/нуклон), солнечные космические лучи (в диапазоне энергий до 1000 МэВ), электроны (до 10 МэВ) и ионы (до 400 МэВ) радиационных поясов Земли. Наиболее радиационно-опасными являются частицы с энергиями более 30-50 МэВ. В ионный компонент основной вклад дают протоны и альфа-частицы (последние составляют несколько процентов). Есть также небольшая доля и более тяжелых ядер. Для большинства типов космической радиации основным механизмом передачи энергии веществу являются ионизационные потери, т. е. вырывание электрона с внешней оболочки атома за счет передачи ему части энергии налетающей частицы или генерация электронно-дырочных пар в веществе. Кроме этого для частиц с энергией, превышающей несколько 100 Мэв/нуклон, возможны ядерные реакции, порождающие значительное вторичное излучение (нейтроны, мезоны, гамма-кванты и фрагменты ядер), которое также следует учитывать при анализе радиационной обстановки.

Рассмотрим ниже основные физические характеристики, описывающие воздействие радиации, основные эффекты, вызываемые ею, а также некоторые практические ситуации, классифицированные по типу орбиты. В этой же части представлена и близкая проблема внешней электризации спутников.

Основные характеристики радиации. Характеристикой воздействия отдельной ионизирующей частицы на вещество (ионизационных потерь) является линейная передача энергии (ЛПЭ), равная средней энергии, передаваемой веществу на единицу длины траектории в заданной окрестности этой траектории. В различных приложениях способы вычисления ЛПЭ могут отличаться. ЛПЭ обычно не вклю-

⁷ Плазменная гелиогеофизика

чает акты передачи энергии, в которых появляются «длиннопробежные» частицы (например, фотоны), отдающие свою энергию веществу на больших расстояниях от трека данной заряженной частицы. ЛПЭ часто выражают в единицах кэВ/мкм или, с учетом нормировки на плотность вещества в MэВ \cdot см 2 /г. В первом приближении ЛПЭ пропорциональна ионизационным потерям частицы, описываемым формулой Бете—Блоха (Акимов, 1967; Valtonen, 2005):

$$-\frac{dE}{dx} \sim \frac{nz^2Z}{m_eV^2}.$$

Передача энергии пропорциональна квадрату заряда частицы z, атомному номеру среды Z, плотности среды n и обратно пропорциональна квадрату скорости частицы V. Наиболее эффективно тормозятся частицы с меньшей скоростью. Это приводит к двум важным следствиям: во-первых, наибольшее выделение энергии на единицу длины пробега происходит в конце траектории перед остановкой частицы. Во-вторых, более легкие частицы (например, электроны), обладающие при той же энергии большей скоростью, теряют меньше энергии на единицу длины пробега. Тяжелые многозарядные частицы тормозятся наиболее эффективно. Частицы с большой ЛПЭ создают более плотные ионизационные треки, приводящие к большим локальным повреждениям, но проникают на меньшую глубину, тогда как частицы с малой ЛПЭ («длиннопробежные») проникают более глубоко. Например, электрон, имеющий энергию 1 МэВ, проходит через алюминиевую стенку толщиной несколько миллиметров, тогда как протон с такой же энергией имеет пробег 10-20 мкм. ЛПЭ используется для определения как глубины проникновения частиц, так и локального энерговыделения. На ее основе рассчитываются различные дозиметрические функционалы, характеризующие радиационные повреждения в физических и биологических объектах.

Энергия ионизирующего излучения, поглощенная единицей массы облучаемого вещества, называется поглощенной дозой. Ее единица измерения в системе СИ — грэй (1 $\Gamma p = 1 \text{ Дж/кг}$). В некоторых случаях применяется устаревшая внесистемная единица рад (1 рад = $100 \text{ эрг/r} = 10^{-2} \text{ Гр}$). Упомянем и об используемой иногда характеристике рентгеновского и гамма-излучения — экспозиционной дозе. При облучении с экспозиционной дозой в 1 рентген в 1 см³ сухого атмосферного воздуха образуются ионы с суммарным зарядом, равным единице электрического заряда СГС ($2,08 \cdot 10^9$ пар ионов, 1 рентген = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг). Типичные годовые дозы от различных источников космической радиации приведены в табл. 8.3.1.

Таблица 8.3.1

Источник радиации	Годовая доза радиации в Гр		
источник радиации	на поверхности КА	за защитой 1 г/см ²	за защитой 5 г/см ²
Внутренний радиацион. пояс	10 ¹⁰	$10^3 - 10^4$	$3\cdot 10^2 3\cdot 10^3$
Внешний радиацион. пояс	$10^9 - 10^{11}$	$10^2 - 10^4$	$10^1 - 10^2$
СКЛ мощная вспышка	$10^3 - 10^5$	1-10	0,3-3
ГКЛ	0,01-0,1	0,01-0,1	0,01-0,1

Основные радиационные эффекты. Эффекты, возникающие при облучении живых организмов, определяются не только дозой, но и видом излучения, в частности его ЛПЭ (Кудряшов, 2004; O'Sullivan, 2004). Очевидно, что в целом более короткопробежные частицы, создающие большую плотность ионизации в тканях, более опасны. Для учета специфики проявления последствий облучения частицами с высокими

значениями ЛПЭ введена специальная дозиметрическая величина — эквивалентная доза. Ее единица зиверт равна произведению дозы в 1 Гр на коэффициент качества излучения, определяющий во сколько раз эффект от воздействия излучения данного вида больше эффекта от стандартного излучения (гамма-излучения с энергией 200 кэВ) при одинаковых поглощенных дозах. Коэффициенты качества регламентированы на основе многочисленных радиобиологических экспериментов (табл. 8.3.2). Высокое значение коэффициента качества нейтронов объясняется тем, что они рождают ядра отдачи (как правило, заряженные частицы с высоким ЛПЭ), а также могут захватываться ядрами, приводя к их дальнейшему радиоактивному распаду с образованием осколков деления, обладающих очень большими значениями ЛПЭ.

Таблица 8.3.2

Вид частиц	Качество	
Фотоны, электроны	1	
Нейтроны	5-20 (в зависимости от энергии)	
Протоны	5	
Альфа-частицы, тяжелые ядра, осколки деления	20	

Основные неблагоприятные эффекты воздействия радиации на биологические объекты связаны с нарушением структуры белков на клеточном уровне, в результате которых происходит гибель клеток, либо их трансформация. Количество таких событий увеличивается с ростом радиационной нагрузки. Если интенсивность репарационных процессов в облученном организме недостаточна для восстановления клеток, развивается радиационное поражение, которое может привести к гибели организма. Для исключения (или сведения к приемлемому уровню) степени радиационного поражения ограничивают дозу облучения, вводя так называемые пределы дозы (НРБ-99, 1999; ООКОКП - 2004, 2004). Ограничения облучения за длительный период (за год) устанавливают для возможности проведения в случае необходимости защитных мероприятий, исключающих отдаленные неблагоприятные последствия облучения (канцерогенные эффекты, катаракты, сердечно-сосудистые заболевания и т.п.). Для населения они составляют 1 мЗв/год, для работающих в атомной промышленности 20 мЗв/год, для российских космонавтов — 500 мЗв/год. При этом для населения доза облучения одного человека за жизнь (примерно 70 лет) не должна превышать 70 мЗв, а для двух указанных групп работников — 1000 мЗв. Для ограничения вероятности развития острой лучевой болезни, вызываемой значительными дозами облучения (превышающими 1 Зв) за короткий промежуток времени, установлены нормативы, ограничивающие острое облучение: 100 мЗв для наземного персонала и 150 мЗв для космонавтов. Для соблюдения указанных нормативов принимаются специальные защитные мероприятия (создаются защиты веществом, снижающие уровни радиационного воздействия на рабочих местах, регулируется время пребывания в зонах с повышенной мощностью дозы, осуществляется контроль радиационной обстановки и т. д.). Указанные мероприятия являются обязательным компонентом систем радиационной безопасности и обеспечивают возможность снизить неблагоприятные последствия радиационного воздействия до приемлемых уровней.

Несколько по другому оценивается характер радиационных повреждений в технических системах. Накопление в материалах электрических и структурных повреждений, вызываемых отдельными частицами, создает эффект полной поглощенной дозы. Он особенно опасен для современных электронных компонентов и интегральных схем, состоящих из микроскопически малых транзисторов и других электрических

элементов. Дефекты кристаллической решетки, накопление зарядов в слоях диэлектриков, изменения характеристик границ раздела приводят к деградации электрических и функциональных характеристик (возрастают обратные токи переходов, энергопотребление, ухудшаются временные характеристики и т. п.) вплоть до полного отказа отдельных элементов. Обычно стойкость интегральных схем составляет порядка 10^2 Гр.

Выделяют также эффект неионизирующей дозы — упругого и неупругого взаимодействия излучения с атомами вещества, сдвигающего их из узлов кристаллической решетки и приводящего к структурному повреждению материалов, открытых непосредственному воздействию излучения (солнечных панелей, различных датчиков, пленок). Наиболее значительный вклад в такое воздействие вносят протоны с энергиями более 10 МэВ. Более подробно эти эффекты освещены в специальной литературе (Чумаков, 2004; Луценко, 1990).

Эффект объемной электризации связан с тем, что релятивистские электроны (напомним, что это «длиннопробежные» частицы), проникающие достаточно глубоко сквозь обшивку, тормозятся уже на внутренних элементах и образуют так называемый «объемный заряд» в диэлектриках (Baker et al., 1997; Koskinen, et al., 1999). Если потоки электронов достаточно велики, то заряд не успевает рассасываться, достигает критических величин и вызывает микропробой, что ведет к нарушению работы бортовой электроники. Накопленный внутренний заряд становится достаточным для пробоя при сохранении потоков электронов с энергией > 2 МэВ и интенсивностью $> 10^3$ см $^{-2}/(\text{с}\cdot\text{ср})$ в течение нескольких дней (Baker et al., 1997).

Прохождение даже одиночных энергичных заряженных частиц через современную электронику может вызвать ряд негативных эффектов, называемых одиночными сбоями (Кузнецов и Ныммик, 1994; Кузнецов, 2005). Если в полупроводниковом элементе (например ячейке памяти) возникает большое количество свободных зарядов вдоль трека пролетевшей частицы, то он может изменить свое логическое состояние, происходит одиночный сбой (Miroshkin, Tverskoy, 1998; Pickel, 1996). Также могут возникать ложные срабатывания, кратковременные импульсные сигналы («иголки») на выходах аналоговых и цифровых схем и пр. Такие изменения могут быть обратимыми (SEU — single event upset) или необратимыми (latch-up). При необратимых изменениях элемент «защелкивается» в новом состоянии и остается в нем до отключения питания. В некоторых случаях (power latch-up) возможно разрушение элемента или всего кристалла из-за увеличения тока и перегрева кристалла. Способность заряженной частицы вызвать одиночный сбой определяется главным образом такой характеристикой как линейная передача энергии (ЛПЭ) — интенсивно теряющие энергию частицы оставляют большую энергию в микроскопических элементах и поэтому основной вклад в этот вид помех дают энергичные протоны и ядра гелия (более тяжелые ядра редки).

Вариантом одиночных сбоев является нетепловой шум (паразитные сигналы), генерируемый высокоэнергичными частицами космических лучей в чувствительных элементах различных детекторов, в том числе находящихся под обшивкой (см., например, Dmitriev et al., 2005b).

Для защиты от радиационной угрозы применяются конструктивные решения, обеспечивающие максимально возможную пассивную защиту наиболее чувствительных узлов, используются наиболее устойчивые к радиации микросхемы, производится резервирование некоторых жизненно важных узлов. Так же разрабатываются специальные методы контроля за электрическим и логическим состоянием электронных схем: за величинами токов и напряжений питания, за зависанием или непредусмотренными операциями бортовых программ, контроль состояния оперативной памяти и пр.

Внешняя электризация. Потоки заряженных частиц космической плазмы, падающие на тело (космический аппарат), вызывают его поверхностное электростатическое заряжение (внешнюю электризацию), которое продолжается до тех пор, пока тело не приобретает равновесный потенциал (называемый «плавающим»), при котором электрический ток между плазмой и телом становится равным нулю. Если потенциал распределяется неоднородно по диэлектрическим частям поверхности КА, то это может привести к электрическим разрядам. Таким же образом может формироваться и дифференциальное заряжение внутренних поверхностей конструкции КА, часто называемое внутренней электризацией. Образующиеся в момент разрядов электромагнитные помехи и токи, проникая в электронные цепи бортовых приборов, нарушают работу аппаратуры (Милеев и Новиков, 1986). Хотя эта проблема не имеет прямого отношения к радиационной угрозе, но, так как практически опасные потенциалы, достигающие десятков киловольт, формируются электронами внешнего радиационного пояса с энергиями 1–100 кэВ, ее логично рассмотреть в этом разделе.

Значение плавающего потенциала V_s определяется решением нелинейного уравнения токового баланса

$$I_e(V_s) - [I_i(V_s) + I_n(V_s) + I_{ph}(V_s) + I_{th}(V_s) + I_a(V_s) + I_s(V_s)] = 0.$$

 I_e и I_i — токи электронов и ионов плазмы, падающие на тело, I_n — ток (возможно) приходящий от соседних элементов поверхности. Остальные токи соответствуют частицам, покидающим тело: I_s — токи вторичных электронов, выбитых из поверхности ионами и электронами плазмы, а также рассеянных (отраженных) электронов; I_{ph} — ток фотоэлектронов (при наличии солнечного излучения); I_{th} — ток термоэлектронной эмиссии (при высокой температуре поверхности); I_a — ток активного излучателя (при включенной системе коррекции потенциала).

Влияние отталкивающего потенциала (для определенного сорта частиц) можно учесть множителем $\sim \exp(-qV_s/E)$, где q — заряд данного сорта частиц, E — его характерная энергия. Влияние притягивающего потенциала определить более сложно, здесь надо рассматривать различные траектории частиц с учетом структуры электрического и магнитного поля в окрестности тела.

Оценку величины потенциала можно получить и более простым способом. Обычно в реальной ситуации один из токов доминирует и роль плавающего потенциала, в сущности, сводится к тому, чтобы, оттолкнув (или притянув обратно) часть частиц, снизить этот доминирующий ток до уровня остальных составляющих. Для этого потенциал должен быть несколько больше (с учетом знака заряда) характерной энергии доминирующего компонента.

В простейшем случае максвелловской плазмы, состоящей из электронов и протонов с одинаковой температурой, электронная тепловая скорость (и поток, падающий на поверхность) в корень (M_i/M_e) раз больше ионной. В результате потенциал тела отрицателен: $V_s \sim -\ln(I_{oi}/I_{oe}F(V_s)) \sim -3T_e$, где температура выражена в электронвольтах, а потенциал в Вольтах (Козлов, 1969). Так как отношение невозмущенных токов I_{oi}/I_{oe} ($I_o \sim nT^{1/2}$), а также достаточно медленно изменяющаяся функция $F(V_s)$, описывающая притяжение ионов, стоят под логарифмом, эта оценка достаточно универсальна. Ситуация с доминированием токов электронов и ионов плазмы реализуется в ионосфере, где в результате тело приобретает малый отрицательный потенциал порядка единиц вольт. При более точных расчетах здесь, однако, надо учитывать возможность высыпаний энергичных частиц из магнитосферы, и то, что спутник движется через плазму на сверхзвуковой скорости.

Во внешней магнитосфере плазма сильно разрежена и в токовом балансе доминирует фототок ($\sim 10^{-9}~{\rm A/cm^2}$). Плавающий потенциал положителен, определяется балансом уходящих фотоэлектронов и приходящих электронов плазмы и составля-

ет обычно единицы вольт (характерная энергия выбитых фотоэлектронов порядка 1-1.5 \Rightarrow B).

Во внешнем радиационном поясе во время сильных суббурь и магнитных бурь появляется большое количество электронов с энергиями 1–100 кэВ, которые начинают преобладать в токовом балансе над фотоэлектронами. Плавающий потенциал по знаку становится отрицательным, а по величине — порядка температуры этой компоненты плазмы и достигает нескольких киловольт (здесь необходимо учитывать также вклад тока вторичных электронов, снижающего потенциал). Дифференциальное заряжение разных элементов поверхности до таких величин чрезвычайно опасно с точки зрения возникновения электрических разрядов. Для того, чтобы обезопасить спутник, возможно большая часть его поверхности металлизируется, что исключает дифференциальное заряжение. Более точный расчет потенциала может быть проведен численно с учетом реальной геометрии спутника и всех компонентов токового баланса.

Радиационная обстановка и эффекты на различных орбитах. В межпланетной среде радиационный фон определяется космическими лучами галактического (ГКЛ) и солнечного (СКЛ) происхождения, определяющими накопленную за время полета дозу и темп одиночных сбоев. Доза от ГКЛ является серьезным препятствием для будущих межпланетных пилотируемых полетов к Марсу (порядка нескольких зиверт в минимуме солнечной активности) (Реtrov, 2004b). В этом смысле более предпочтительным является период максимума солнечного цикла, когда из-за изменения свойств межпланетной среды плотность потока и доза от ГКЛ уменьшаются примерно в два раза (см. 8.2.3). Однако положение осложняется возрастанием угрозы СКЛ. Доза, полученная за время одного очень крупного солнечного протонного события космонавтом, находящимся за пределами корабля во время межпланетного полета, может составить несколько зиверт. Необходимо отметить, что от относительно низкоэнергичных частиц СПС можно укрыться в наиболее защищенных отсеках космического аппарата или в специально созданном небольшом отсеке (радиационное убежище) с толщиной стенок, достаточной для исключения дополнительного облучения СКЛ. От ГКЛ такая защита менее эффективна из-за увеличения выхода вторичного излучения, генерируемого высокоэнергичными частицами в материалах конструкции (см., например, Kiefer, 2005). Концепция радиационного убежища в настоящее время является одной из рабочих при рассмотрении вариантов пилотируемого полета на Марс.

Спорадические СПС приводят к высокому темпу одиночных сбоев в работе бортовой электроники (см. Iucci et al., 2005). Одной из наиболее ярких иллюстраций в этом смысле является состояние спутника SOHO (солнечного телескопа, находящегося в передней солнечно-земной точке либрации) (Brekke et al., 2004).

- 1. Изображение солнечной короны в этом эксперименте регистрируется высокочувствительной ССD-матрицей, которая в нормальных условиях способна регистрировать свечение отдельных звезд, корональных стримеров и СМЕ. Во время мощных СПС СКЛ генерируют в полупроводнике матрицы шумовые сигналы в виде треков, интенсивность которых может превышать сигнал солнечной короны (рис. 8.3.1).
- 2. Частота единичных сбоев в оперативной памяти SOHO (2 Гбит), вызванных ГКЛ, составила в среднем 0,5 сбоя/мин в солнечный максимум, и 1 сбой/мин в солнечный минимум. При появлении СКЛ количество сбоев возрастало вплоть до 76 сбоев/мин во время всплеска солнечной активности в июле 2000 г.
- 3. На фоне общей медленной деградации солнечных панелей (эффекта общей дозы) с 100 до 86% за восемь лет с 1996 по 2003 гг., после нескольких сильных СПС были зафиксированы резкие уменьшения эффективности на 1–2%.

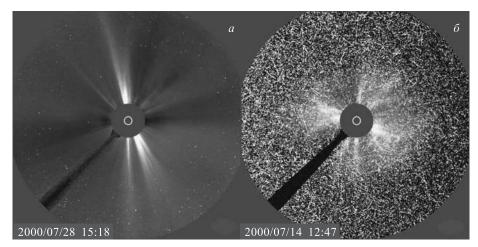


Рис. 8.3.1. Пример сильного возрастания нетеплового шума в детекторе LASCO на KA SOHO во время события СКЛ 14 июля 2000 г.: a — изображение солнечной короны, полученное в нормальных условиях, белые точки в поле зрения прибора — звезды; δ — изображение солнечной короны во время прихода СКЛ со множеством следов — треков, образованных в детекторе частицами СКЛ

Высокоапогейные и геостационарные КА проводят основную часть времени во внешней магнитосфере, которая практически открыта для прямого доступа ГКЛ и СКЛ. Поэтому для них характерны те же эффекты, что и для межпланетных миссий. Кроме того, во время магнитных бурь происходит возрастание потоков энергичных частиц, прежде всего релятивистских электронов, и плотности горячей плазмы в зоне внешнего радиационного пояса. Вследствие этих факторов для КА во внешней магнитосфере также чрезвычайно актуальными становятся эффекты объемной и внешней электризации (Gubby, Evans, 2002).

Высокоапогейные КА пересекают и внутренний протонный радиационный пояс в зоне перигея орбиты, где основным становится эффект одиночных сбоев. Например, на спутнике «Интербол-2» абсолютное большинство единичных сбоев в оперативной памяти системы сбора научных данных ССНИ происходило во внутреннем радиационном поясе (Чесалин и др., 1999) (рис. 8.3.2). В целом, дозы, получаемые космическими аппаратами в радиационных поясах, слишком велики (см табл. 8.3.1), поэтому пребывание в них по возможности минимизируют за счет выбора орбиты и предусматривают отключение чувствительной к радиации электроники на период пролета областей с максимальными значениями мощности поглощенной дозы.

На околоземных орбитах с высотами до 1000 км находится большое количество спутников, в том числе и пилотируемые корабли, требования к радиационной безопасности которых в настоящее время наиболее высоки (Petrov, 2002, 2004а). Поток ГКЛ и особенно СКЛ на этих высотах значительно ослаблен магнитным полем Земли. Главными радиационными факторами здесь являются ГКЛ, проникающие глубоко в магнитосферу, протоны внутреннего радиационного пояса, опускающегося к Земле в месте наиболее низкого значения напряженности геомагнитного поля в районе Бразильской магнитной аномалии и СКЛ в приполярных областях. Необходимо отметить, что СКЛ при невозмущенной магнитосфере эффективно ослабляются геомагнитным полем до 10⁴ раз в зависимости от их энергетического спектра СКЛ и орбиты станции. Однако во время мощных геомагнитных бурь, если они совпали

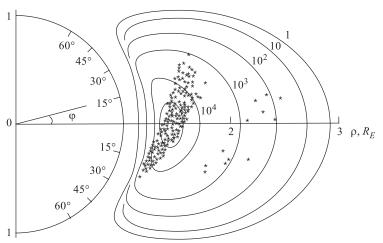


Рис. 8.3.2. Моменты одиночных сбоев в оперативной памяти ССНИ («Интербол-2»), наложенные на карту интенсивности протонов с энергией более 50 МэВ внутреннего радиационного пояса (из статьи Чесалин и др., 1999)

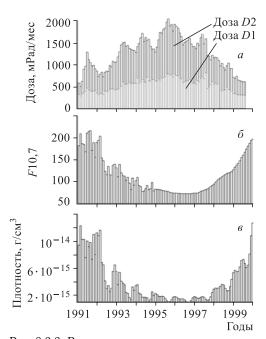


Рис. 8.3.3. Радиационные дозы, измеренные на борту ОС «Мир» в период 1991–1999 гг. (а). Для сравнения представлена динамика солнечной активности в индексе солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см (б) и плотности земной атмосферы на высоте 400 км (в) (из статьи Гальперин и др., 2001)

по времени с возрастанием СКЛ, эта цифра может уменьшиться на 1–3 порядка величины (см. 8.2.4) Поэтому при оценке радиационной опасности для экипажей орбитальной станции необходимо контролировать реальную радиационную обстановку в течение всего полета.

Наиболее репрезентативный массив данных по радиационным дозам был накоплен в 1990-х гг. в процессе мониторинга на орбитальной станции (ОС) «Мир», которая имела схожую с МКС орбиту (рис. 8.3.3) (Гальперин и др., 2001; Бондаренко и др., 2000). Для сравнения там же показана вариация солнечной активности в индексе $F_{10.7}$ и динамика плотности верхней атмосферы на высоте полета ~ 400 км. Поглощенная доза измерялась для двух условий защищенности чувствительного элемента детектора: D1 под толстой защитой в ~ 3.5 г/см 2 оргстекла и D2под тонкой защитой в ~ 0.5 г/см 2 оргстекла (Panasyuk et al., 1998). Эквивалентная доза излучения за год составила, соответственно, $D1 \sim 100$ мЗв/год и $D2 \sim 200$ мЗв/год. Таким образом, ра-

диационные нагрузки на борту орбитальных станций сопоставимы с установленными дозовыми нормативами. Учет вклада от нейтронов может повысить приведенные

значения эквивалентной дозы облучения экипажа, однако этот вопрос до сих пор находится на стадии исследования.

Временная динамика дозы по измерениям на ОС «Мир» имеет сильную солнечноциклическую и сезонную вариации (Рапазуик et al., 1998), изменяясь в противофазе с солнечной активностью. В минимуме солнечной активности потоки ГКЛ максимальны, как и потоки захваченных частиц в РПЗ, поскольку увеличивается захват частиц, генерируемых ГКЛ в ядерных взаимодействиях, и уменьшаются потери их в зонах высыпания из поясов, контролируемые плотностью верхней атмосферы, которая уменьшается на этих высотах в эпоху минимума солнечного цикла. Последний фактор также объясняет сезонную вариацию дозы, которая достигает 50 % и имеет локальные минимумы в зимние месяцы, когда плотность атмосферы в районе аномалии максимальна (местное лето).

Существенный вклад дают и спорадические СПС — доза, измеренная на станции «Мир» за период очень мощных магнитных бурь марта 1989 г. составила 20 мГр, а за период событий октября—ноября 2003 г. на станции МКС — 2 мГр (Tverskaya et al., 2004; Бондаренко и др., 2004). Для уменьшения дозы от СПС экипажу обычно рекомендуют находиться в наиболее защищенных зонах станции во время ее движения по виткам, проходящим наиболее близко к высоким геомагнитным широтам.

Достаточно большой вклад в сбои в работе аппаратуры на низковысотных орбитах в средних широтах вносят релятивистские электроны внешнего РПЗ (Dmitriev et al., 2005a; Iucci et al., 2005). Электроны с энергиями > 4 МэВ способны проникать

сквозь обшивку станции. Как показано методом наложения эпох для 19 сильных магнитных бурь, число единичных сбоев в эксперименте «Рябина» было максимально в день максимума бури (Dmitriev et al., 2002) (рис. 8.3.4).

Самым простым примером космических радиационных эффектов на поверхности Земли можно считать спонтанные сбои в работе обычного персонального компьютера (Zeigler et al., 1996), вызываемые высокоэнергичным компонентом ГКЛ. Темп сбоев растет с широтой и высотой. На низких широтах он меняется от одного сбоя в месяц на уровне моря до нескольких

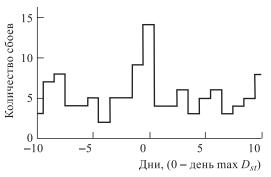


Рис. 8.3.4. Сбои в эксперименте «Рябина» на борту ОС «Мир» во время сильных магнитных бурь с $|D_{\rm st\; max}| > 50$ нТл. Число сбоев максимально в день максимума бури

сбоев в неделю в горах на высоте ~ 3 км. Темпы сбоев в полярных областях и на экваторе отличаются приблизительно в 6 раз.

Темп одиночных сбоев в бортовой авиационной микроэлектронике быстро растет с высотой и достигает своего максимума на высотах от 9 до 20 км в области максимальной интенсивности вторичных частиц ГКЛ, возникающих при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой. В кросс-полярных перелетах число одиночных сбоев возрастает, по крайней мере, в 15 раз по сравнению с низкоширотными трассами.

Повышенная доза излучения в атмосфере является довольно серьезной проблемой для современной авиации (O'Sullivan, 1999, 2001). На высотах полетов пассажирских самолетов (10–11 км) мощность эквивалентной дозы составляет около 6 мкЗв/час (для широт выше 50°). Величина ее возрастает почти в 3 раза для кросс-полярных

перелетов. При очень сильном СПС доза, полученная за время трансатлантического перелета, может составить $2{\text -}10\,$ мЗв. Для ограничения профессионального радиационного риска, связанного с работой в условиях таких радиационных нагрузок, для экипажей авиалайнеров в Европе установлены дозовые нормативы на уровне $\sim 6\,$ мЗв/год (Jones, 2004).

Приведенный материал демонстрирует серьезную опасность, связанную с профессиональным облучением экипажей космических аппаратов и отказами технических систем, вызванными воздействием радиации. Очевидно, что необходимы специальные меры, уменьшающие эту опасность до приемлемых значений. Такие меры принимаются, однако детальное рассмотрение их выходит за рамки настоящего раздела.

8.3.2. Ионосфера и распространение радиоволн

А.А. Петрукович, С.А. Пулинец

Введение. Эффекты солнечно-земных связей в распространении радиоволн носят не только возмущающий характер — многие применения радиосвязи становятся возможными только благодаря наличию ионосферы. Само существование ионизованной оболочки Земли впервые проявилось в ходе опытов по установлению дальней радиосвязи в начале XX в. (Дэвис, 1973). Условия распространения зависят от частоты (длины) радиоволны (Гуревич, 1979; Калинин и Черенкова, 1971) (табл. 8.3.3). Многие виды естественных космических радиоисточников были обнаружены как помехи в работе различных систем связи и радиолокации. Поэтому во многих приложениях необходимо учитывать уровень шумов Галактики, Солнца, магнитосферы, ионосферы и атмосферы.

Таблица 8.3.3

Диапазон частоты (длины волны)	Название	Применение	
3-30 кГц (100-10 км)	Сверхдлинные волны	Радионавигация, подводная радиосвязь	
30-300 кГц (10-1 км)	Длинные волны	Региональная радиосвязь	
300-3000 кГц (1000-100 м)	Средние волны	Региональная радиосвязь	
3-30 МГц (100-10 м)	Короткие волны	Дальняя радиосвязь	
30-300 МГц (10-1 м)	Метровые волны	Местная радиосвязь; радиолокация, спутниковая связь, ТВ	
300-3000 МГц (100-10 см)	Дециметровые волны	Сотовая связь, спутниковая навигация, радиолокация; спутниковая связь	
3-30 ГГц (10-1 см)	Сантиметровые волны	Спутниковая связь	

При распространении сверхдлинных радиоволн, длина которых сопоставима с расстоянием до ионосферы, имеет место волноводное (в полости между поверхностью и ионосферой) распространение. Длинные волны благодаря рефракции тоже способны огибать Землю, но с повышением частоты увеличивается их поглощение. Трудности применения этого диапазона связаны с громоздкостью и высокой мощностью антенных систем и относительно низкой скоростью передачи информации. Средние волны распространяются вдоль поверхности Земли, а в ночное время (при отсутствии поглощения в слое D) могут отражаться от слоя Е ионосферы. В диа-

пазоне коротких волн сигналы способны распространяться на большие расстояния (несколько тысяч километров) благодаря отражению от слоя F и при использовании достаточно компактных антенн и малой мощности передатчика по сравнению с длинными волнами. На частотах превышающих 30 МГц волны проходят через ионосферу насквозь, и эти диапазоны используются для вещания и связи в зоне прямой видимости, в том числе, со спутниками.

Радио — первая область техники, в которой учет и прогноз космической погоды стали реальностью (см. 8.4). Это было связано с существенной ролью дальней связи в коммуникациях XX в. В настоящее время акцент сдвигается к использованию более высокочастотных диапазонов, передача цифровых сигналов в которых, в целом, меньше зависит от условий внешней среды. Тем не менее, с учетом возрастающих требований к точности и количеству передаваемой информации, необходимо рассматривать все эффекты взаимодействия радиоволн с плазмой.

Ионосферные эффекты и помехи космического происхождения, воздействующие на радиосигналы различных диапазонов и видов, исключительно разнообразны и их сколько-нибудь полное описание здесь невозможно (Калинин и Черенкова, 1971; Мизун 1986). Распространением радиоволн занимается отдельная отрасль геофизики. Различные виды радиозондирования также являются основными методами исследования ионосферы (Альперт, 1972; Pulinets, 1999).

Рассмотрим ниже два характерных примера: распространение коротковолновых радиоволн и сигналов систем спутниковой навигации. Описываемые механизмы типичны для сигналов в относительно низкочастотном (ниже десятков мегагерц) и высокочастотном (гигагерцы) диапазонах соответственно.

Коротковолновая радиосвязь. Эффект воздействия плазмы ионосферы на распространяющуюся в ней радиоволну определяется, в основном, взаимодействием электрического поля волны со свободными электронами (Гинзбург, 1967; Гинзбург, Рухадзе, 1975). Повторяя хорошо известные выкладки, рассмотрим движение электрона в электрическом поле падающей волны в простейшем случае без учета магнитного поля: $m_e\ddot{r}=-eE$. С учетом выражения для тока $-eN\dot{r}=\sigma E$ и уравнений Максвелла получаем для монохроматической волны:

$$n^2 = 1 + rac{4\pi i}{\omega}\sigma = 1 - rac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}, \quad k^2 = rac{\omega^2}{c^2}n^2$$
 $\omega_{pe} = \sqrt{rac{4\pi Ne^2}{m_e}}\,, \quad f_{pe}({
m M}\Gamma_{
m II}) = 8{,}98\cdot 10^{-3}\sqrt{N({
m cm}^{-3})}\,.$

Здесь n — коэффициент преломления, m_e — масса электрона, e — элементарный заряд, $E \sim \exp\{ikz-i\omega t\}$ — напряженность электрического поля волны. N — электронная концентрация, σ — проводимость, r — радиус-вектор электрона, ω_{pe} , f_{pe} — собственная частота колебания электронов в плазме, называемая n-лазменной частотой, $\omega = 2\pi f$ и k — частота и длина волны. Величина коэффициента преломления определяет закон распространения волны. Волны с частотой ниже f_{pe} не могут распространяться в плазме (коэффициент преломления становится комплексным) и отражаются от ее границы.

В реальной ионосфере концентрация электронов растет с высотой и достигает максимума в слое F2 (рис. 8.2.12). Таким образом, в приближении геометрической оптики (при условии, что длина волны много меньше размера ионосферы) при вертикальном распространении радиоволны отражение происходит на высоте, где n=0, т. е., где $f_{pe}(h)=f$. Если частота волны выше плазменной частоты максимума концентрации электронов, то отражения не происходит, волна проникает сквозь ионосферу и практически свободно распространяется в космическом пространстве

(так как концентрация плазмы в магнитосфере на порядки величин ниже ионосферной). Наибольшая частота отражения вертикальной волны называется κ ритической частотой и обозначается foF2. Она может достигать 20~M Гц в горбах экваториальной аномалии в максимуме слоя F2 ионосферы днем и в периоды максимумов солнечной активности. В умеренных широтах foF2 составляет несколько мегагерц. На практике в единицах плазменной частоты (соответствующей максимальной или характерной концентрации электронов) часто выражают параметры различных слоев ионосферы. Высота, на которой происходит отражение на критической частоте, называется высотой главного максимума и обозначается h_mF2 .

При наличии магнитного поля H радиоволна разделяется на эллиптически поляризованные обыкновенную и необыкновенную волны, параметры которых зависят от величины поля и от угла между направлениями распространения волны и вектора поля. Обыкновенной (индекс O) называется волна, электрический вектор которой вращается по часовой стрелке, если наблюдатель стоит к приближающейся к нему волне. Волна, электрический вектор которой вращается против часовой стрелки, называется необыкновенной (индексы X и Z). Коэффициент преломления обыкновенной волны такой же, как и в случае без магнитного поля, а преломление необыкновенных волн зависит и от величины гирочастоты электронов $\omega_{he} = eH/(m_ec)$. Это объясняется тем, что электрический вектор необыкновенной волны вращается в ту же сторону, что и электрон при его движении в геомагнитном поле, что создает возможность обмена энергией между волной и плазмой.

Частоты отсечек (при которых коэффициент преломления обращается в ноль) необыкновенных волн выражаются как

$$\omega_{x,z} = \frac{\sqrt{4\omega_{pe}^2 + \omega_{he}}}{2} \pm \frac{\omega_{he}}{2}.$$

В высоких широтах гирочастота составляет $\sim 1~M\Gamma$ ц, а на экваторе $\sim 0.5~M\Gamma$ ц.

Затухание волны в ионосфере определяется частотой столкновений свободных электронов с нейтральными атомами ν_{en} . Простейшее уравнение движения электронов тогда записывается в виде $m_e\ddot{r}=-eE-m_e\nu_{en}\dot{r}$.

Введя затухание волны χ , как $E\sim \exp\{ikz-\chi z-i\omega t\}$, и предполагая, что $\nu_{en}\ll \omega$, получаем $\chi\sim \nu_{en}(\omega_{pe}^2/\omega^2)$. Затухание пропорционально частоте столкновений и плотности плазмы и обратно пропорционально квадрату частоты. В ионосфере максимум поглощения находится в D-слое. Наиболее подвержены затуханию более низкочастотные длинные и средние волны и для уменьшения поглощения необходимо передавать сигнал на максимально возможной частоте. Если затухание невелико, что обычно бывает ночью, когда слой D пропадает, короткие волны, многократно отражаясь от ионосферы и поверхности, способны обогнуть весь земной шар.

Обратной стороной возможности использования ионосферы для дальней радиосвязи является сильное влияние различных солнечно-земных факторов на качество сигнала. Первое представление об условиях распространения коротких волн можно получить, регулярно слушая радиоприемник. При прохождении через ионосферу радиоволна подвергается различным типам воздействия, что приводит к вариациям амплитуды, фазы и частоты сигнала. Потеря необходимого уровня когерентности может привести к потере информации, а потребители специализированных линий дальней связи должны быть уверены в том, что сигнал их достигнет. Некоторые простейшие аспекты расчета распространения радиосигналов представлены ниже.

Так как практически распространение радиосигнала происходит не по вертикали, а вдоль поверхности на наклонных трассах, это расширяет диапазон используемых частот. При наклонном падении волны снизу на слоистую ионосферу происходит

рефракция и траектория луча отклоняется обратно к Земле. Максимальная частота, которая еще может таким образом отразиться от ионосферы при заданной высоте отражения h, называется максимально применимой частотой (МПЧ) (maximum usable frequency MUF), и определяется как $MUF(h) = f_{pe}(h) \cdot \sec i$, где $f_{pe}(h) -$ плазменная частота на данной высоте, i — угол падения радиоволны на ионосферу. Даже в предположении идеального отражения, необходимо выбирать частоту передачи с учетом расстояния между приемником и передатчиком, возможности многоскачкового распространения и наличия мертвой зоны (рис. 8.3.5).

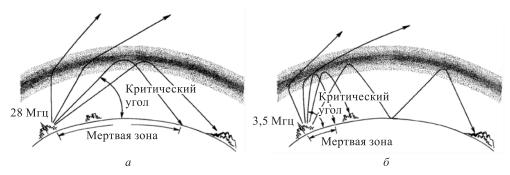


Рис. 8.3.5. Схема возможного распространения коротких радиоволн: a — волна с частотой 28 МГц отражается от ионосферы только при достаточно малом угле падения (обозначен как критический угол) и создает достаточно протяженную мертвую зону, в которой прием невозможен; δ — волна с частотой 3,5 МГц отражается от ионосферы в широком диапазоне углов, мертвая зона мала, распространение может быть многоскачковым

При расчетах необходимо учитывать регулярную широтную и высотную структуру ионосферы вдоль радиотрассы в ее суточной и сезонной динамике. Например, при наличии горизонтальных градиентов электронной концентрации может оказаться, что частоты для передачи сигнала из пункта A в пункт Б и наоборот, из пункта в Б в пункт A, будут различны.

Один из основных причин снижения качества принимаемого сигнала — многолучевое распространение, возникающее из-за разных коэффициентов преломления обыкновенной и необыкновенной волн или просто возможности достижения приемника путем различных комбинаций отражений и преломлений в реальной пространственной структуре (например, от боковых стенок главного ионосферного провала). При интерференции всех лучей формируются максимумы и минимумы напряженности, размывается качество модуляции, причем из-за нестабильности структуры эта картина «плывет», что приводит к так называемым замираниям (fading) сигнала.

Во время сильных солнечных и магнитосферных возмущений кроме изменения макроструктуры ионосферы образуется спектр неоднородностей плотности на всех масштабах, в основном в экваториальной и высокоширотной ионосфере (Панасюк и др., 2004; Боярчук и др., 2005; Гельберг, 1986). Наиболее известные источники неоднородностей — спорадические слои Es (sporadic E) (высокоионизованный полупрозрачный слой из сгустков плазмы, создающий частичное отражение сигнала в широком диапазоне частот вплоть до ТВ-каналов на высотах Е слоя) и F (F-spread) (Гершман и др., 1976, 1984). Распространение через такую среду приводит к сильной деградации сигнала: потери когерентности отражения, увеличению поглощения, дифракции и рассеяния на неоднородностях.

С помощью приемо-передатчиков с меняющейся частотой (ионозондов) можно провести вертикальное зондирование ионосферы и определить структуру ее слоев

и условия распространения радиоволн. Высота отражающего слоя для данной частоты определяется временем между излучением и приемом короткого радиоимпульса. Приведем диаграмму вертикального зондирования на станции ИЗМИРАН во время сильной магнитной бури (рис. 8.3.6). Четкие линии отражения от F слоя в спокойных

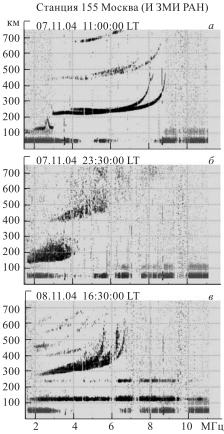


Рис. 8.3.6. Состояние ионосферы и отражение радиоволн вертикального ионосферного зондирования во время сильной магнитной бури в ноябре 2004 г. на станции ИЗМИРАН (г. Троицк, Московской обл.). Данные любезно предоставлены И. В. Крашенниковым (ИЗМИ-PAH, http://www.izmiran.ru/ionosphere/parus/). а — спокойные условия, 07 ноября 2004 г. 11:00; четкие отражения от слоя F2 (выше 200 км) обыкновенной волны от 3 до 8 МГц и необыкновенной волны от 3,8 до 9 МГц (сдвиг на гирочастоту 0,7 МГц); выше основного профиля присутствуют слабые кратные отражения; внизу слева — отражения от Е слоя от 2.0 до 2.8~МГц. 6 — сильная магнитная буря, 07~ноября~2004~г. 23:30; возмущенное состояние, обычно характерное для высоких широт, наблюдается у Москвы, так как авроральный овал во время бури смещается в умеренные широты; выше 200 км — расплывчатое отражение от F слоя при доминирующей ионизации частицами; на высотах 100-200 км — широкая зона отражения от слоя Е, созданного высыпаниями частиц в авроральной зоне (в нормальных условиях ночью слой Е не наблюдается). в — после окончания магнитной бури, 08 ноября 2004 г. 16:30; образовался мощный полупрозрачный спорадический слой Ев (высоты 100-130 км) с частотами отражений от 1,5 до 11 МГц, также наблюдаются «кратники» от этого слоя; несмотря на экранирование от Es, хорошо виден слой F2 (критические частоты от 2 до 6,5 МГц), хотя отражения не такие четкие, как днем в спокойной ионосфере

условиях (до бури) сменяются на размытые и полупрозрачные зоны отражений во время и после бури, характеризующие сильно возмущенную структуру ионосферы.

Отдельно необходимо отметить захватывающие значительную территорию явления полного поглощения радиоволн (black-out), возникающие из-за интенсификации D-слоя после солнечных эруптивных событий (Митра, 1977). Так называемое внезапное ионосферное возмущение (sudden ionospheric disturbance), блокирует радиосвязь на всей дневной стороне Земли на 1–3 ч. Оно происходит из-за резкого увеличения концентрации свободных электронов на высотах D-слоя под воздействием рентгеновского излучения мощной солнечной вспышки. Другой источник аномальной ионизации D-слоя — солнечные космические лучи. Проникая через геомагнитное поле в ионосферу в высоких широтах во время мощных солнечных протонных событий, они могут блокировать коротковолновую связь в полярных районах на несколько дней (так называемое поглощение в полярной шапке — polar сар absorption). Из-за последнего эффекта трассы трансполярных рейсов гражданской авиации после солнечных вспышек сдвигают в более низкие широты, так как связь с самолетами на широтах выше 80° (в зоне невидимости геостационарных спутников связи) поддерживается на коротких волнах.

В целом, при всей своей сложности, проблема обеспечения надежной передачи информации в коротковолновом диапазоне, хотя и с некоторыми ограничениями, была удовлетворительно разрешена. В частности, во время магнитных бурь может произойти существенное ухудшение качества коротковолновой радиосвязи вплоть до ее прерывания. Поэтому прогноз радиоканала тесно связан с прогнозом геомагнитных возмущений, задачами диагностики и моделирования ионосферы. (Благовещенский и Жеребцов, 1989; Куркин и др. 2004; Jacobs, 1995).

Ионосфера и спутниковая навигация. Одним из ярких технологических достижений последних лет стало широкое использование глобальной спутниковой навигации (Соловьев, 2000; Яценков, 2005; Hofmann-Wellenhof, 2002). В настоящее время действует американская система GPS, в близком будущем должна быть полностью развернута российская система ГЛОНАСС, запущены спутники европейской системы «Galileo». Несмотря на то, что в основе спутниковой навигации лежит достаточно простая идея определения координат по расстоянию между приемником и несколькими спутниками системы, для того чтобы достичь приемлемой точности оказалось необходимо использовать достаточно сложные технические решения.

Расстояние (псевдо-дальность) между спутником и приемником определяется по разнице между временами приема и излучения сигнала (последнее закодировано в самом сигнале). Получив сигналы как минимум от четырех спутников и, зная их орбитальное положение (также передаваемое в сигнале), можно определить координаты объекта. Так как сигнал передается на частотах около полутора гигагерц, то он проходит через ионосферу без отражения. Тем не менее фактор ионосферы и плазмосферы (а спутники находятся на орбитах высотой порядка 20000 км) является главным источником ошибок в определении дальности и составляет 5–40 м. (Kintner, Ledvina, 2005) (табл. 8.3.4). Необходимо учитывать, что ошибка определения координат обычно в 2–3 раза больше, чем ошибка определения дальности. Другой важный источник ошибок — флуктуации мощности сигнала после прохождения поля неоднородностей электронной концентрации.

Если ограничиться гражданскими применениями, то помимо бытового ориентирования на местности, требования к точности которого, в общем, достаточно невысоки, все большее распространение получают спутниковые технологии в геодезии, всякого рода автоматические системы слежения и управления, например посадкой самолетов,

налагающие серьезные требования по надежности измерений и требующие точности порядка одного метра (Соловьев, 2000).

	Таблица	8.3.4
Ошибки определения дальности до спутника GPS (в метра	ıx)	

Причина	Одночастотный приемник	Двухчастотный приемник	Дифференциальная коррекция
Точность орбиты спутника	3	3	1
Точность определения времени	2	2	1
Ионосфера и плазмосфера	5-40	2	1
Сухая атмосфера	3	3	0,5
Влажная атмосфера	0,3	0,3	0,1
Многолучевое распространение	3-5	2-3	3-5
Ошибки в приемнике	1	1	1
Всего	7-40	5-6	3-6

Из-за наличия плазмы скорость распространения сигнала изменяется, и дополнительная задержка в ионосфере составляет

$$\Delta t = \int \frac{dl}{c} - \int \frac{dl}{v_q} = \frac{1}{c} \int \frac{\omega_{pe}^2}{2\omega^2} dl = \frac{40.3}{cf^2} \int N_e dl$$

с учетом того, что $v_g=cn=c\sqrt{1-(\omega_{pe}^2/\omega^2)}$ и $\omega_{pe}^2\ll\omega^2$, если частота измеряется в Γ ц, а плотность в м $^{-3}$.

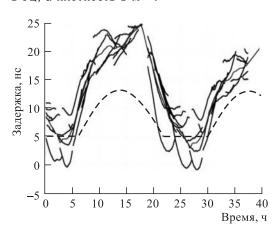


Рис. 8.3.7. Измеренные реальные задержки сигнала в ионосфере могут отличаться на десятки единиц ТЕС от модели (Klobuchar, 1986) (пунктир). Измерения проводились в США, Нью Йорк (Kintner, Ledvina, 2005)

Количество электронов на луче зрения между спутником и приемником на квадратный метр площади $\int N_e dl$ называется полным электронным содержанием (total electron content, TEC). Одна единица TECU составляет 10^{16} м $^{-2}$ и эквивалентна ошибке в определении расстоянии до спутника $c\Delta t=16$ см. Типичные значения этой величины до 30 ТЕСИ в средних широтах и до 50 ТЕСИ в экваториальных широтах. Обычно в приемниках для коррекции влияния ТЕС используется достаточно простая модель ионосферы (Klobuchar, 1986, 1996). Однако, учитывая сложную реальную структуру ионосферы, этой модели явно недостаточно (рис. 8.3.7) (Kintner, Ledvina, 2005).

Для решения проблемы ионосферной задержки в настоящее время ис-

пользуют два метода. Во-первых, спутники передают навигационный сигнал на нескольких частотах. Разница во времени распространения двух сигналов на двух

разных частотах позволяет исключить величину ТЕС из уравнений или вычислить ее. Однако, в настоящее время из-за особенностей кодировки сигнала двухчастотные приемники рядовому пользователю обычно недоступны.

Второй метод — так называемая дифференциальная коррекция (Wide Area Differential GPS — WADGPS) (Соловьев, 2000). Навигационный сигнал со спутников принимается на сети базовых станций, координаты которых точно известны, что позволяет вычислять реальные ошибки измерений в данном месте в данный момент времени. Полученные таким образом поправки к стандартному сигналу распространяются по радио, например через геостационарный спутник, и учитываются потребителями, имеющими специальные модифицированные GPS-приемники. В настоящее время работают три такие региональные системы, покрывающие соответственно, территорию Европы, США и восточной Азии. Хотя номинально этот метод позволяет сократить ошибки до величин порядка метра, его точность зависит от близости приемника к базовой станции и при наличии резких градиентов структуры ионосферы или многолучевого распространения (во время магнитных бурь) точность может снизиться до обычной (Hernandez-Pajares, 2005). Подобные системы могут применяться и на небольших территориях, например для повышения точности геодезической съемки. Ключевую роль при обеспечении достоверности таких данных играет своевременное выявление ионосферных помех и их прогноз.

Если макроструктура ионосферы через эффект полного электронного содержания определяет задержки навигационных сигналов, то мелкомасштабные ионосферные неоднородности (см. рис. 8.2.14 на с. 192), особенно в зонах риска (авроральных и экваториальных широтах) могут вызвать сбои в приеме навигационных сигналов.

При прохождении радиоволн через зоны неоднородностей с варьирующимся коэффициентом преломления, их фронт постоянной фазы искажается и в дальнейшем интерференция различных лучей создает динамическую картину изменений мощности сигнала в зоне приема — мерцания (scintillations) (Афраймович и др., 2004; Kintner et al., 2005). Навигационные приемники чувствительны к уровню сигнала, так как из-за удаленности источника (спутника) принимаемый сигнал достаточно слаб. Вариации уровня мощности, отнесенные к средней мощности, определяют индекс мерцаний S_4 . В умеренно возмущенных условиях низких широт он может составлять 0,4–0,6, во время магнитных бурь — превышать единицу.

Провалы мощности во время мерцаний могут приводить к полной потере сигнала на несколько секунд (Kintner et al., 2005). Последствия этого зависят от алгоритма, заложенного в конкретный приемник. В режиме холодного старта прибор должен принять полный набор данных, что занимает порядка 10 мин. При вычислении новой точки время непрерывного приема данных должно составлять порядка одной минуты.

Эффект мерцаний особенно неприятен, если определяются координаты движущегося объекта, или координаты используются для каких-либо вычислений в режиме реального времени. В значительной степени поле ионосферных неоднородностей сносится зональными дрейфами, скорости которых достигают сотен метров в секунду, поэтому если приемник движется в «тени» поля неоднородностей, то время потери сигнала может существенно возрасти.

В целом, хотя ионосферные эффекты не оказывают доминирующего воздействия на работу системы спутниковой навигации, адекватный учет этих поправок становится необходим при использовании измерений координат в технологических системах различного рода. С другой стороны система GPS сама стала сейчас мощным инструментом глобального и постоянного мониторинга состояния ионосферы. Сети стационарных приемников (например, http://igscb.jpl.nasa.gov/) сейчас активно используются для определения пространственного распределения и динамики концентрации электронов (Afraimovich et al., 1999).

8.3.3. Изменение орбит спутников

М.Г. Дёминов

Влияние атмосферы на движение спутников. Аэродинамическое торможение спутников окружающей атмосферой пропорционально плотности атмосферы ρ . Это торможение наиболее существенно для низкоорбитальных спутников с почти круговой орбитой ниже $800~{\rm km}$. На этих высотах плотность нейтральной термосферы гораздо выше плотности ионов (ионосферы) и изменения ρ определяются, в основном, нагревом атмосферы жестким ультрафиолетовым излучением Солнца и джоулевым нагревом авроральными электроструями, зависящими от солнечной и геомагнитной активности.

Рассмотрим предварительно зависимость параметров орбит спутников от плотности атмосферы для простейших случаев. Они основаны на результатах, приведенных, например, Эльясбергом (1965), Кинг-Хили (1966) и Охоцимским и Сихарулидзе (1990).

Параметры орбиты спутника определяются уравнением $d^2\mathbf{r}/dt^2 + \mu\mathbf{r}/r^3 = \mathbf{f}$, где r и ϑ — полярные координаты в плоскости орбиты, \mathbf{r} — вектор положения спутника относительно центра Земли. Первый член — это радиальное ускорение спутника, второй — сила притяжения на единицу массы спутника ($\mu=3,986\cdot 10^{14}~\mathrm{m}^3/\mathrm{c}^2$ — произведение гравитационной постоянной на массу Земли), \mathbf{f} — дополнительные силы на единицу массы спутника. Если f=0, то орбита спутника является эллиптической (кеплеровской): $r=a(1-e^2)/(1+e\cos\vartheta)$, где a — большая полуось эллипса, e — эксцентриситет. Скорость V и период T движения спутника определяются соотношениями:

$$V^2 = \mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right), \quad T = 2\pi \left(\frac{a^3}{\mu}\right)^{1/2}.$$
 (8.3.1)

Действие силы \mathbf{f} приводит к отклонению спутника от кеплеровской орбиты. Основной для низкоорбитальных спутников является сила аэродинамического торможения окружающей атмосферой

$$\mathbf{f} = -\frac{1}{2}C_B \rho V \mathbf{V},\tag{8.3.2}$$

где ρ — плотность окружающей атмосферы, ${\bf V}$ — скорость спутника, $C_B=C_DS/m$ — баллистический коэффициент, C_D — безразмерный коэффициент торможения спутника, S и m — площадь поперечного (миделевого) сечения и масса спутника. При записи этого соотношения учтено, что практически всегда $V\gg V_n$, где V_n — скорость движения (ветра) окружающей атмосферы.

Обычно сила ${\bf f}$ приводит к слабому изменению параметров орбиты на временах порядка ее периода. Будем считать, что в любой момент времени орбита спутника является кеплеровской, но параметры орбиты ${\bf a}, e$ и T изменяются со временем. Тогда в любой данной точке dr/dt=0, но dV/dt=f, и из (8.3.1) получим

$$2V\frac{dV}{dt} = 2Vf = \frac{\mu}{a^2}\frac{da}{dt}, \quad \frac{dT}{dt} = 3\pi \left(\frac{a}{\mu}\right)^{1/2}\frac{da}{dt},$$

или для круговой орбиты $(e=0,\,V^2=\mu/a)$ с учетом явного вида f

$$\frac{da}{dt} = -C_B(\mu a)^{1/2}\rho, \quad \frac{dT}{dt} = -3\pi C_B a\rho.$$
(8.3.3)

Здесь и ниже ρ — среднее вдоль круговой орбиты значение плотности атмосферы.

Первое из соотношений (8.3.3) можно использовать для вычисления времени жизни (существования) спутника, запущенного на круговую орбиту радиусом $a_0 = r_0 = R_{\rm E} + h_0$:

 $\tau_L(h_0) = \frac{1}{(C_B \mu^{1/2})} \int \frac{1}{\rho (R_E + h)^{1/2}} dh, \tag{8.3.4}$

где $R_{\rm E}$ — радиус Земли, интегрирование ведется от h=0 до $h=h_0$.

Плотность атмосферы ρ почти экспоненциально уменьшается с высотой, поэтому с точностью около $10\,\%$ можно использовать упрощенную формулу

$$\tau_L(h_0) \approx \frac{1}{(C_B \mu^{1/2})} \frac{H_0}{(R_E + h_0)^{1/2}} \rho_0,$$
(8.3.5)

где H=ho/(d
ho/dh) — шкала высот (характерный масштаб изменения с высотой) плотности атмосферы, H_0 и ho_0 — значения H и ho на высоте h_0 . Также вводится и минимально возможная высота полета h_{\min} , на которой время жизни спутника равно одному периоду его круговой орбиты:

$$\tau_L(h_{\min}) = 2\pi \left(\frac{(R_{\rm E} + h_{\min})^3}{\mu}\right)^{1/2}.$$
(8.3.6)

Отметим, что уравнения (8.3.4), (8.3.6) приведены в ГОСТ 25645.101-83 (1984), т. е. используются в практических приложениях.

Приведенные соотношения выписаны для варианта, когда изменения ρ на временах порядка суток являются слабыми. Для периодов магнитных бурь характерна противоположная ситуация, когда вариации плотности могут быть существенны на временах меньше суток. Относительное изменение периода круговой орбиты спутника для варианта, когда средняя вдоль орбиты плотность изменяется от ρ_0 до ρ на относительно коротких интервалах времени (см. (8.3.3)):

$$\frac{dT}{dt} \left(\frac{dT_0}{dt}\right)^{-1} = \frac{\rho}{\rho_0}.$$
(8.3.7)

Сделаем несколько оценок зависимости параметров круговых орбит спутников от солнечной и геомагнитной активности. Для определенности примем, что орбита является круговой и полярной (наклонение орбиты равно 90°), баллистический коэффициент спутника $C_B = 0.01 \text{ m}^2/\text{kr}$ (типичное значение), а параметры термосферы заданы моделью NRLMSISE-00 (Picone et el., 2002) (http://modelweb.gsfc.nasa.gov/).

Роль солнечной активности и время жизни спутника. Поток жесткого ультрафиолетового излучения Солнца хорошо коррелирует с индексом $F_{10,7}$ (потоком солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см). Поэтому во всех современных моделях термосферы $F_{10,7}$ параметризует нагрев термосферы солнечным излучением. При переходе от минимума к максимуму типичного солнечного цикла $F_{10,7}$ изменяется приблизительно от 75 до 200 (в единицах 10^{-22} BT/(м $^2 \cdot \Gamma$ ц)).

В минимуме и максимуме солнечной активности время жизни спутника, запущенного на орбиту высотой 400 км, отличается практически в 5 раз (рис. 8.3.8).

Темп понижения h увеличивается со временем из-за попадания спутника в более плотные слои атмосферы. Зависимость плотности атмосферы от солнечной активности увеличивается с высотой, поэтому разница в скорости изменения h для низкой и высокой солнечной активности максимальна вблизи начальной орбиты спутника (на высотах $350-400\,$ км).

Расчеты зависимости времени существования спутника для разных начальных высот по (8.3.5) приведены на рис. 8.3.9.

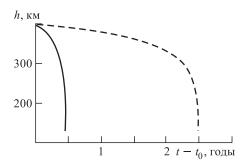


Рис. 8.3.8. Зависимость высоты круговой орбиты спутника h от времени $t-t_0$ до минимально возможной высоты при низкой ($F_{10,7}=75$, штриховая линия) и высокой ($F_{10,7}=200$, сплошная линия) солнечной активности

В приведенных оценках не учитывалась изменение солнечной активности со временем, поэтому реальное время жизни спутника может сильно отличаться от приведенного на рис. 8.3.9. Например, из этого рисунка следует, что для $h_0=500$ км время au_L приблизительно равно 2 и 20 годам в периоды максимума и минимума типичного солнечного цикла. Однако, время 20 лет превышает продолжительность солнечного цикла, поэтому реальное время жизни спутника, запущенного на высоту 500 км при низкой солнечной активности приблизительно равно половине солнечного цикла. Также амплитуда конкретного солнечного цикла может существенно отличаться от средней, и ошибки прогноза максимума цикла при-

ведут к ошибкам прогноза τ_L . Так, преждевременное прекращение существования орбитальной станции «Skylab» массой около 150 т в 1979 г., по-видимому, было связано с ошибкой прогноза максимума 21 солнечного цикла.

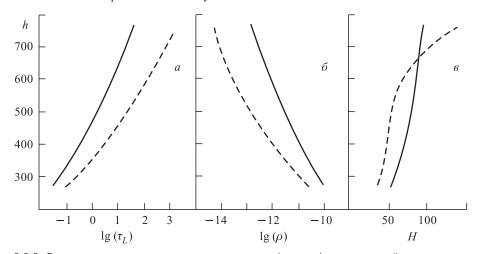


Рис. 8.3.9. Зависимость времени жизни спутника au_L (в годах) от начальной высоты круговой орбиты спутника h_0 (в км) при низкой ($F_{10,7}=75$) и высокой ($F_{10,7}=200$) солнечной активностях — штриховая и сплошная линии. Также приведены плотность ho_0 (в кг/м³) и шкала высот H_0 (в км) термосферы

Роль геомагнитной активности. Вариации геомагнитной активности в среднем слабо отражаются в долговременных изменениях плотности термосферы и не оказывают сильного влияния на время жизни спутников. Однако, резкие кратковременные увеличения плотности, вызываемые джоулевым нагревом во время магнитных бурь, могут создавать, например, серьезные проблемы системам слежения за спутниками. Напомним, что относительная скорость изменения периода орбиты прямо пропорциональна относительному изменению плотности (8.3.7).

Например, во время магнитной бури 13-14 марта 1989 г. произошло резкое увеличение средней (вдоль круговой орбиты на $h_0=600$ км) плотности термосферы

приблизительно в 4 раза (рис. 8.3.10), что привело к потере центром слежения за спутниками США более 1000 спутников (www.windows.ucar.edu/spaceweather/lost_sats.html), а 4 навигационных спутника серии «Транзит» были выключены из работы на неделю (Allen et al., 1989).

Последствиями магнитной бури могут быть не только резкие изменения параметров орбит, но и потеря спутника из-за незапланированного разворота под действием силы торможения. Например, в главную фазу магнитной бури 15 июля 2000 г. крупный японский спутник ASCA потерял ориентацию, его солнечные батареи перестали работать, затем разрядились и аккумуляторные батареи и бортовая аппаратура перестала функционировать. В аналогичной ситуации оказался и российский спутник «Океан-О». Однако группа управления этим спутником заблаговременно получила прогноз ИЗ-МИРАН и ей удалось изменив положение солнечных батарей уменьшить эффективную площадь поперечного сече-

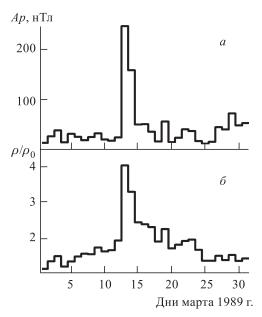


Рис. 8.3.10. A_p -индекс геомагнитной активности и относительное значение плотности атмосферы ρ/ρ_0 на высоте $h_0=600$ км в марте 1989 г.

ния спутника и парировать угрозу (Ораевский и др., 2002). В результате, спутник «Океан-О» продолжал работать в штатном режиме и после данной бури. Данный пример — иллюстрация важности оперативного прогноза.

8.3.4. Геомагнитные возмущения и системы энергоснабжения и проводной связи

Л.Д. Трищенко

Введение. Магнитосферные и ионосферные электрические токи создают на поверхности Земли вариации геомагнитного и геоэлектрического поля, вызывающие так называемые *геоиндуцированные токи* (ГИТ) в длинных (многокилометровых) проводящих системах. Если в магнитоспокойное время эти вариации незначительны, то в магнитоактивные периоды ГИТ могут достигать десятки и даже сотни ампер, влияя на работу систем энергоснабжения, а также целого ряда других наземных технических систем, в которых длинные проводящие линии являются необходимым компонентом (трубопроводы, линии связи, железные дороги) (Boteler, 2003; Pirjola, 2005).

Примеры вариаций магнитного поля в спокойное время и во время магнитной бури и соответствующих токов индукции в трансформаторе линии электропередач и в системе коррозионной защиты трубопровода приведены на рис. 8.3.11. Суточные спокойные вариации магнитного поля для данной обсерватории (Оттава, Канада) не превышают 100 нTл, а $\Gamma \text{ИТ} = 0.5-1 \text{ A}$. Во время магнитной бури амплитуды вариаций и $\Gamma \text{ИТ}$ возрастают в десятки раз.

Именно регистрация ГИТ стала в XIX в. первым свидетельством о влиянии магнитных бурь на технику. Уже в 1840-х гг. отмечалось совпадение по времени «спонтанных» возмущений в телеграфных линиях и северных сияний, а во время мощнейшей магнитной бури 28 августа—2 сентября 1859 г. во многих странах Европы

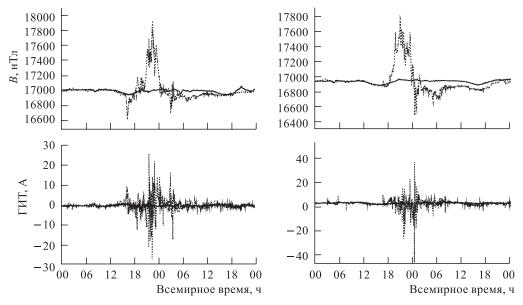


Рис. 8.3.11. Вариации магнитного поля (вверху) и ГИТ (внизу) в нейтрали трансформатора (слева) и в трубопроводе (справа). Здесь сплошные кривые построены по данным двух магнитоспокойных суток, пунктирные — двух магнитоактивных

и Северной Америки было зафиксировано многочасовое нарушение телеграфной связи (Boteler, 2006). Дальнейшее развитие технологий, основанных на применении длинных проводящих линий, сопровождалось и обнаружением разнообразных проявлений ГИТ. Пожалуй наиболее известной в этом смысле стала магнитная буря 1989 г., в ходе которой 6 миллионов человек и большая часть промышленности провинции Квебек на 9 часов остались без электричества. Это послужило хорошим уроком энергетическим компаниям Канады и США и дало новый импульс развитию исследований (Allen et al., 1989).

Расчет ГИТ. Геомагнитный отклик на вариации магнитосферных и ионосферных токов, измеряемый наземными магнитометрами, складывается из магнитного поля собственно тока и магнитного поля теллурических токов, возбуждаемых в поверхностных слоях Земли. Кроме геомагнитных вариаций, таким образом, возникают и геоэлектрические. При наличии протяженной замкнутой (заземленной) системы проводников это геоэлектрическое поле создает в ней ток.

Практически расчет ГИТ можно разделить на два этапа: «геофизический» — на котором определяется невозмущенное проводящей технической системой геоэлектрическое поле и «технический» — определения собственно ГИТ, вызываемого этим геоэлектрическим полем в конкретной технической системе (рис. 8.3.12). Поскольку точная информация о структуре геофизических токов-источников обычно отсутствует, а измерения геоэлектрического поля затруднены по ряду методических причин, в то время как геомагнитные наблюдения проводятся постоянно на многочисленных обсерваториях, то геоэлектрическое поле рассчитывается исходя из наблюдаемых вариаций магнитного поля и геофизических данных о глубинной электропроводности данного региона (модели проводимости). Для расчета используется стандартная методика перехода от временных рядов к их фурье-образам (частотно-фазовым характеристикам).

Для иллюстрации рассмотрим простейший одномерный случай вертикального распространения геоэлектромагнитного поля в системе координат X (на Север),

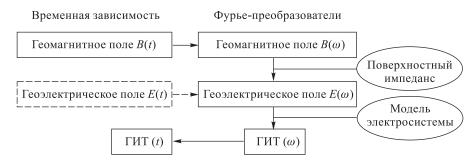


Рис. 8.3.12. Схема расчета ГИТ в технических системах

Y (на Восток) и Z (к центру Земли). Пусть характеристики поля зависят только от Z-координаты. Представим также земную кору как набор однородных горизонтальных электропроводных слоев, представляющий собой различные геологические структуры, поверх однородного полупространства (мантии).

Временные характеристики вариаций геомагнитного поля и проводимость Земли таковы, что токами смещения можно пренебречь, и тогда уравнения Максвелла для горизонтальных фурье-компонент электрического и магнитного полей могут быть записаны как:

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} = i\omega\mu\sigma E_x, \quad \frac{d^2 H_y}{dz^2} = i\omega\mu\sigma H_y.$$

Решениями в общем виде для любой горизонтальной компоненты являются

$$E = A(e^{-kz} + Re^{kz}), \quad H = \frac{A}{Z}(e^{-kz} - Re^{kz}),$$

где $A,\ R$ — амплитуда и коэффициент отражения, $k=\sqrt{i\omega\mu\sigma}$ — волновое число, Z — импеданс, σ — электрическая проводимость. Электрические и магнитные поля связаны через значение импеданса. Для однородного полупространства (простейшей модели) $Z_0=\sqrt{i\omega\mu/\sigma}$, глубина проникновения поля (толщина скин-слоя, где поле уменьшается в e раз) $\delta=\mathrm{Re}(1/k)=\sqrt{2/\omega\mu\sigma}\sim 1/\sqrt{\omega}$.

В более общем случае горизонтально-слоистой структуры Z находится по стандартной рекуррентной процедуре (Weaver, 1994; Kaufman, Keller, 1981). Предположим, имеется N-1 слоев с толщинами d_{N-1} и проводимостями σ_{N-1} поверх полупространства (слой N) с проводимостью σ_N . Тогда импеданс каждого слоя будет

$$Z_n = i\omega\mu\left(rac{1-r_ne^{-2k_nd_n}}{k_n(1+r_ne^{-2k_nd_n})}
ight),$$
 где $r_n = rac{1-k_nrac{Z_{n+1}}{i\omega\mu}}{1+k_nrac{Z_{n+1}}{i\omega\mu}},$

а импеданс последнего $Z_N=\sqrt{i\omega\mu/\sigma_N}$ дает возможность рассчитать импедансы $N-1,N-2\dots$ и, наконец, 1-го слоя.

Таким образом, зная одномерную слоистую структуру проводимости Земли в заданном районе, можно определить импеданс, который позволит вычислить фурье-компоненты геоэлектрического поля по измеренному геомагнитному полю. Для большинства моделей проводимости Земли импеданс имеет зависимость от частоты $Z \sim \sqrt{\omega}$. То есть, при переходе от геомагнитного к геоэлектрическому полю (и ГИТ) высокочастотные компоненты усиливаются.

Электромагнитные и геометрические параметры металлических проводников линий электропередач, нефте- и газопроводов и линий связи могут сильно различаться,

что оказывает влияние на частотные характеристики результирующих электрических полей и ГИТ (Trichtchenko, Boteler, 2001).

Поэтому расчет ГИТ по геоэлектрическому полю зависит от конкретной конфигурации системы. В качестве иллюстрации на рис. 8.3.13 приведены графики для

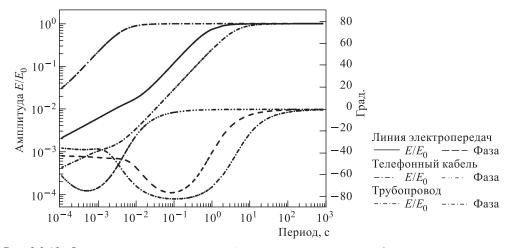


Рис. 8.3.13. Относительные амплитуды и фазы электрических полей (по отношению к внешнему геоэлектрическому полю), индуцированных в различных цилиндрических структурах в зависимости от периода

типичных вариантов: проводов линий электропередач, состоящих из алюминиевого провода со стальной сердцевиной, стальной трубы газопровода с изоляционным покрытием и медного кабеля линии связи.

Для периодов более 1–10 с (т. е. частоты ниже 1–0,1 Γ ц) амплитуда и фаза электрического поля в проводниках совпадает с характеристиками невозмущенного электрического поля (E_0). Это позволяет в большинстве случаев применять законы линейных электрических цепей с активным сопротивлением, где источником является рассчитанное геоэлектрическое поле в данный момент времени. Для расчетов сетей электропередач пользуются моделью с дискретным заземлением (Lehtinen, Pirjola, 1985), для нефтепроводов обычно используют модель с распределенными электрическими параметрами и распределенными источниками электрического поля (Trichtchenko, Boteler, 2002).

Частотный состав геоиндуцированных токов в этом допущении определяется только частотным спектром геоэлектрического поля и зависит от свойств глубинных проводящих структур в окрестности рассматриваемой линии электропередач или другой системы.

Для ГИТ важна не только амплитуда геомагнитных вариаций, но и их частота — более высокочастотные вариации сильнее проявляются в ГИТ. С учетом скин-эффекта в более высокочастотные вариации вовлекаются в среднем более близко лежащие к поверхности Земли слои, а при расчете более низкочастотных вариаций необходимо учитывать отклик более глубоких слоев.

Выделить наиболее важные геофизические процессы, формирующие ГИТ, опять же удобно, сведя их к типам геомагнитных возмущений. Суточные геомагнитные вариации, вызываемые вращением Земли относительно проводящей ионосферы, нагревом атмосферы на освещенной стороне, приливными движениями или высокоширотной ионосферной конвекцией в спокойных геомагнитных условиях дают до-

вольно малый вклад в ГИТ. Наиболее важными являются нерегулярные возмущения геомагнитного поля, генерируемые, например, внезапными импульсами (сжатиями магнитосферы, вызываемыми скачками давления солнечного ветра), магнитными бурями и суббурями. Амплитуды этих вариаций намного превосходят амплитуды вариаций спокойного времени, кроме того, более резкие (высокочастотные) нерегулярные вариации генерируют ГИТ с большей эффективностью.

Эффекты ГИТ. Системы электропередач. По сравнению с несущей частотой передачи электроэнергии в 50 или 60 Гц, частоты геомагнитных токов очень малы (мГц) и система реагирует на них, как на постоянный ток. Проходя через заземления нейтрали силовых трансформаторов в землю, ГИТ производит дополнительное подмагничивание сердечника (рис. 8.3.14). Даже небольшое увеличение тока (10 A)

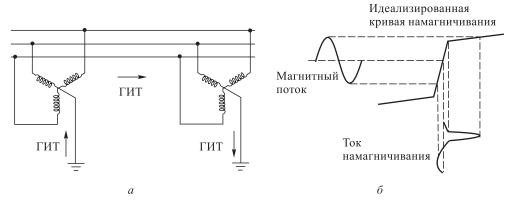


Рис. 8.3.14. Эффекты ГИТ в системах электропередач: a — схема проникновения ГИТ в нейтраль трансформатора при Y-схеме включения трех фаз с заземленной нейтралью; δ — смещение рабочего режима трансформатора в нелинейную часть

способно вызвать насыщение стали и сдвинуть рабочий линейный режим трансформатора в нелинейную часть гистерезиса.

Возникающие полупериодные искажения приводят к появлению гармоник в выходном токе. Кроме того, увеличение тока намагничивания вызывает увеличение потребления реактивной мощности трансформатором (за счет возрастания мощности холостого хода). Дефицит реактивной мощности приводит к снижению напряжения и устойчивости передачи электроэнергии. Дополнительный (из-за ГИТ) магнитный поток может замыкаться через внешние детали конструкции, вызывая нагрев изоляции, масла, появление газов и перегрев трансформатора вплоть до расплавления обмоток (Molinski, 2002).

Как следствие возросшего содержания гармоник возможны нарушения работы систем релейной и дифференциальной защиты трансформаторов, например, защиты от грозовых разрядов, настроенной на обнаружение высших гармоник из-за короткого замыкания (Гершенгорн, 1974, 1982). Следует отметить, что чувствительность различных систем электропередач к ГИТ зависит от конструкции трансформаторов, их соединений, а также от наличия других компонент (автотрансформаторов, трансформаторов тока, релейных защит) и для каждой системы должна изучатся отдельно (Чижишин, 1978; Абдурахманов и Ушан-Ходжаев, 1988).

Поскольку ГИТ являются квазипостоянными, наличие конденсаторов, предназначенных для увеличения эффективности электропередач, попутно может повлиять и на ГИТ в системе. Практически же включение конденсаторов только для того, чтобы уменьшить ГИТ, является достаточно дорогим мероприятием. Понижение чувстви-

тельности релейных защит и применение фильтров для выделения только гармоник, не связанных с ГИТ, также уменьшает вероятность ложного срабатывания. Необходимой мерой по предупреждению нежелательных отключений из-за ГИТ является информированность персонала о возможных магнитных бурях и о методике действий в такой ситуации (Boteler, 2003; Костенко, et al., 1997; Каррептап, Radasky, 2003).

При перетекании токов геомагнитной индукции между стальной трубой и землей, разность потенциалов изменяется и катодная защита не обеспечивает необходимый потенциал. Так как процесс коррозии является кумулятивным, то многолетние кратковременные отказы защиты с большой вероятностью приведут к уменьшению срока эксплуатации трубопровода. Поэтому, например, в авроральной зоне частые суббури дают больший кумулятивный эффект, чем единичные, пусть даже очень большие, магнитные бури (Gummow, 2002; Place, Sheath, 2001). Непосредственный эффект ГИТ оказывают на результаты контроля потенциала «труба—земля», поскольку как ГИТ, так и наличие коррозионных дефектов приводит к изменению потенциала.

Телефонные, телеграфные и другие линии связи. В линиях связи и сопутствующих линиях дистанционного питания геомагнитная индукция приводит к значительным сторонним токам и напряжениям. Так, в ходе магнитной бури 10–11 февраля 1958 г. сторонние токи в линиях связи в Мурманской области превышали 100 мА, а напряжение — 500 В, что вызвало прерывание телеграфной и телефонной связи на многих направлениях (Огульчанский, 1960). Современные волоконно-оптические линии связи не подвержены прямому геомагнитному воздействию, но протяженные системы электропитания таких линий все еще остаются уязвимыми.

Существуют сведения и о сбоях в работе железнодорожной автоматики, вызванных значительными ГИТ во время магнитных бурь, но систематический сбор данных о таких явлениях начат лишь недавно (Ораевский, et al., 2002).

В этом разделе необходимо также упомянуть о влиянии геомагнитных вариаций на использование измерений геомагнитного поля, начиная от простого отклонения стрелки компаса от нужного направления и до помех в геомагнитной съемке. Например, в ходе геофизической разведки геологические структуры под поверхностью Земли диагностируются по высокоточным (с точностью порядка 0,01 нТл) измерениям магнитного поля на поверхности исследуемого района. Аэромагнитная съемка используется для выделения аномалий на больших (сотни километров) участках или в труднодоступных районах. Разделение пространственных и временных флуктуаций является ключевым вопросом в задачах такого рода и нерегулярные геомагнитные вариации приводят к наибольшим трудностям в интерпретации результатов (Сатрьеll, 2003). При направленном горизонтальном бурении, необходимом при некоторых условиях залегания пластов в нефтегазовой промышленности, направление движения бура определяется с помощью магнитометра, что так же может быть затруднено во время магнитных возмущений.

Следует отметить в заключение, что чувствительность технических систем к ГИТ зависит не только от геомагнитной активности и широты места, но и от локальной структуры земной коры, электрической схемы самой системы и в каждом случае должна изучаться отдельно. В целом на первое место по значимости выходит проблема защиты линий электропередач.

8.3.5. Воздействие солнечной активности на атмосферные процессы и климат

А.А. Петрукович, А.А. Криволуцкий, О.М. Распопов, Ю.А. Наговицын, О.А. Трошичев

Введение. Поток солнечной энергии является определяющим фактором земных атмосферных и климатических процессов. Мониторинг полного солнечного излучения (ПСИ) (total solar irradiance), проводящийся с 1978 г. на борту космических аппаратов, показал наличие связанных с циклом солнечной активности 11-летних вариаций, амплитуда которых составляет порядка 0.1% от средней величины ($\sim 1366~{\rm B/m^2}$) (рис. 8.3.15). Увеличение теплового потока в годы солнечного

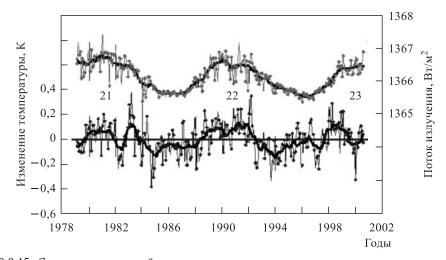


Рис. 8.3.15. Сравнение измерений полного солнечного излучения со спутниковыми измерениями температуры нижней тропосферы (после удаления эффектов вулканов, линейного тренда и пр.) (Douglass et al., 2002)

максимума создается комбинацией двух противоположно направленных факторов: более яркого свечения факелов и других активных образований, и частично компенсирующего влияния солнечных пятен, блокирующих конвекционный перенос тепла из внутренних слоев Солнца в фотосферу. На временных интервалах порядка месяца поток энергии меняется в основном из-за эволюции активных областей и их несимметричного расположения на вращающемся Солнце (Donelly, et al., 1982).

Изменение ПСИ I порядка $\Delta I \approx 0.1\%$ должно приводить к изменению поверхностной температуры Земли на $\Delta T \approx 0.05\,^{\circ}\mathrm{C}$: $I \sim \sigma T^4$, $\Delta T/T \approx 0.25\Delta I/I$. Эта величина не пренебрежимо мала и может быть выделена из статистики наземных температур (рис. 8.3.15).

Однако проблема влияния солнечной вариабельности на климат и атмосферу не исчерпывается таким простым решением (Wilcox, 1975; Herman, Goldberg, 1978). Вопервых, так как наблюдения ведутся всего лишь около 30 лет, то остается открытым принципиально важный вопрос о наличии более долговременных, чем 11-летние, вариаций ПСИ. Непротиворечащий наблюдаемым данным тренд 0,004 % за год при-

ведет к изменению температуры на 0,3°C в течение ста лет. Это заметная величина, если учесть, что при глобальном потеплении в двадцатом столетии температура в северном полушарии поднялась на 0,6°C (Mann, Bradley, Hughes, 1999). Интересен и возможный вклад солнечных вариаций в изменения земного климата в прошлом. В частности, например, сильное похолодание в конце XVII в. совпало с так называемым маундеровским минимумом солнечной активности (см. рис. 8.3.20). Во-вторых, зафиксированные изменения температуры примерно в два раза больше ожидаемых из чисто термодинамических соображений (Понявин, 2003; Raspopov et al., 2004).

Хотя энергия солнечного ветра, солнечных и галактических космических лучей пренебрежимо мала в сравнении с ПСИ, однако их потоки возрастают в десятки и сотни раз во время солнечных возмущений и они могут оказывать опосредованное воздействие на динамику и радиационный баланс атмосферы (Пудовкин, Распопов, 1992). Например, СКЛ и ГКЛ, высыпания магнитосферных частиц создают дополнительную ионизацию, что может изменять оптические свойства атмосферы. Вариации солнечного ветра и ММП могут оказывать влияние через глобальную электрическую цепь. Конкретные физические механизмы, отвечающие за воздействие этих факторов на атмосферную динамику и климат, пока достоверно не установлены. Статистический анализ возможных связей между соответствующими солнечными и земными параметрами в отдельных случаях показывает значимую корреляцию, но часто приводит и к противоположным результатам. Так например, имеются определенные указания на связь глобальных климатических осцилляций ENSO (El Nino Southern Oscillation — изменения циркуляции в тропической зоне Тихого Океана с периодичностью от трех до семи лет, приводящие в частности к аномалиям температуры прибрежных вод) и NAO (North Atlantic Oscillation — изменения градиентов меридионального давления в Северной Атлантике, влияющие на циклоническую активность над Европой) с геомагнитной активностью (Boberg, Lundstedt, 2002; Kodera, 2003). В целом, однако, следует отметить неоднозначность этих данных, в частности, такая связь обнаруживается только после 1970-80 гг. (Bucha, Bucha, 1998; Theill et al., 2003; Laut, 2003). Статистические данные о влиянии ГКЛ на облачность приводились в работах (Tinsley et al., 1989; Svensmark, Friis-Christensen, 1997). Однако, во многих исследованиях были получены и противоположные результаты (Harrison, Carslaw, 2003). Например, согласно (Farrar, 2000), корреляция с ГКЛ теряется, если данные о глобальной облачности разложить по высоте, типу облаков, по регионам. Исследование вариаций низкой облачности по синоптическим данным и регистрации солнечных дней показало (Palle, Butler, 2002), что глобальная облачность увеличивалась в течение XX в. безотносительно к вариациям потока ГКЛ.

Из-за слабости фактора воздействия и сложности нелинейной климатической системы Земли при таком анализе необходимо учитывать, что система атмосфера—океан имеет собственные характерные частоты, в том числе и в диапазоне периодов солнечных циклов. При воздействии даже слабого внешнего сигнала с похожим периодом может иметь место синхронизация или сдвиг фазы, изменение амплитуды колебаний. В частности, характерные времена тепловой циркуляции в океане составляют несколько лет, что существенно модифицирует глобальный отклик на периодах порядка солнечного цикла. Кроме того, различия в альбедо и теплоемкости разных типов поверхности Земли (океанов, ледяного покрова, континентов, облачного покрова), а также наличие развитой конвекции приводят к неоднородному и возможно противоположному региональному климатическому отклику на внешнее воздействие (Распопов и др. 2001; Raspopov et al. 2004).

Приведем несколько примеров работ российских специалистов по этой тематике, иллюстрирующих возможные подходы к проблеме.

Воздействие ММП на атмосферную циркуляцию в Антарктике. На антарктических станциях Восток и Купол С была обнаружена зависимость атмосферной температуры от параметров солнечного ветра (рис. 8.3.16). После 6-часового воздействия южного ММП рост температуры ΔT достигает $\sim 5^\circ$ примерно через 1–1,5 сут. после максимального отрицательного B_Z ; 15-часовое воздействие южного B_Z приводит к потеплению $\sim 10^\circ$ с уменьшением времени задержки до 12 ч (Troshichev et al., 2003; Troshichev, Janzhura, 2004).

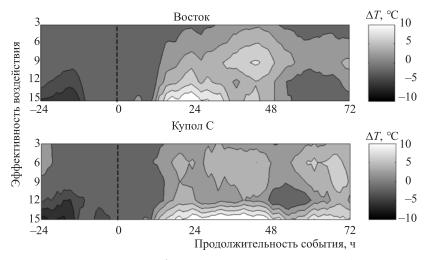


Рис. 8.3.16. Изменения температуры ΔT на станциях Восток и Купол C, как функция числа часовых интервалов с южным $MM\Pi$ $B_Z<-2$ нТл (ось ординат). По оси абсцисс отложено время (в часах) до и после достижения максимального отрицательного $MM\Pi$ (пунктирная линия) (Troshichev and Janzhura, 2004)

Одновременно с потеплением атмосферы в приземном слое на высотах более 10 км происходит выхолаживание (Troshichev et al., 2003). На этом основании был сделан вывод (Troshichev, Janzhura, 2004), что резкое возрастание электрического поля солнечного ветра приводит, через посредство глобальной электрической цепи, к формированию (или усилению) облачного слоя на высотах 5–10 км. Этот слой действует как экран, замедляющий радиационное выхолаживание воздуха, лежащего на ледяном куполе центральной Антарктики. В результате, в приземном слое атмосферы будет происходить потепление, а выше облачного слоя — похолодание, что и наблюдается в действительности.

В Центральной Антарктике в зимний сезон действует уникальная для Земли система катабатических (стоковых) ветров. Вследствие сильного радиационного охлаждения атмосферы у поверхности купола, воздушные массы стекают вдоль наклонной поверхности купола из наиболее высокой части южного континента радиально к берегам Антарктики, где они под действием силы Кориолиса разворачиваются по часовой стрелке и формируют стабильный циркумполярный вихрь. Таким образом, в зимний сезон над Антарктикой формируется система вертикальной атмосферной циркуляции, включающая сток воздушных масс вдоль Антарктического купола, их конвергенцию и восходящий поток вдоль береговой линии, и нисходящий поток в околополюсной области. Катабатический ветровой режим является одним из наиболее стабильных атмосферных процессов на Земле (Schwerdtfeger, 1984; Parish, Bromwich, 1991; Parish, 1992; Bromwich et al., 1993).

Аномальное потепление в околополюсной области приводит к нарушению этого регулярного ветрового режима и появлению ветров аномальных направлений (рис. 8.3.17). Как можно видеть, на береговых станциях аномальные ветры направ-

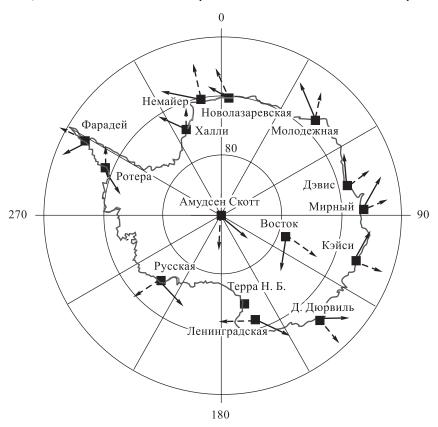


Рис. 8.3.17. Распределение регулярных (сплошные стрелки) и аномальных (штриховые стрелки) ветров в Антарктике

лены от берега на север, в сторону экватора. Появлению аномальных ветров, как правило, предшествует сильное увеличение южной B_Z -компоненты ММП. Таким образом, возмущенный солнечный ветер воздействует, через драматические потепления на ледниковом куполе Антарктики, на всю систему ветров над Южной полярной областью, что, в свою очередь, может влиять на динамику Южной осцилляции (ENSO).

Воздействие ионизирующей радиации на озоновый слой. Помимо основных газов — молекулярного азота и молекулярного кислорода, в атмосфере существуют так называемые «малые газовые составляющие», к которым относится и атмосферный озон. Несмотря на то, что объемная доля озона в атмосфере составляет всего $4 \cdot 10^{-7}$, озон является единственной компонентой, эффективно поглощающей солнечное ультрафиолетовое излучение (УФИ), предохраняя тем самым растения и животный мир от опасной радиации, а также воздействуя на температурный и циркуляционный режим средней атмосферы. Поэтому, вопрос о стабильности озонового слоя является центральным в изучении средней атмосферы (10–100 км). Максимум слоя расположен на высоте примерно 20–25 км. Кроме солнечного электромагнитного излучения на озон оказывают воздействие также корпускулярные потоки (солнечные

и галактические космические лучи и релятивистские электроны, высыпающиеся из радиационных поясов).

Наблюдения с американского спутника «Nimbus-4» позволили впервые зафиксировать уменьшение содержания озона в высоких широтах после вспышки на Солнце в августе 1972 г. Этот эффект удалось количественно воспроизвести в фотохимических моделях при учете дополнительного образования окислов азота («нечетного азота») и водорода («нечетного водорода») (Solomon, Crutzen, 1981).

Озон в атмосфере образуется в реакции тройных соударений:

$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$$
,

где через М обозначена любая молекула воздуха.

Необходимый для этой реакции атом кислорода образуется при диссоциации молекулы кислорода под действием УФИ. В тоже время озон разрушается УФИ в другой области спектра:

$$O_3 + h\nu \rightarrow O + O_2$$
.

В результате устанавливается равновесная концентрация озона. Однако, приведенных выше реакций (кислородного цикла) недостаточно для объяснения вертикального распределения озона (его получается слишком много). Необходимо учитывать другие малые составляющие, в первую очередь, наличие азотных и водородных окислов NO и OH. Источником NO служит закись азота (N_2O), образующаяся в почве и разлагающаяся в реакции с возбужденным атомом кислорода. Окислы водорода образуются в атмосфере при диссоциации водяного пара под действием солнечного излучения в линии L_{α} .

NO и OH, выступая как катализаторы, ускоряют разрушение озона в следующих основных каталитических циклах (Crutzen, 1974; Porter et al., 1976):

$$\begin{aligned} \text{1: OH} + \text{O}_3 &\rightarrow \text{HO}_2 + \text{O}_2 \\ \underline{\text{HO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{OH} + 2\text{O}_2} \\ \text{Итого: 2O}_3 &\rightarrow 3\text{O}_2, \end{aligned}$$

$$\begin{array}{c} 2 \colon \operatorname{NO} + \operatorname{O}_3 \to \operatorname{NO}_2 + \operatorname{O}_2 \\ \underline{\operatorname{NO}_2 + \operatorname{O} \to \operatorname{NO} + \operatorname{O}_2} \\ \underline{\operatorname{Htoro}} \colon \operatorname{O} + \operatorname{O}_3 \to 2\operatorname{O}_2 \end{array}$$

ОН-цикл наиболее эффективен в мезосфере (50–85 км). NO-цикл наиболее эффективен в стратосфере (10–50 км). В тропосфере действует несколько другой механизм, приводящий к небольшому увеличению озона при возрастании содержания NO.

Изменения в интенсивности солнечного УФИ приводят к слабой (порядка 2%) модуляции общего содержания озона в фазе с циклом солнечной активности (Chandra, 1991, Haigh, 1996). К изменению концентрации озона через дополнительную генерацию окислов азота и водорода приводит и ионизация атмосферы частицами высоких энергий. Быстрые вторичные электроны, возникающие при этом, могут вызывать диссоциацию или диссоциативную ионизацию молекул азота

$$N_2 + e^* \rightarrow 2N(^2D;^4S) + eN_2 + e^* \rightarrow N(^2D;^4S) + N^+ + e.$$

Почти все атомы, которые образуются в состоянии 2D в средней атмосфере, реагируют с ${\rm O}_2$, создавая окись азота:

$$N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O.$$

Таблица 8.3.5 Источники окислов азота в средней атмосфере. Приведены данные для разных уровней солнечной активности

Источник активного азота	Стратосфера, мол./год	Мезосфера, мол./год
N_2O глобально	$4.5\cdot10^{34}$	$5,3\cdot 10^{32}$
$N_2 O$ выс. широты $> 50^\circ$	$1,3 \cdot 10^{33}$	$7,6 \cdot 10^{30}$
ГКЛ глобально, макс. акт.	$2.7 \cdot 10^{33}$	$1,2 \cdot 10^{31}$
ГКЛ глобально, мин. акт.	$3.7 \cdot 10^{33}$	$1,6 \cdot 10^{31}$
ГКЛ выс. широты $> 50^\circ$, макс. акт.	$1,1\cdot 10^{33}$	$4,7\cdot 10^{30}$
ГКЛ выс. широты $> 50^\circ$, мин. акт.	$1,6 \cdot 10^{33}$	$7,0 \cdot 10^{30}$
ВРЭ глобально, максимум	$2,7 \cdot 10^{31}$	$1,4\cdot 10^{34}$
ВРЭ глобально, минимум	$2.7 \cdot 10^{30}$	$1,4\cdot 10^{33}$
Термосфера глобально, макс. акт.		$1,5\cdot 10^{34}$
Термосфера глобально, мин. акт.		$3,7\cdot10^{33}$
СКЛ глобально, максим. 1972 г	$2.5 \cdot 10^{33}$	$3.9\cdot10^{33}$

Реакция атомов азота в основном состоянии с молекулярным кислородом

$$N(^4S) + O_2 \rightarrow NO + O$$

идет достаточно медленно, так что все эти атомы азота в нижней термосфере гибнут в результате быстрой реакции с NO:

$$N(^4S) + NO \rightarrow N_2 + O.$$

Суммарное образование нечетного азота мало: почти каждый атом $N(^2D)$ создает молекулу NO, но почти каждый атом $N(^4S)$ разрушает ее на этих высотах.

В мезосфере, где присутствуют гидратные ионы-связки, ионизация вносит вклад в образование свободных радикалов водорода:

$$O_2^+ \cdot H_2O + H_2O \rightarrow H_3O^+ \cdot OH + O_2$$

 $H_3O^+ \cdot OH + e \rightarrow H + OH + H_2O$
 $H_2O \rightarrow H + OH$.

В табл. 8.3.5 приведены оценки, иллюстрирующие роль отдельных источников NO в средней атмосфере, включая вклад космических факторов. Основным источником «нечетного азота» в глобальном масштабе в средней атмосфере является окисление закиси азота. Однако в высоких широтах с этим вкладом сравнимо (и даже превышает) влияние СКЛ, высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ), а также поток NO с больших высот (из термосферы), где атомарный азот образуется при диссоциации N_2 солнечным УФИ и энергичными частицами (Vanhellemount, et al., 2002; Wilcox, 1973, Svensmark, Friis-Christensen, 1997).

Наиболее сильная ионизация в средней атмосфере вызывается протонами солнечных вспышек. Длительность их воздействия может меняться от нескольких часов до дней. Остановимся на двух мощных протонных событиях, произошедших в октябре 1989 г. и в июле 2000 г. В октябре 1989 г. проводился уникальный ракетный научный эксперимент в высоких широтах южного полушария на НИС «Академик Ширшов». В его ходе впервые удалось измерить в комплексе изменения в содержании озона, температуры, окиси азота, напряженность электрического поля в атмосфере,

а также содержание ионов во время сильного СПС (Zadorozhny, 1994). На рис. 8.3.18 представлена рассчитанная скорость ионизации атмосферы для 20 октября 1989 г.

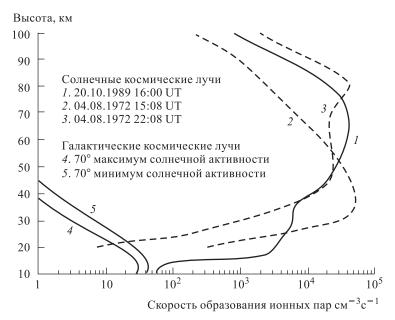


Рис. 8.3.18. Скорость ионизации атмосферы после СПС для 20 октября 1989 г. (кривая I) в сравнении с ионизацией после СПС 4 августа 1972 г. (кривые 3 и 2) и ионизацией, вызванной космическими лучами (кривые 4 и 5)

(кривая I) в сравнении с ионизацией после другого сильного СПС 4 августа 1972 г. (кривые 2 и 3), а также ионизацией, вызванной космическими лучами (кривые 4 и 5). Скорость ионизации от СПС в 10^4 раз превышала скорость ионизации от ГКЛ. На высотах 30-70 км выделилось около 0.5 эрг/см 3 энергии на единицу объема. Плотность ионов после вспышки настолько возросла, что был превышен инструментальный порог измерений. Было обнаружено сильное (более, чем на порядок) увеличение концентрации окиси азота (NO), которая на высоте 50 км составила $2 \cdot 10^9$ частиц/см 3 , а также разрушение озона после вспышки.

Отклик атмосферы на другую сильную протонную вспышку на Солнце 14 июля 2000 г. был зафиксирован спутником UARS. На рис. 8.3.19 изображены изменения (% по сравнению с невозмущенными условиями) в содержании озона в высоких широтах северного полушария после вспышки на Солнце 4.07.2000 (a — анализ данных UARS; δ — результаты численного трехмерного моделирования (Krivolutsky, et al., 2006)). Озон в мезосфере оказался почти полностью разрушен. Температура стратосферы в целом понизилась, однако, образовались области нагрева в нижней термосфере вследствие изменения зональной циркуляции в стратосфере и мезосфере.

Ниже 30 км основным ионизирующим фактором становятся галактические космические лучи. Этот фактор действует постоянно с учетом солнечного цикла и форбушпонижений. При этом эффективность образования «нечетного» азота сохраняется, а «нечетного» водорода, по-видимому, близка к нулю. В тропосфере, согласно расчетам с помощью фотохимической модели, изменения в содержании озона составляют несколько процентов по сравнению с отсутствием воздействия ГКЛ.

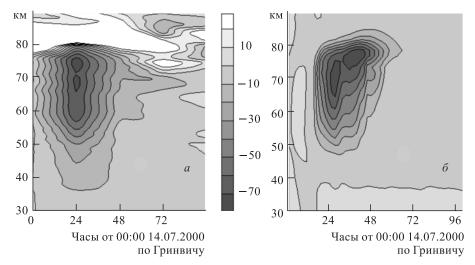


Рис. 8.3.19. Изменения в содержании озона в высоких широтах северного полушария после вспышки на Солнце 14 июля 2000 г. (% по сравнению с невозмущенными условиями): a — по измерениям спутника UARS и δ — по результатам трехмерного моделирования

Еще одним существенным источником NO являются релятивистские электроны (ВРЭ), высыпающиеся из радиационных поясов в периоды возмущений магнитосферы Земли в субавроральных широтах (Thorne, 1980; Callis et al., 2001). Их прямое влияние ограничивается мезосферой, но порождаемое электронами тормозное рентгеновское излучение с энергией, составляющей значительную долю энергии падающих электронов, может проникать и до 30 км. На высотах 20–30 км количество ионов, создаваемое в среднем за год ВРЭ, на 2 порядка меньше ионизации СКЛ, но настолько же превосходит ионизацию ГКЛ и сравнивается с вкладом самых больших вспышек на высотах 60–70 км.

Время жизни NO в атмосфере достаточно велико (до месяцев) и высокоширотное воздействие вызывает эффекты планетарного масштаба вследствие переноса дополнительно образовавшихся молекул окислов азота в ходе глобальной атмосферной циркуляции. Время жизни OH относительно мало (часы в мезосфере). Таким образом, во время протонной вспышки следует ожидать сильной, но короткой реакции (разрушения) озона в мезосфере, обусловленной каталитическим циклом с участием окислов водорода, и более затяжной (от суток до полугода в зависимости от мощности события) реакцией озона в стратосфере (где его больше), обусловленной увеличением содержания NO. При этом интегральный вклад космических лучей в изменение общего содержания озона будет в основном обусловлен увеличением NO в стратосфере, где расположен максимум в содержании озона. Более детальный обзор работ, посвященный воздействию космических лучей на атмосферу Земли, можно найти в обзорах (Криволуцкий и др., 1999; Krivolutsky, 2003).

Солнечная активность, ГКЛ и долговременные климатические вариации. Влияние солнечной активности на атмосферные процессы через посредство модуляции потоков ГКЛ обычно объясняется изменением прозрачности атмосферы, связанным с формированием аэрозольного слоя и облачности, в свою очередь, регулирующими поступающую на поверхность Земли солнечную энергию (Carslow, Harrison, Kirkby, 2002; Pudovkin, 2004; Vanhellemount, et al., 2002; Tinsley, Deen, 1991; Tinsley et al., 1989; Тимофеев и др., 2003; Stozhkov, 2003).

Ионы, генерируемые под воздействием потоков ГКЛ в атмосфере, увеличивают скорость образования ядер конденсации аэрозолей (< 1-2 нм) и скорость дальнейшего роста частиц до размеров ядер нуклеации (~ 100 нм). Так, скорость роста заряженных частиц с размерами 1-5 нм оказывается в 2 раза выше, чем у незаряженных частиц, а изменение скорости ионизации в нижней атмосфере на 20% приводит к 5-10% изменению концентрации 3-10-нанометровых частиц. В свою очередь, увеличение концентрации ядер конденсации в облаке должно привести к дальнейшему его развитию и соответствующим атмосферным эффектам. Другая идея о воздействии потоков космических лучей основывается на изменении проводимости атмосферы. Общее сопротивление атмосферы над грозовым облаком равно $\sim 10^6~{
m Om}$, в то время как интегральное сопротивление в области токов замыкания глобальной электрической цепи не превышает 200 Ом. Ионизация от потоков ГКЛ приводит к усилению плотности тока в глобальной электрической цепи, увеличению накопления зарядов непосредственно вблизи поверхности грозового облака в области уже сформировавшихся капелек воды и центров конденсации. Это должно приводить к дальнейшему развитию облачности.

Экспериментальные данные о влиянии ГКЛ на облачность верхнего яруса, содержание аэрозолей и циркуляционный режим нижней атмосферы, вариации тропосферного давления и температуры приводились в работах (Tinsley et al., 1989; Pudovkin, Babushkina, 1992; Besprozvannaya et al., 1997; Миронова и Пудовкин, 2005; Pudovkin et al., 1996, 1997; Pudovkin, Veretenenko, 1995; Svensmark, Friis-Christensen, 1997; Kristjansson et al., 2002).

Более долговременные проявления связи солнечной активности и климата могут быть изучены с помощью палеоданных. Потоки ГКЛ в атмосфере Земли порождают радиоизотопы 14 C, 10 Be и др. Радиоуглерод образуется при бомбардировке ядер атомов атмосферного азота нейтронами. Далее он быстро окисляется до ¹⁴CO и затем чуть более медленно (несколько недель) — до диоксида $^{14}\text{CO}_2$, который, диффундируя к нижним слоям атмосферы и, смешиваясь с обычной углекислотой, включается в цикл обращения углерода в системе атмосфера—океан—биосфера, осаждаясь в кольцах деревьев, ледниковых и донных отложениях. Изотоп ¹⁰Ве, в отличие от углерода, после образования оседает на аэрозолях и вымывается атмосферными осадками в течение нескольких месяцев, попадая в небиологические отложения. Время полураспада 14 С составляет 5730 лет, а 10 Ве — порядка 1,5 млн лет. Это позволяет путем анализа их относительной концентрации по сравнению с нерадиогенными изотопами в датированных земных архивах (в которых возраст слоев известен с той или иной точностью — кольца деревьев, сезонные донные отложения) выявлять изменения потока ГКЛ, и, следовательно, солнечной активности сотни и тысячи лет назад. (Васильев, Дергачев, Распопов, 1999). И действительно, содержание изотопов хорошо коррелирует с прямыми наблюдениями солнечной активности в последние несколько сотен лет (рис. 8.3.20) (Living With a Star: New opportunities in Sun-Climate Research, 2003). В вариациях содержания 14 С и 10 Ве с той или иной степенью надежности проявляются 11-, 22-, 80-90-, 200-210-, 2300-2400-летние солнечные циклы. Отметим, что данные о тысячелетних солнечных циклах могут быть получены только таким методом анализа палеоданных.

Кроме самостоятельной ценности такой анализ создает базу для сопоставления изменений солнечной активности и изменений климата, известных по другим данным (Hoyt, Schaten, 1997). Впервые проявление 11-летнего солнечного цикла в климатических процессах было выявлено при анализе вариаций ширины колец деревьев, которые, в основном, отражают локальные вариации летних температур или интенсивности осадков. В дальнейшем 11- и 22–23-летние периодичности были выявлены в вариациях поверхностной температуры океанов, периодичности засух,

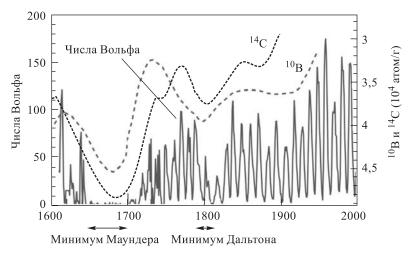


Рис. 8.3.20. Сравнение солнечной переменности (числа Вольфа) со сглаженной кривой содержания радиогенных изотопов. Выделены минимумы солнечной активности, носящие имена Маундера и Дальтона. Заметно возрастание солнечной активности за последние 100 лет

толщины океанических и озерных донных осадков, интенсивности атмосферных осадков и т. д. В последние годы, в связи с прогрессом в обработке данных ¹⁴С и ¹⁰Ве, следы более долговременной 200–210- и 2300–2400-летней солнечной цикличности выявлены в периодичности наступления альпийских ледников, в вариациях плотности аэрозолей в гренландском и антарктическом льдах, в повторении засух, в вариациях толщины донных отложений в озерах и океанах, и т. д. (Dergachev et al., 1998; Распопов и др., 2006).

В качестве примера, эффект солнечной активности (плотность ¹⁴С в кольцах деревьев) и динамика ширины колец (следующих за вариациями летних температур) можжевельника туркестанского (Центральная Азия), показывают высокую степень корреляции в последнем тысячелетии в диапазоне периодов 180–230 лет (коэффициент корреляции равен 0,82). (Raspopov et al., 2006). На рис. 8.3.21 приведено сравнение между вариациями ¹⁴С и концентрации стабильного изотопа кислорода ¹⁸О, характеризующего интенсивность выпадения осадков, в сталагмитах в северном Омане для временного интервала 9600–6100 лет назад. Отчетливо прослеживается детальная корреляция между развитием долговременных вариаций солнечной активности и названным климатическим параметром на всем протяжении более чем 3000-летнего временного интервала. (Дергачев и др., 2006).

Заключение. Вероятно ключевой вопрос данной области исследований — роль наблюдаемой сегодня и возможной в будущем солнечной изменчивости в динамику климата Земли. Кроме изменения общей иррадиации в этот процесс могут вносить вклад так же и солнечные и галактические корпускулярные излучения, но степень их влияния и физические механизмы, реализующие это воздействие, требуют дальнейшего изучения и уточнения (Living With a Star: New opportunities in Sun-Climate Research, 2003; Solar variability and Planetary Climates, 2007). В условиях достаточной слабости переменного сигнала «на входе» для правильной интерпретации результатов важно понимать особенности формирования отклика сложной нелинейной климатической системы. Значительную помощь в исследованиях может принести использование численного моделирования и анализ палеоданных.

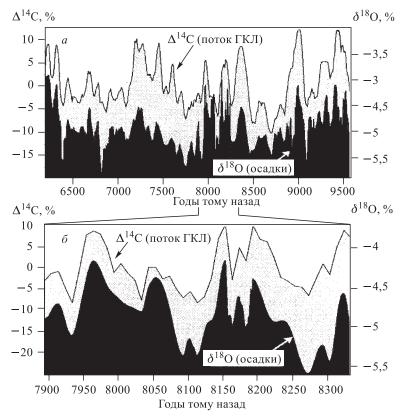


Рис. 8.3.21. Сравнение между изменениями солнечной активности (вариации плотности 14 С в кольцах деревьев) и интенсивностью выпадения атмосферных осадков (концентрации стабильного изотопа δ^{18} О в сталагмитах) в северном Омане для временного интервала 9600-6100 лет назад (Дергачев и др., 2006)

8.3.6. Гелиобиология *T.K. Бреус*

Представления о гелиобиологии и ее краткая история. *Гелиобиология* это междисциплинарная область знаний, изучающая воздействие солнечной активности на биосферу, включая человеческий организм. Эта наука объединяет исследования *биотропных* характеристик солнечной и геомагнитной активности, различные медицинские и биологические эксперименты по выявлению влияния этих факторов, поиск возможных биофизических и биохимических механизмов воздействия, работающих на всех уровнях от клеточного до популяционного.

Гелиобиология имеет достаточно продолжительную историю. Еще в XIX в. шведский ученый С. Аррениус осознал, что влияние Солнца на биосферу реализуется через физический агент электромагнитной природы. С начала века появлялись отдельные публикации о влиянии солнечных пятен на колебания цен на сельскохозяйственные продукты (У. Гершель, 1801), изменения численности животных, физиологические и патологические состояния человека и др. Эти результаты были получены для эпизодических наблюдений и вызывали скептицизм у специалистов, считавших биосферу изолированной от космического пространства.

В первой половине XX в. А.Л. Чижевским (Чижевский, 1973, 1995) были обобщены и проанализированы работы его современников по этой проблеме и сформулирована принципиальная концепция космического (прежде всего, солнечного) влияния на биосферу. Им же были предложены эффективные статистические методы анализа (например, использован метод наложения эпох, который применяется и в настоящее время) и проведена обработка собственного обширного фактического материала. В частности, А.Л. Чижевским были обнаружены синхронные изменения в возникновении эпидемий, а также ритмические изменения общей смертности населения за период от V в. Анализ вариаций некоторых других биологических показателей (миграция рыб, массовое размножение микроорганизмов и др.) также свидетельствовал о существовании внешних факторов воздействия, по-видимому, связанных с процессами на Солнце. Работы А.Л. Чижевского получили широкое мировое признание и его по праву считают основоположником гелиобиологии. Разумеется, во времена А.Л. Чижевского у науки не было достаточных знаний о существе солнечно-земных связей, и этим может быть объяснена некоторая наивность его представлений.

Начало космической эры привело к появлению новых данных о среде, в которой существует биосфера. На передний план интересов гелиобиологии выдвинулись вариации электромагнитных полей (ЭМП), связанные с воздействием солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на магнитосферу Земли. Результаты многочисленных исследований по поиску корреляций различных проявлений солнечной активности с функциональными и морфологическими характеристиками биологических систем подробно описаны в обзорных работах этого периода (Владимирский и Кисловский, 1982; Темурьянц и др., 1982; Сидякин и др., 1983, 1985). В 70-х гг. была создана специальная подкомиссия при Научном совете по геомагнетизму в Академии наук. Более подробный исторический обзор можно найти в книге Владимирского и Темурьянц (2000).

К началу 80-х гг., однако, всеобщий энтузиазм исследователей сменился во многих случаях глубоким скептицизмом. Во-первых, наибольшие сомнения были связаны с так называемым энергетическим парадоксом: Амплитуда естественных ЭМП, составляющая от десятых долей до нескольких сотен нТл, существенно меньше, чем электромагнитный шум, порождаемый технологической деятельностью человека и собственные тепловые шумы клеток (Adair, 1991). Во-вторых, во многих исследованиях статистически значимые связи медико-биологических и гелиогеофизических параметров не обнаруживались. Например, не было обнаружено корреляции данных о смертности в Америке от коронарной недостаточности и инсультов головного мозга за четыре года с различными индексами солнечной и геомагнитной активности (Lipa et al., 1976), и эти результаты на многие годы фактически блокировали интерес к гелиобиологии на западе. Анализируемые временные ряды медицинских и биологических статистических данных были короткими и не отличались однородностью, что часто приводило к низкой статистической достоверности результатов. В-третьих, механизмы воздействия ЭМП на живые организмы не были ясны, а лабораторные эксперименты плохо воспроизводимы и неоднозначны.

Тем не менее, в большинстве клинических наблюдений и лабораторных экспериментов с животными, проводившихся не только у нас в стране, но и за рубежом (Stoupel, 2002; Valberg et al., 1997), выявлялась определенная синхронность в возникновении экстремумов в заболеваниях и существенных реакциях сердечнососудистой системы и в солнечной активности, а также, наступление обострений на первые и вторые сутки после геомагнитных возмущений (Бреус и Рапопорт, 2003).

В середине 80-х и в начале 90-х гг. заметному прогрессу в понимании проблемы воздействия слабых ЭМП на биологические объекты способствовали успехи теории описания динамики неустойчивых систем (Winfree, 2001), в частности, понятие

об индуцированных шумом переходах (Horsthemke, Lefever 1984; Гласс и Мэки, 1991). В частности, слабый периодический сигнал может быть захвачен системой, совершающей хаотические переходы из одного состояния в другое под действием шумового фона, только при определенном уровне шума. Именно поэтому не все естественные или техногенные ЭМП могут быть биотропными.

Биологические объекты, согласно этой теории, являются сложными открытыми системами, активную роль в самоорганизации которых играет внешний шум. Артур Уинфри продемонстрировал, что при определенных условиях, под влиянием весьма слабых возмущений, биологические «осцилляторы» (пульсирующие клетки мозга и сердца) спонтанно становятся синхронизованными, а даже наиболее стабильные из подобных ритмов могут внезапно коллапсировать, приводя к фатальным последствиям. Очевидно также, что реакция сложных нелинейных систем на слабые воздействия зависит не только от характера воздействующего фактора, но и от состояния самой системы. Это могло приводить, в частности, к упоминавшейся выше неоднозначности лабораторных экспериментов. Эти теоретические представления помогли в значительной степени разрешить проблему энергетического парадокса.

Вопрос о том, как подобный физический механизм реализуется на уровне биохимических и биофизических процессов, до сих пор остается открытым. Было продемонстрировано экспериментально, что крайне слабые переменные ЭМП оказывают существенное воздействие на свойства биологических тест-систем не только животного, но и растительного происхождения (например, Леднев и др., 1996). Предлагается целый ряд гипотез о том, что является рецептором — «приемником» — этих слабых сигналов, достаточно эффективным, чтобы вызвать явления на организменном уровне (Бинги и Савин, 2003; Бинги, 2002; Cherry, 2002).

Другими дисциплинами, важными для становления новых плодотворных концепций в гелиобиологии, стали хронобиология и хрономедицина, занимающиеся вопросами временной организации биологических объектов (или биоритмами). Последние определяются как самой природой биосистем, их генетическим аппаратом, так и внешними факторами (Breus et al., 1995).

В середине 80-х гг. исследования по поиску биологических эффектов солнечной активности были продолжены с учетом успехов упомянутых выше дисциплин. В частности, было сформировано междисциплинарное сообщество специалистов из РАМН, РАН (ИКИ) и Центра по Хронобиологии Миннесотского Университета (США). Этой группой был проанализирован и обобщен опыт предыдыдущих исследователей и сформулирована согласованная концепция воздействия на биосистемы (Breus et al., 1995; Комаров и др., 1989). Было высказано предположение, что ритмы естественных электромагнитных полей сыграли важную роль в самоорганизации биологических систем и «завели» на ранних стадиях эволюции «биологические» часы. Периоды ритмов естественных ЭМП интегрировались во временную структуру биологических систем и стали их эндогенными (собственными) ритмами. Поэтому вследствие резких апериодических изменений, т.е. сбоев ритмов ЭМП (во время геомагнитных возмущений), должна происходить десинхронизация внутренних биологических ритмов как одно из проявлений общего адаптационного синдрома. Может быть проведена аналогия с суточными (циркадианными) биологическими ритмами, которые возникли под воздействием вращения Земли. Подобное наблюдается, например, при десинхронизации фаз суточных ритмов во время трансконтинентальных перелетов.

Необратимая реакция живых организмов на «сбои ритмов» однако, может возникать в основном тогда, когда биологическая система находится в состоянии неустойчивости, т. е., имеется патология адаптационной системы (заболевание), или адаптационная система не сформировалась, как у детей, или перенапряжена вследствие воздействия другого стрессового фактора. Приведем несколько ключевых моментов этой концепции.

Структура гелиогеофизических и биологических ритмов. Гелиогеофизические ритмы с периодами, соответствующими синодическому (видимому с Земли) периоду вращения Солнца (около 28 дней), в частности, геомагнитная активность, вызываемая приходом к Земле рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра, стали известны еще с начала космических исследований. Околонедельные

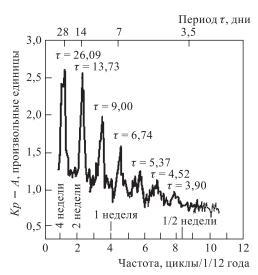


Рис. 8.3.22. Спектр вариаций геомагнитного $K_{
m p}$ -индекса за 1932–1990 гг. (Бреус и Рапопорт, 2003)

ритмы солнечной динамики и геомагнитной активности привлекали значительно меньшее внимание и практически не анализировались. Оказалось, однако, что периоды около 14 дней, 9 дней, 6,75 дней и 5,4 дня являются также характерными периодами геомагнитного K_p -индекса (рис. 8.3.22). Очевидно, что основной причиной таких ритмов является вращение Солнца и его гармоники, а также их проявление, например, в секторной структуре межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра.

До недавнего времени считалось, что суточный ритм является ведущим в иерархии биологических ритмов живых организмов на всех уровнях сложных биологических систем, от клеточного до организменного. Инфрадианные (с периодом < 28 дней и > 28 ч) биологические ритмы не привлекали к себе пристального внимания, хотя некоторые из них были известны еще в античные времена как

ритмы обострений различных заболеваний. На эмпирическом уровне они знакомы врачам и в современной медицине. (рис. 8.3.23).

Популярным до конца 80-х гг. являлось мнение, что инфрадианные биологические ритмы имеют, в основном, социальное происхождение (см., например, Young, 1988). Однако, впервые эндогенный характер околонедельных и полунедельных биологических ритмов был отмечен в 1965 г. в работах Ф. Халберга, где было показано, что они имеют свободное течение, а их период слегка отличается от точного периода календарной недели — 7 дней (Zerubavel, 1985). В самом деле, ритмы кризисных дней в случае тяжелых заболеваний или отторжения трансплантатов после операций синхронизируются с началом заболевания или днем проведения операции.

Инфрадианные ритмы с периодами, соответствующими периоду вращения Солнца и его гармоникам, присутствуют на всех уровнях биологических систем от клетки до организма. Например, в спектрах основных функциональных показателей новорожденных (частоты сердечных сокращений, систолического и диастолического кровяного давления, ритма дыхания) в течение первых четырех месяцев жизни присутствует весь набор ритмов с периодами, близкими к ритмам гелио-геомагнитных факторов, а суточный ритм начинает проявляться только на пятом месяце (Бреус и Рапопорт, 2003).

Медико-биологические эффекты слабых естественных ЭМП. Большую часть материала, рассмотренного в этом разделе, можно найти в книге (Бреус и Рапопорт, 2003) и литературе, представленной в ссылках к этой книге. В целом, исследования

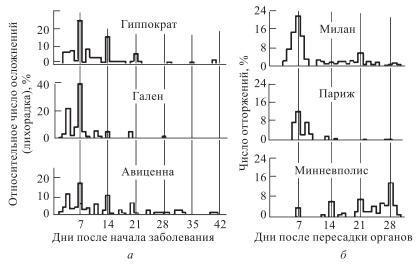


Рис. 8.3.23. Статистика обострений после начала заболевания лихорадкой, построенная по записям врачей античного периода (а) и отторжений трансплантатов после операций по пересадке почек и сердца в клиниках Парижа, Милана и Миннеаполиса (б) (Бреус и Рапопорт, 2003)

показали, что ряды гелиогеофизических и медико-биологических параметров коррелируют, причем происходит синхронное изменение амплитуды вариаций околонедельных гелиогеофизических и биологических ритмов в цикле солнечной активности, что является ключевым аргументом их связи.

В частности, по банку данных вызовов скорой помощи в г. Москва за три года (1979–1981) по поводу 10 различных заболеваний и травм было показано, что достоверное возрастание числа вызовов скорой помощи (на 13%) происходило только в группе больных инфарктом миокарда во время сильных магнитных бурь с индексом Aa > 60. (Комаров и др., 1994). Таким образом, сердечно-сосудистая система является одной из основных мишеней для гелиогеомагнитных возмущений. В клинических исследованиях в этой первой «группе риска» во время геомагнитных возмущений были выявлены различные функциональные расстройства сердечного ритма у 85% больных (172 чел.). Слабые функциональные расстройства сердечного ритма наблюдались и у 60% здоровых людей (58 чел.), однако они были выражены существенно слабее, чем у больных, и не требовали специальной терапии. Во время геомагнитного возмущения у 80% больных и 30% здоровых людей возрастала вязкость крови, происходило замедление капиллярного кровотока, наблюдалась агрегация эритроцитов, снижалась выработка гормона мелатонина, регулятора суточных ритмов. У здоровых людей и больных молодого возраста эти эффекты быстро проходили после окончания возмущения. Эти результаты свидетельствуют об активации симпатического отдела вегетативной нервной системы, характерной для адаптационного синдрома.

В другой «группе риска» (людей, находящихся в состоянии стресса) у космонавтов (49 чел.), адаптационная система которых перенапряжена действием факторов полета, во время геомагнитного возмущения также достоверно наблюдались реакции типа адаптационного синдрома, а именно — изменялась частота сердечных сокращений, происходила опасная стабилизация сердечного ритма, возникали аритмии, изменялся сосудистый тонус (Бреус и др., 2002).

Биотропные факторы воздействия ЭМП. В лабораторных и эпидемиологических исследованиях показано, что экспозиция людей в электромагнитных полях низкой и очень низкой частоты сопровождается изменением вариабельности частоты сердечных сокращений, что может приводить к внезапной смерти от аритмии и к развитию инфаркта миокарда (Sastre, 1998; Savitz et al., 1999). Было высказано предположение, что геомагнитные пульсации Рс1 (Пудовкин и др., 1976)

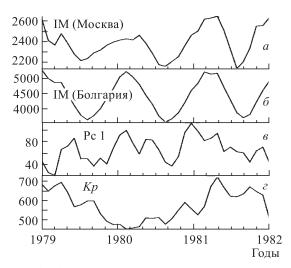


Рис. 8.3.24. Вызовы скорой помощи по Москве по поводу инфарктов (a), смертность от инфаркта миокарда в Болгарии (б), Pc1-пульсации (s) и K_p -индекс геомагнитной активности (z)

(частота 0,5-2,0 Γ ц, амплитуда 10-100 пТл, максимум в суточном ходе 00-06 ч местного времени, когда происходит максимальное число сердечных нарушений), совпадающие с основными ритмами сердца, могут оказаться биотропными агентами магнитных бурь. Первые исследования роли Рс1-пульсаций, проведенные в 2005 г., дали обнадеживающие результаты (Клейменова и др., 2007) (рис. 8.3.24). Очевидна высокая корреляция (R=0.84) между числом инфарктов миокарда в Москве (1979-1981) и общей смертностью от инфаркта в Болгарии. Это может свидетельствовать о наличие глобального внешнего фактора, оказывающего негативное влияние на сердечно-сосудистую систему больных. В 70% случаев дней с аномально большим числом инфарктов миокарда в Москве отмеча-

лось появление геомагнитных пульсаций типа Pc1. Вероятность появления таких дней вдвое превышает вероятность их случайного совпадения.

Солнечная и геомагнитная активность — лишь один из малоизученных факторов внешней среды, воздействующих на человека. Можно упомянуть, например, слабые гравитационные ритмы, порождаемые воздействием Луны, также имеющие около 27-дневную периодичность. Помимо долгопериодических ритмов, в спектрах колебаний ЭМП имеются компоненты (доли и единицы Герц), близкие к ритму сокращения сердечной мышцы, α , β , ϑ — ритмам мозга. Гелиогеофизические сигналы с такими частотами появляются при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли не только в геомагнитном поле (геомагнитные пульсации), но и в ионосфере (Шумановские резонансы; Cherry, 2002) и атмосфере (инфразвуковые волны). Они, так же, как долгопериодические ритмы, формируют среду обитания биологических объектов и могли участвовать в формировании их эндогенной ритмики.

Вкратце, выводы изложенной выше концепции воздействия солнечной активности на биосферу заключаются в следующем. Несмотря на то, что амплитуда этого воздействия мала, оно может оказывать существенное влияние на сложные биологические системы на определенных частотах, связанных с природными ритмами и проявляться в определенных группах риска.

В целом, гелиобиология это междисциплинарная и достаточно молодая наука. Следует отметить, что предлагаемые гипотезы пока не решают проблемы полностью и не приводят абсолютно убедительных доказательств. Для достижения успеха необходимо объединение усилий геофизиков, биологов, биофизиков, химиков и медиков.

8.4. Прогноз гелиогеофизической обстановки

А.А. Петрукович, А.В. Белов, В.Н. Обридко

8.4.1. Введение

Задача прогнозирования солнечной и геомагнитной активности является естественным продолжением фундаментальных исследований. В целом, прогноз гелиогеофизической обстановки отличается от прогноза обычной атмосферной погоды. Прежде всего, единственным источником всех интересующих нас событий является Солнце. Геомагнитная активность является следствием и отражением солнечной активности, воздействующей на Землю посредством солнечного ветра и ММП.

Долгосрочный прогноз на годы вперед является по существу прогнозом общих характеристик профиля солнечного цикла: времени наступления и высоты максимума и т. п. Когда уже известно расположение активных центров на поверхности Солнца то, предполагая некоторую стабильность ситуации на протяжении пары оборотов Солнца (так называемую рекуррентность), можно сделать среднесрочное предсказание на 1–2 месяца вперед. Краткосрочный прогноз солнечных нестационарных (эруптивных) событий (вспышек или выбросов массы) на несколько дней вперед возможен после появления из-за восточного лимба Солнца активной области или ее рождения на видимом диске. После регистрации вспышки или другой солнечной эрупции необходимо прежде всего дать оценку вероятности попадания Земли в зону распространения возмущения солнечного ветра и степени его влияния (о так называемой геоэффективности солнечного события). Информацию о силе магнитной бури дает спутниковый мониторинг солнечного ветра (за час до ее реального начала) или мониторинг реальных изменений в магнитосфере и ионосфере Земли.

Разумеется, существует связь между степенью заблаговременности и точностью, а главное, детальностью прогноза. Бессмысленно требовать от прогноза на несколько лет вперед точных данных о конфигурации солнечных пятен в следующем максимуме активности или точных дней развития магнитных бурь. Однако даже данные об общем ожидаемом уровне активности будут полезны при перспективном планировании многих видов деятельности — например геолого-разведочных работ или графика космических проектов. Каждый новый вид прогноза имеет смысл, только если он улучшает и детальность, и достоверность имеющихся прогнозов. Простые эмпирические соображения часто работают лучше, чем сложные численные модели.

Главным результатом почти любого прогноза являются различные индексы активности. Почему часто используются именно индексы, а не непосредственно наблюдаемые физические характеристики? Во-первых, описываемые явления солнечно-земной цепи представляют собой взаимодействие многих конкурирующих процессов, и мы просто не можем характеризовать событие каким-либо обозримым набором физических параметров. Часто, именно наиболее важный для физического описания процесс либо недоступен для наблюдения, либо точность наших измерений недостаточно высока. Численные модели же, связывающие конкретные физические параметры, как правило, слишком сложны для оперативного использования, а точность прогнозов, сделанных на их основе, невелика. Поэтому почти всегда приходится использовать индексы, эмпирически обобщая и упрощая информацию о процессе, но вместе с тем сохраняя разумный уровень достоверности. Во-вторых, многие модели, применяемые для расчетов конкретных физических параметров в отдельных областях или процессах (например, модели ионосферы или верхней атмосферы), используют величины индексов как входные параметры для характеристики внешних условий. Еще одна трудность состоит в том, что все гелиогеофизические процессы содержат значимую стохастическую составляющую. Чтобы иметь возможность применять методы статистики, мы должны собрать большой экспериментальный материал, и, опять же, наибольшее количество данных накоплено именно в виде индексов.

Вместе с тем, свое место в методиках прогноза постепенно занимают и модели, основанные на физике и оперирующие конкретными физическими величинами. Таким примером может служить, например, прогноз параметров солнечного ветра и ММП по магнитным полям источника на Солнце (см. Белов и др., 2006, 8.4.7.)

Основу системы прогноза составляют спутниковые и наземные наблюдательные средства, предоставляющие информацию о состоянии Солнца, межпланетной среды, околоземного пространства, ионосферы и верхней атмосферы. Ключевым аспектом здесь является необходимость непрерывности наблюдений и постоянной передачи данных для их последующего анализа в режиме «реального времени».

Прежде всего делается общий прогноз состояния солнечной активности, межпланетной среды и общего состояния магнитосферы Земли. Наиболее известные
центры подготовки такого прогноза: Центр Космических Прогнозов (SEC/NOAA,
Боулдер, США); Австралийское Бюро Прогнозов (IPS), Европейский центр космической погоды (SIDC, Бельгия); Канадская солнечно-земная служба (STD); Российские
центры прогнозов геофизической обстановки (ИЗМИРАН, ИПГ). Несмотря на то, что
все прогнозисты фактически опираются на одни и те же солнечные, межпланетные
и геофизические данные, прогнозы часто существенно различаются. Это происходит из-за сложности реальных солнечно-земных ситуаций, допускающей различные
интерпретации и выводы. Как правило, результаты такого мониторинга и прогноза
находятся в свободном доступе.

Информация о таком «общем состоянии» космической среды вместе с дополнительными данными мониторинга в различных точках магнитосферы и ионосферы Земли далее используется для решения более узко ориентированных задач, таких как, например, определение плотности верхней атмосферы, радиационной обстановки на конкретных орбитах, уровня помех в системах навигации и связи. Модели и результаты такого специализированного прогноза, как правило, свободно не распространяются.

Ниже мы расскажем о некоторых подходах к прогнозу общего состояния солнечной и геомагнитной активности.

8.4.2. История и сегодняшний день прогноза

Если прогноз солнечных циклов возник фактически сразу после начала профессиональных наблюдений Солнца более 150 лет назад, то прогноз нестационарных процессов и явлений гораздо более молод и ведет свой отсчет с Международного геофизического года (1957–1958 гг.). Правда, прогноз магнитно-ионосферных возмущений для нужд навигации и радиосвязи существовал уже во время второй мировой войны, но ввиду бедности солнечной информации он по существу не включал в себя краткосрочного солнечного прогноза и в лучшем случае ориентировался на 27-дневную повторяемость чисел Вольфа. Вскоре после начала МГГ стало ясно, что солнечные вспышки, которые до этого считались довольно редким явлением, происходят очень часто, по нескольку событий в день, а количество заинтересованных в прогнозе отраслей техники резко увеличилось, в первую очередь за счет космонавтики. Это означало, что стал необходим круглосуточный мониторинг, который невозможен без широкой международной кооперации.

В 1962 г. была создана международная служба урсиграмм (от названия международного союза радионаук URSI, так как сильнее всего необходимость прогноза в то время ощущалась связистами) и мировых дней, которая объединяла работу 12 центров, занимавшихся краткосрочным прогнозированием гелио-геофизической активности. Наиболее известными из них были центры в Боулдере (США), Колорадо —

Спрингс (США), Медоне (Франция) и Крыму (СССР) (Симон и МакИнтош, 1976). При этом, Крымский центр работал только во время специальных экспериментов, так называемых «программ Северного», которые были созданы для оценки возможной опасности при полетах космонавтов, но в дальнейшем использовались и в других проектах (Северный, 1958, 1964; Гопасюк и др., 1963).

Прогнозисты в то время располагали только наземными оптическими и радионаблюдениями Солнца. Оперативная связь осуществлялась телеграфом. Раз в сутки с нескольких обсерваторий поступали телеграммы с оценками чисел Вольфа, чисел пятен в группах и площадей групп пятен, о потоке радиоизлучения на длине волны 10,7 см, о радиовсплесках на различных частотах. Особое значение придавалось обнаружению всплесков IV типа как указателю на вероятный выброс вещества и возможный «протонный» характер (т. е. появление СКЛ) события. В качестве дополнительных использовались также наблюдения в линии Са II К, а для раннего предупреждения о выходе активной области из-за восточного лимба — данные о короне и радиоисточниках.

Данные о числе, балле и координатах вспышек поступали довольно нерегулярно, так как реально патруль вспышек в H_{α} никогда не обеспечивал круглосуточных наблюдений. Этого было достаточно, чтобы оценить уровень вспышечной активности группы пятен, но недостаточно для того, чтобы надежно оценить степень оправдываемости прогноза. В наилучшем положении находился центр в Боулдере, который с 1972 г. получал также информацию со спутников, измерявших поток рентгеновского излучения Солнца, в котором вспышки проявлялись наиболее отчетливо, и с ряда специализированных полуавтоматических станций наблюдения.

Отдельно кодировалась магнитная классификация групп пятен. Наблюдатель должен был измерить поле или хотя бы оценить полярность во всех пятнах группы и указать их координаты. Таким образом, в идеале получалась примерная карта магнитного поля в активной области. К сожалению, эта работа требовала нескольких часов, поэтому ни одна обсерватория не могла послать больше, чем одну телеграмму в сутки.

Формат выдаваемых прогнозов был довольно лаконичен. Прогноз, поступавший из Крымской обсерватории просто содержал указание на максимальный оптический балл вспышек в каждый из предстоящих дней. Медонский центр указывал характеристику каждой активной области по следующей схеме: спокойный центр — менее одной хромосферной вспышки в день, эруптивный центр — несколько хромосферных вспышек в день и/или не более одного радиовсплеска в день, активный центр — по крайней мере, одно геофизическое явление в день и протонный центр — по крайней мере, одна протонная вспышка. Боулдеровский центр указывал вероятность вспышек с рентгеновскими классами М и Х, а также протонных событий (http://www.sec.noaa.gov).

Современный прогнозист имеет в своем распоряжении существенно больший набор данных. С развитием телекоммуникационных технологий стало возможным и оперативное распространение практически любой информации через Интернет (см. разд. 8.6). Принципиально важным является проведение измерений в космосе, позволяющее вести постоянные наблюдения во всем диапазоне длин волн солнечного излучения. Первые свидетельства мощных спорадических явлений на Солнце получают именно благодаря спутниковому мониторингу рентгеновского излучения, солнечных космических лучей.

С 1996 г. детальные наблюдения Солнца ведет космический аппарат SOHO. Снимки Солнца в оптическом диапазоне, в ультрафиолетовых и рентгеновских лучах несут информацию о корональных выбросах массы, о положении и развитии корональных дыр, о динамике активных областей, о трансформации солнечных волокон,

об эруптивных и постэруптивных явлениях, позволяют определить фотосферные магнитные поля. С 1997 г. ведется и постоянный мониторинг солнечного ветра и ММП со спутника АСЕ. К услугам прогнозиста есть и много других данных, позволяющих вести работу по совершенствованию прогноза.

8.4.3. Прогнозирование солнечной активности

Прогноз солнечного цикла. Прогноз солнечной активности на несколько лет вперед, а также, прогноз характеристик следующего цикла являются одними из самых старых задач физики Солнца. К сожалению, нельзя сказать, что за эти годы они успешно решены. Перед каждым новым максимумом активности прогнозы высоты предстоящего цикла разнятся в диапазоне практически всех возможных значений от 60 до 200 единиц чисел Вольфа. (Obridko, 1995; Lantos, Richard, 1998; Hathaway, Wilson, Reichmann, 1999). Очередная демонстрация ненадежности прогноза высоты цикла состоялась в 23-м цикле (см. разд. 8.4.4).

В целом все методы прогноза цикла можно разделить на два типа. Первый тип можно условно назвать методом статистической экстраполяции. Предполагается, что свойства интересующего нас явления (прежде всего периодичности), выявленные при статистическом анализе прошлых данных, сохраняются и на прогнозируемый интервал времени. Во втором типе используются какие-нибудь дополнительные данные, которые как-либо характеризуют ситуацию, в которой вероятность события становится особенно высокой. Первый тип чаще используется при прогнозировании на несколько месяцев или лет вперед, второй — обычно при прогнозировании нестационарных явлений в уже существующих активных центрах.

Рассмотрим основные прогностические методы (Vitinsky, 1965; Hathaway, Wilson, Reichmann, 1999; Lantos, Richard, 1998). Первый напрашивающийся метод проистекает из самого утверждения о существовании солнечной цикличности: Предполагая, что все циклы одинаковы, прогнозируем основные характеристики нового цикла через простое усреднение предыдущих циклов (так называемая климатология). Так как циклы все-таки сильно различаются по длине и высоте, то часто историю индекса солнечных пятен аппроксимируют комбинацией синусоид различных периодов (11, 22, 80–90 лет и т. д.), составляя прогноз через продолжение этих гармоник в будущее (Капе, 2001, 2002; Khramova et al., 2002; McNish, Lincoln, 1949; Calvo, Ceccato, Piacentini, 1995; Conway et al., 1998; Бондарь, Ротанова и Обридко, 1996; Чистяков, 1983; Dmitrieva, Kuzanyan, Obridko, 2000; Stewart, Panofsky, 1938; Hathaway, Wilson, Reichmann, 1994). В последнее время для составления более адекватных математических моделей солнечного цикла применяются и нейронные сети (McPherson et al., 1995; Fessant, Pierret, Lantos, 1996). Все эти методы, по-существу, являются методами статистической экстраполяции.

Однако, из-за того, что длительность надежных наблюдений составляет всего около 200 лет, то в таких методах трудно корректно учесть вековую составляющую, и они наиболее эффективны для прогноза внутри цикла: по начальной фазе развития проводится перенормировка среднего профиля по амплитуде и временному масштабу. Иногда вместо среднего цикла используют аналог — один из прошлых циклов, наиболее похожий на текущий. Для прогноза внутри цикла можно использовать также концепцию основных опорных точек цикла, состоящую в утверждении, что в каждом цикле есть моменты, когда его плавное течение резко меняется (Витинский, Куклин, Обридко, 1986; Kuklin, Obridko, Vitinsky, 1989). Хотя длительности циклов различаются довольно значительно, момент наступления очередной опорной точки, отнесенный к полной длине цикла, меняется не так сильно и по ее положению можно сделать дальнейший прогноз. (Обридко, Шельтинг, 2003; Lantos, 2000). Для более

заблаговременного прогноза могут использоваться время появления или широта первых пятен нового цикла, (Wilson, Hathaway, Reichmann, 1998a, b), дисперсия чисел Вольфа на разных фазах цикла (Obridko, 1988), соотношение период—амплитуда (Waldmeier, 1935; Чистяков, 1983; Schove, 1983), и т. д. Заметим, что связь амплитуды цикла с его периодом может говорить о нелинейности процесса 11-летних колебаний активности (Наговицын, 1997), и, в таком случае, применимость линейных методов прогноза, например, основанных на разложении поведения солнечной активности на периодические фурье-гармоники и их экстраполяции в будущее, достаточно ограничена.

Для прогноза высоты предстоящего нечетного цикла чаще всего используется правило Гневышева и Оля (1948). В оригинальной форме оно гласит, что сумма чисел Вольфа цикла с четным номером связана с аналогичной суммой последующего за ним нечетного цикла (коэффициент корреляции выше 0,9) так, что первая величина всегда меньше. Это правило выполняется и для среднегодовых значений на разных фазах цикла, в том числе и в максимумах циклов (Кореску́, 1950). Однако, в 23-м цикле оно нарушилось: 23-й цикл оказался ниже 22-го.

Подходы, при которых характеристики цикла вычисляются с использованием сторонних гео- и гелиофизических данных, можно в целом охарактеризовать как методы предвестников. Наиболее известным среди них является метод Оля (Оль, 1966,1972; Ohl, Ohl, 1979) и его модификации (Thompson, 1989, 1993; Feynman, 1982; Obridko, 1995; Lantos, Richard, 1998; Hathaway, Wilson, Reichmann, 1999), предсказывающий, что высота предстоящего цикла пропорциональна геомагнитной активности вблизи минимума данного цикла. В ряде случаев этот подход дает существенно более надежные результаты, так как является, по существу, единственным причинно-обусловленным методом прогноза: в ходе цикла происходит преобразование крупномасштабных полей, определяющих геомагнитную активность на фазе минимума, в локальные поля солнечных пятен на фазе максимума. Таким образом, возникает на первый взгляд парадоксальная связь: вариации магнитного поля на Земле являются предвестником магнитного поля на Солнце с заблаговременностью около 5 лет.

Родственными методу Оля являются развитые в последнее время методы прогноза с заблаговременностью 5–6 лет, опирающиеся на разнообразные индексы крупномасштабного или полярного солнечного магнитного поля (Макаров и Тлатов, 2000; Наговицын, 2006; Макаров и Тлатов, 2004; Макагоv, Макагоvа, 1996). Предлагался прогноз следующего цикла и по характеристикам короны (Badalyan et al., 2001; Altrock, 2003). В принципе, после того как спрогнозирована высота цикла методом предвестников, можно далее применить статистическую экстраполяцию и использовать перенормированный среднестатистический цикл (Hathaway, Wilson, Reichmann, 1999).

Прогнозы на 23-й, 24-й циклы и далее. С целью выработки согласованного прогноза 23 цикла были собраны рабочие совещания в сентябре 1996 г. в Боулдере (США) (http://www.sec.noaa.gov/info/Cycle23.html) и в марте 1994 г. в России в ИЗМИРАН (Obridko и et al., 1994; Obridko, Kuklin, 1994; Obridko, 1995). Результаты этих двух совещаний в целом согласовались друг с другом. Наиболее вероятной датой максимума был назван март 2000 г. с возможной ошибкой ±15 месяцев. Участники рассмотрели 28 прогнозов и разделили их на 6 классов по типу методики (табл. 8.4.1, 8.4.2).

В целом, выводы о том, что 23-й цикл будет если не самым высоким, то, во всяком случае, выше среднего были широко распространены и легли в основу ряда международных проектов. К сожалению, эти прогнозы не оправдались (рис. 8.4.1). Правда, время максимума для чисел Вольфа (апрель 2000 г.) оказалось близким к пред-

Таблица 8.4.1 Прогноз максимальных сглаженных (по 13 месяцам) месячных чисел Вольфа для 23-го цикла

Метод	Нижний предел	Среднее значение	Верхний предел	
Соотношение четный/нечетный цикл	165	200	235	
Предвестники	140	160	180	
Спектральный анализ	135	155	185	
Климатология (среднее по 18–22 циклам)	125	155	185	
Полная климатология (средний по всей истории наблюдений)	75	115	155	
Нейронные Сети	110	140	170	
Согласованный прогноз чисел Вольфа	130	160	190	
Реальная высота максимума		120,8		

Таблица 8.4.2 Прогноз максимальных сглаженных (по 13 месяцам) месячных значений потока ${\bf F}_{10,7}$ для ${\bf 23}$ -го цикла

Согласованный прогноз F _{10,7}	175	205	235
Реальная высота максимума потока $F_{10,7}$		202,3/235,1	

сказанному, но само число Вольфа в максимуме (120,8) оказалось ниже нижнего предела. Несколько лучше ситуация с прогнозом потока $F_{10,7}$ (184,2 в апреле и 202,3 в июле 2000 г.), но зато в декабре 2001 г. наблюдался вторичный максимум $F_{10,7}$ (235,1), чего не наблюдалось никогда в предыдущих циклах (Капе, 2001). Особенно большое разочарование среди прогнозистов вызвали неудачи прогноза по правилам

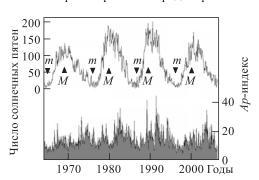


Рис. 8.4.1. Поведение среднемесячных чисел солнечных пятен и A_p -индексов геомагнитной активности в 20-23 солнечных циклах. Треугольниками с буквами m и M отмечены, соответственно, минимумы и максимумы сглаженных чисел пятен

Гневышева—Оля и Оля, которые считались одними из самых надежных. Этот сбой мог быть вызван попаданием пары 22–23-го циклов на минимум 100-летнего цикла (Bonev, 1997).

Хотя прогноз цикла до его начала — вещь неблагодарная и не совсем достоверная, тем не менее, ряд соображений о предстоящем 24-м цикле можно высказать уже сейчас. Достаточно надежными представляются оценки фазы минимума — начала цикла (конец 2007 или даже первый квартал 2008 г.) и фазы максимума (вторая половина 2011 г. или первый квартал 2012 г.). Что касается высоты цикла, то так же как перед 23-м циклом большинство исследователей сходилось на том, что он будет высоким,

сейчас пока многие прогнозы дают среднюю или даже низкую высоту 24-го цикла (80–140). Возможно, здесь влияют утвердившиеся сейчас представления о вековой модуляции солнечной активности (Schatten, 2002; Duhau, 2003; Wang et al., 2002; Meyer, 2003; Чистяков, 1983; Khramova et al., 2002). Оценки, использующие метод предвестников, также дают невысокие значения предстоящего цикла порядка 100–120 (Макаров и Тлатов, 2004; Schatten, 2003; Svalgaard, et al., 2005; Badalyan et al., 2001). Есть некоторые основания ожидать постепенного падения уровня солнечной активности вплоть до середины 40-х гг. ХХІ в. (Капе, 2002).

Приблизительно такая же ситуация наблюдалась в начале XIX и XX столетий. Здесь мы переходим, с учетом сильной вариабельности солнечной активности на протяжении трех сотен лет наблюдений, к интересному вопросу о вероятности в ближайшем будущем кардинального снижения активности или аномально высоких циклов, и их влиянию на различные аспекты человеческой жизнедеятельности, описываемые в этой главе. Например, если наблюдаемое потепление климата является совместным действием не только техногенных, но и гелиофизических факторов, то, ориентируясь на приведенные выше соображения, можно ожидать некоторой стабилизации этого процесса.

Прогноз крупномасштабного магнитного поля (среднесрочный прогноз). Многие проявления солнечной активности определяются структурой крупномасштабного магнитного поля Солнца. Так некоторые характеристики солнечного ветра связаны с границами секторной структуры межпланетного магнитного поля, которые представляют собой пересечение гелиосферного токового слоя с плоскостью эклиптики. Именно к гелиосферному токовому слою концентрируются места возникновения корональных выбросов массы (Ivanov et al., 1999). В изгибах токового слоя располагаются корональные дыры — источники высокоскоростных потоков и коротирующих областей взаимодействия (КОВ, см. 8.2.3). Эта структура может быть довольно устойчива на протяжении ряда оборотов Солнца, и на этой основе с помощью расчетов синоптических карт (рис. 8.4.2) прогнозируют в среднесрочной перспективе (1-2 месяца) те проявления солнечной активности, которые имеют рекуррентный характер. В некоторой степени этот же метод можно применить к прогнозу нестационарных явлений: новообразованная группа пятен с высокой вспышечной активностью, уйдя за западный лимб Солнца, скорее всего даст о себе знать и через 2-3 недели.

Прогноз эруптивных солнечных событий. Одним из наиболее востребованных видов прогноза является краткосрочный прогноз развития солнечных нестационарных явлений (солнечных вспышек, выбросов массы и пр.). Поскольку вспышки обычно происходят группами, то обычно предсказывают не отдельные события, а период вероятного вспышечного энерговыделения в ближайшие 1–3 дня. Такой прогноз становится возможным, когда на видимом солнечном диске появляется из-за восточного лимба или вновь образуется потенциально активная группа пятен. Предполагается, что когда сложность локальных магнитных полей достигает какого-то критического предела, накапливается достаточное количество магнитной энергии и она высвобождается в результате какой-нибудь неустойчивости. Эта, в общем, довольно правдоподобная картина стимулирует анализ критериев сложности магнитного поля, оставляя в стороне непосредственные причины возникновения вспышки.

Анализ возможной вспышечной активности начинается с подсчета площади и числа пятен в группе. Как правило, площадь потенциально вспышечной группы составляет несколько сотен м.д.п. (миллионных долей поверхности), в ней более десяти отдельных пятен, и она имеет хорошо выраженного лидера (Касинский и др., 1977). Далее анализируется структура магнитного поля. В относительно простых группах

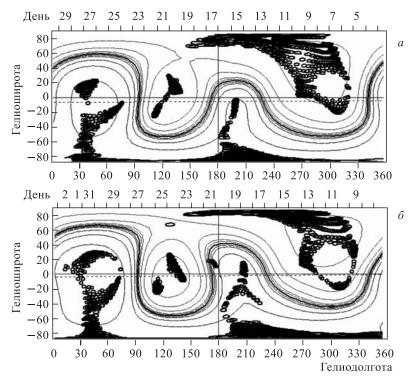


Рис. 8.4.2. Структура гелиосферного токового слоя, рассчитанная для двух последовательных оборотов с центром 17 января 2005 г. (а) и 20 декабря 2004 г. (б). Показаны структура радиального поля, гелиосферный экватор и основания открытых силовых линий, совпадающие с корональными дырами (черные точки). В целом структура сохраняется в течение двух оборотов

в нечетных циклах головное пятно имеет в северном полушарии N-полярность, в хвостовых — S-полярность. Это соотношение меняется на обратное при смене полушария и четности цикла и называется законом полярностей Хейла. Активная область с группой пятен обычно представляет собой вытянутый эллипс, магнитная ось которого (соединяющая головное пятно с хвостовым) слегка наклонена к экватору на угол $5-6^{\circ}$, так что головная (западная) часть группы ближе к экватору. Простые биполярные группы имеют класс β , группы, в которых пятна различной полярности образуют более сложные структуры имеют класс γ , наконец те из них, в которых внутри одной общей полутени имеются два и более ядра разной полярности, называются пятнами с δ -конфигурацией. Потенциально вспышечные группы имеют магнитный класс γ и δ -конфигурацию (Обридко, 1985). Чем больше магнитная ось отклоняется от направления восток-запад, тем выше вероятность вспышки. Группы, где магнитная ось направлена в меридиональном направлении, а нейтральная линия вытянута вдоль экватора, обычно имеют очень высокую вспышечную активность. Для характеристик сложности использовались также горизонтальные градиенты магнитного поля. В работах сотрудников КрАО (Северный, 1958, 1964; Гопасюк и др., 1963; Severny, Steshenko, 1972) показано, что при градиенте 1 Гс/км вероятность большой вспышки очень велика. Однако прямое использование этого критерия невозможно, поскольку измерение абсолютных величин поля зависит от специфики оборудования конкретной обсерватории. Поэтому используются другие косвенные

критерии появления больших градиентов: длина и число изгибов нейтральной линии, расстояние между центрами тяжести пятен разной полярности.

Необходимо учитывать и изменение структуры магнитного поля со временем и, в первую очередь, всплывание магнитного потока. Для возникновения большой вспышки необходимо всплытие достаточно большого потока ($>10^{13}$ Вб) с высокой скоростью $>10^{9}$ Вб/с (Ишков, 1998). К сожалению, в большинстве случаев, измерения магнитного поля, требуемые для такой оперативной оценки, отсутствуют. Однако, по существу, всплытие вспышечного магнитного потока можно определить и по многим косвенным признакам, в частности, по изменению упомянутых выше параметров сложности: быстрому росту площади и появлению новых пятен, усложнению магнитной структуры (Смит, 1976).

Непосредственный прогноз вспышек с заблаговременностью в несколько часов представляет значительную трудность и фактически не решен. Не менее сложен и не разработан до уровня практических применений и прогноз выбросов (исчезновений) солнечных волокон, а так же корональных выбросов массы, за исключением самого факта наблюдения КВМ после некоторых солнечных вспышек.

8.4.4. Прогноз геомагнитной активности

Основные солнечные источники геомагнитной активности. Существует два основных класса солнечных явлений, способных вызвать магнитную бурю на Земле. Увеличению геомагнитной возмущенности обычно предшествует или прохождение через центр солнечного диска корональной дыры или эруптивные явления (вспышки, исчезновения волокон, КВМ) в центральной зоне солнечного диска. Двум классам солнечных источников соответствуют два типа возмущений межпланетной среды: высокоскоростные потоки солнечного ветра и КОВ из низкоширотных корональных дыр и крупномасштабные выбросы солнечного вещества (КВМ), которые проявляются, как расширяющиеся возмущения солнечного ветра. С некоторыми оговорками эти два класса источников и возмущений можно называть соответственно рекуррентными (т. е. сохраняющими свою структуру в течение периода солнечного вращения) и спорадическими (нерегулярными). В прогнозе обычно предсказываются величины индексов K_p или A_p . Высокоскоростные потоки солнечного ветра и КОВ способны создать магнитную бурю с возрастанием K_p -индекса до 7, но самые большие бури с K_p -индексом 8-9 обязательно связаны со спорадическими явлениями. На рис. 8.4.3 приведены примеры межпланетных и геомагнитных возмущений от солнечных источников того и другого типа, которые здесь достаточно четко разделены по времени. С 13 до 23 октября 2003 г. ситуацию определяла большая низкоширотная корональная дыра. В этот период скорость солнечного ветра почти не опускалась ниже 500 км/с, и была зарегистрирована продолжительная магнитная буря. С 24 октября к Земле стали приходить возмущения солнечного ветра, связанные с мощными вспышками и выбросами солнечного вещества. С первым из этих выбросов, показанном на рисунке, связана большая магнитная буря 24 октября.

Долгосрочный и среднесрочный геомагнитный прогноз. При прогнозировании геомагнитной активности на месяцы и годы вперед предметом расчета являются скорее среднемесячные и годовые уровни активности, а не точные сроки геомагнитных возмущений. Методика основана, прежде всего, на статистическом анализе всех накопленных данных о геомагнитных индексах и их связи с солнечными характеристиками. Геомагнитная активность, как правило, высока в фазе максимума и большую часть времени в фазе спада солнечной активности. Фаза минимума в поведении индексов геомагнитной активности значительно короче, но такой минимум хорошо выражен и наблюдается в каждом цикле. В целом, в геомагнитных данных

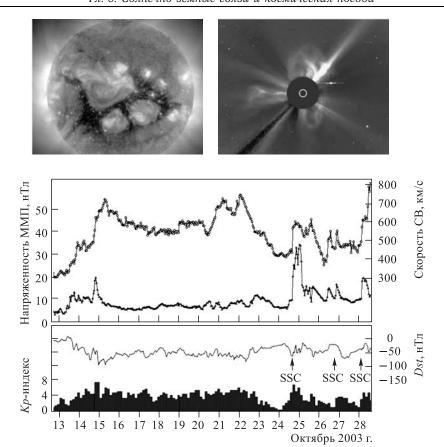


Рис. 8.4.3. Межпланетные и геомагнитные возмущения 12–28 октября 2003 г. В верхней части рисунка: слева — снимок Солнца (КА SOHO) в ультрафиолетовом (28,4 нм) диапазоне 15 октября, наиболее темная часть солнечного диска соответствует корональной дыре; справа — корональный выброс массы, зарегистрированный коронографом SOHO/LASCO 22 октября. На двух нижних панелях: изменения скорости солнечного ветра, напряженности межпланетного магнитного поля, K_p и $D_{\rm st}$ -индексов геомагнитной активности, моменты внезапного начала (SSC) геомагнитных бурь

11-летняя цикличность, характерная для солнечных явлений, выражена намного хуже (Feynman 1982; Vennerstrom, Friis-Christensen, 1996).

Следует учитывать и сезонную зависимость (полугодовую волну с максимумами вблизи дней весеннего и осеннего равноденствий и с минимумами около дней солнцестояния), которая наблюдается в большинстве проявлений геомагнитной активности (Russell, McPherron, 1973; Cliver et al., 2002; Belov et al., 2005). Хотя в среднем сезонный ход хорошо выражен, в отдельные годы он может быть существенно искажен или отсутствовать. Пример долгосрочного прогноза, представленный на рис. 8.4.4 (Belov et al., 2005), составлен по усредненному поведению A_p -индекса за 17-23 циклы в сочетании со средним сезонным ходом.

Основу для среднесрочного прогноза геомагнитной активности на несколько месяцев вперед создает относительно медленная изменчивость определенных крупномасштабных солнечных магнитных характеристик. Это приводит, с учетом солнечного вращения, к 27-дневной повторяемости (рекуррентности) в геоэффективных

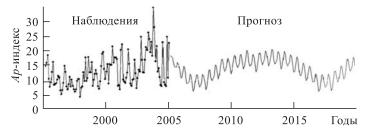


Рис. 8.4.4. Среднемесячные A_p -индексы в последние 10 лет и их долгосрочный прогноз

солнечных и межпланетных параметрах. Высокоскоростной поток солнечного ветра и соответствующая ему КОВ из долгоживущей корональной дыры может существовать на протяжении многих оборотов Солнца, каждый раз при попадании в него Земли создавая магнитную бурю (рис. 8.4.5). В первой половине 1994 г. хорошо видна высокая рекуррентность в скорости солнечного ветра и ее отражение в изменениях A_p -индекса, хотя две самые большие магнитные бури (пики A_p в феврале и апреле) были обусловлены спорадическими явлениями. Рекуррентность в изменениях геомагнитной активности вы-

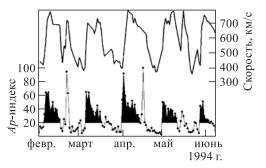


Рис. 8.4.5. Среднесуточные значения скорости солнечного ветра и A_p -индекса в феврале–июне 1994 г. Выделены возрастания геомагнитной активности, связанные с одной большой долгоживущей корональной дырой

ше при сравнительно спокойном Солнце, а вблизи максимума солнечной активности преобладает влияние спорадических явлений. Предсказать конкретные дни магнитных бурь, скажем, за месяц вперед, возможно только при высокой степени рекуррентности, однако и без нее вполне реально делать обоснованные оценки уровня геомагнитной активности, количества спокойных и возмущенных дней и т. п.

Возможен и качественный среднесрочный прогноз геомагнитной активности от спорадических источников. Большая группа солнечных пятен с высокой вспышечной активностью, скорее всего, будет активной и в следующие дни, а также с достаточно большой вероятностью сохранится в течение солнечного оборота, вернувшись на видимую сторону Солнца через 2–3 недели.

Краткосрочный геомагнитный прогноз. Это наиболее распространенный вид прогнозов. Он создается, когда на Солнце уже произошли события, определяющие состояние солнечного ветра (солнечная рентгеновская вспышка, выброс корональной массы, исчезновение волокна или появление корональной дыры в центральной части солнечного диска), и сформировались межпланетные возмущения, способные изменить геомагнитную активность. Скорость солнечного ветра меняется от 300–400 км/с для сравнительно спокойных периодов, до 700–800 км/с в потоках из больших корональных дыр, а в самых быстрых выбросах вещества может превышать 1,5–2 тыс. км/с. Время распространения возмущений от Солнца к Земле составляет соответственно от 15 ч до 6 сут., что и создает естественный временной интервал краткосрочного прогноза. Его относительно высокая достоверность объясняется тем, что он прежде всего опирается на реальные недавние наблюдения потенциально геоэффективных событий, а не на общие соображения. Информация, поступившая в последние минуты, может заставить существенно пересмотреть прогноз. Даже для

краткосрочного прогноза важно помнить, в какой фазе цикла солнечной активности и солнечного магнитного цикла мы находимся. Часто используются аналогии, для

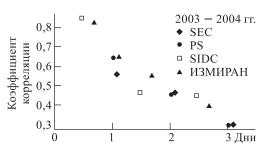


Рис. 8.4.6. Коэффициент корреляции между реальными среднесуточными A_p -индексами и их прогнозами в зависимости от срока прогнозирования. Объединены прогнозы: SEC — Центр Космических Прогнозов (SEC/NOAA, США); IPS — Австралийское Бюро Прогнозов, SIDC — Европейский центр космической погоды (Бельгия); ИЗМИРАН — Центр прогнозов геофизической обстановки (ИЗМИРАН, Россия)

чего необходимо иметь банк данных, описывающих события разного типа. Помогает и инерционность геомагнитной активности: магнитная буря часто продолжается несколько дней подряд, а за спокойным днем чаще всего следует еще один спокойный день. Тем не менее, именно на этот тип прогнозов приходятся наиболее драматичные ошибки прогнозистов. Из-за необходимости применения экспертных оценок, а не формализованных алгоритмов, краткосрочный прогноз пока хуже всего поддается автоматизации.

На рис. 8.4.6 прогнозы среднесуточного A_p -индекса на текущий день и на 1-3 дня вперед от различных прогностических центров (Belov et al., 2005) сравнены с реальным индексом. Если качество прогнозов на текущий и следующий день можно признать удовлетво-

рительным, то для прогнозов на 2-3 дня вперед коэффициент корреляции между прогнозируемыми и наблюдаемыми индексами резко падает.

Это вызвано, прежде всего, с тем, что физические процессы, связывающие различные солнечные эруптивные события (вспышки, выбросы массы) с формированием структур в солнечном ветре и ММП, непосредственно отвечающих за магнитные бури на Земле, в настоящее время не могут быть просчитаны с достаточной точностью, так как методы наблюдений возмущений солнечного ветра на их пути между Солнцем и Землей недостаточно информативны (за исключением сверхкраткосрочного прогноза, см. 8.4.5). Анализ статистических связей демонстрирует вероятностный характер зависимости между наблюдениями солнечных эрупций и приходящих к Земле структур солнечного ветра (Joselyn, 1995, Yermolaev et al., 2005; Yermolaev, Yermolaev, 2006).

С практической точки зрения, самый доступный для мониторинга признак солнечной активности — солнечные рентгеновские вспышки остаются одним из основных прогностических признаков возмущений межпланетной среды и магнитных бурь, несмотря на то, что сами по себе они их не создают. При прочих равных условиях эффект от центральных вспышек и выбросов значительно сильнее, чем от прилимбовых, что позволяет выделять центральные долготы (40°E-40°W) и мощные вспышки на них, как геоэффективные. Похожим образом вводится и геоэффективность внезапных исчезновений солнечных волокон. Исчезновение достаточно большого волокна в центральной зоне Солнца, как правило, оказывается геоэффективным, а исчезновения близких к лимбу волокон практически никогда не являются эффективными. Наиболее ясные указания на корональный выброс массы, возмущающий солнечный ветер и являющийся непосредственной причиной бури в магнитосфере Земли, дают снимки космических коронографов (на протяжении последних лет коронограф LASCO на спутнике SOHO). Если эрупция произошла на видимой части солнечного диска, то КВМ типа «полное гало», т.е. выброс, расширяющийся на снимке во все стороны, означает возмущение солнечного ветра и ММП (называемое магнитным облаком), идущее к Земле. Узкие выбросы, наблюдаемые на лимбах, и гало, созданные на противоположной от нас стороне Солнца, не геоэффективны. Однако, на практике даже после очень мощных вспышек и выбросов вероятность попадания Земли в возмущение солнечного ветра нестопроцентна. И напротив, очень сильная буря может произойти и после достаточно слабой вспышки, или вспышки на лимбе, если КВМ был достаточно мощным и «удачно» направленным.

Наиболее простой ситуацией, возможной в краткосрочном прогнозировании, является мощный выброс солнечного вещества у центра солнечного диска. Вероятность внезапного начала геомагнитной бури в 2–4 дня, следующие за рентгеновской вспышкой в центральной части солнечного диска, хорошо коррелирует с мощностью вспышки (Белов, 2002; рис. 8.4.7). В нашем идеальном примере, при очень сильной

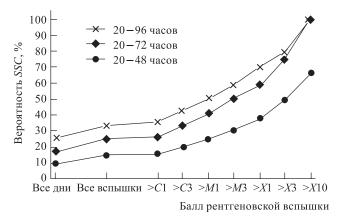


Рис. 8.4.7. Связь вероятности внезапного начала магнитной бури (SSC) в интервалах 20-48, 20-72, 20-96 ч после вспышек с различными максимальными потоками рентгеновского излучения (выбраны вспышки в гелиодолготном интервале $30^{\circ}E-30^{\circ}W$, наблюдавшиеся спутниками серии GOES)

эрупции в центре диска имеется полный набор солнечных спорадических событий: вспышка во всех диапазонах электромагнитного спектра, радиовсплески всех типов, ускорение протонов и электронов, гало-КВМ. В этом случае ответ на вопрос, ожидается ли геомагнитное возмущение, тривиален — выброс не минует Землю.

В любом случае следующие трудности прогноза сводятся к необходимости ответа на два других вопроса: когда начнется геомагнитное возмущение и насколько сильным оно будет. Предварительно оценить время прихода межпланетного возмущения к Земле можно либо по скорости распространения радиовсплеска типа II (Smith, Dryer, 1995), либо по скорости расширения КВМ (Lindsay, 1999; Gopalswamy et al., 2001, 2005; Xie et al., 2006). Оба метода обычно позволяют различать медленные и быстрые выбросы, но сообщаемая скорость не всегда совпадает со скоростью распространения ударной волны, идущей именно к Земле. В межпланетной среде выброс чаще всего замедляется (Cane et al., 2000), но иногда может и ускориться.

Прогноз рекуррентных, или точнее, связанных с корональными дырами, магнитных бурь, идеологически проще. Земля обычно попадает в такой поток через 3–4 дня после того, как низкоширотная граница дыры подходит к центральному меридиану, а это событие может быть спрогнозировано после появления дыры на видимом диске Солнца в ходе его вращения.

Сила бури существенно зависит от B_z -составляющей межпланетного магнитного поля в возмущении солнечного ветра, особенно в его ведущей, наиболее сжатой

части. Если большое межпланетное возмущение с преобладающей отрицательной, направленной к югу B_z -составляющей (скажем, 20–50 нТл) может создать очень большую или исключительно большую магнитную бурю ($K_p=8$ –9), то при положительном (северном) B_z такое же возмущение солнечного ветра приведет к скачку K_p -индекса всего лишь до 5. Известны случаи, когда по этой причине большие КВМ и межпланетные возмущения вообще не создавали магнитную бурю.

8.4.5. Геомагнитный прогноз по солнечному ветру

Характеристики магнитной бури и, в частности, геомагнитного возмущения определяются свойствами солнечного ветра и ММП, взаимодействующих с магнитосферой Земли. Измерив их с помощью спутника, находящегося «перед» Землей, и передав информацию по радиоканалу, можно спрогнозировать состояние магнитосферы Земли на ближайшие часы. Такой прогноз часто называют «сверхкраткосрочным» и он стал возможен только с развитием телекоммуникационных технологий, позволяющих осуществлять передачу и широкий доступ к данным в режиме реального времени. Его преимуществом является реальная возможность расчета ряда количественных характеристик магнитной бури с использованием численных моделей магнитосферы.

Ясно, что для увеличения заблаговременности спутник должен находиться как можно дальше от Земли, и быть вблизи линии Земля—Солнце, чтобы достоверность прогноза была велика. Наиболее удобное расположение спутника — в так называемой передней точке либрации системы Солнце—Земля. Здесь, на расстоянии около 1,5 млн км от Земли, силы притяжения Земли и Солнца уравниваются (с учетом центробежной силы) и спутник может постоянно держаться в ее окрестности без больших затрат топлива. С 1997 г. в этом месте на гало-орбите с радиусом около 200 000 км находится американский КА АСЕ, постоянно передающий измерения на Землю в режиме реального времени. Опережение прогноза формируется за счет разницы скоростей радиосигнала и скорости солнечного ветра, составляя около часа для обычного солнечного ветра (со скоростью 400 км/с) и около 20–30 мин для высокоскоростных струй (см. http://sec.noaa.gov, http://iki.cosmos.ru/forecast).

Проверено, что на таких масштабах естественная изменчивость и неоднородность солнечного ветра и ММП не сказываются на достоверности прогноза магнитных бурь, так как измерения в этой, все-таки достаточно удаленной от Земли точке мало отличаются от их характеристик непосредственно перед Землей (Петрукович, Климов, 2000). В целом, расстояние между спутниками поперек линии Земля—Солнце, на котором корреляция измерений существенно падает, и соответственно, ухудшается качество прогноза, составляет порядка 400 000–1 000 000 км (Стоокег et al., 1982; Zastenker et al., 2002).

Необходимо также учесть, что развитие магнитной бури носит постепенный кумулятивный характер и может занять несколько часов после первого касания магнитосферы межпланетным возмущением. Это дает возможность увеличить заблаговременность прогноза, вырабатывая предварительное предупреждение о действительном приходе возмущения (предположительно предсказанного ранее по солнечным наблюдениям) по его первым признакам или предвестникам. Количественный же прогноз может уточняться позднее по мере поступления новых данных.

Заключительная, наиболее существенная часть прогноза состоит в оценке требуемых характеристик магнитосферы по измеренным параметрам солнечного ветра и ММП. Обычно вычисляются оценки индексов геомагнитной активности, используемые затем в свою очередь как входные параметры во многих моделях различных магнитосферных и ионосферных систем. Часть современных эмпирических и численных моделей уже непосредственно параметризована на характеристики солнечного ветра.

Рассмотрим пример прогноза геомагнитного индекса a_p . Функциональная связь между параметрами межпланетной среды и индексом обычно определяется при помощи статистического анализа совокупности данных, накопленных за все время наблюдений, и может представлять собой просто линейную комбинацию входных параметров, или быть представлена более абстрактной математической моделью (например, искусственной нейронной сетью; Русанов, Петрукович, 2004).

Популярным методом является и составление из нескольких индивидуальных характеристик так называемой функции связи — единого параметра, имеющего физический смысл и наиболее хорошо коррелирующего с геомагнитным индексом. Простейшей и наиболее известной функцией связи является электрическое поле солнечного ветра $E=VB_z$ (другие примеры можно найти в обзоре Gonzalez et al., 1994). Подбор вида функции связи позволяет получить корреляцию выхода такой модели с реальным геомагнитным индексом, сравнимую с результатами, основанными на сложных функциональных формах со многими свободными параметрами, например, нейронными сетями (Petrukovich, Rusanov, 2005). Для индекса a_p оптимальной функцией является $E=10^{-3}(N/N_0)^{0.2}(V\sqrt{B_y^2/2+B_z^2}\sin(\vartheta/2)^2+0.007V^2)$ мВ/м, где $N_0=7.18$ см $^{-3}$, N (в см $^{-3}$), V (в км/с) — концентрация и скорость солнечного ветра, $\vartheta=\operatorname{tg}(B_y/B_z)$, компоненты магнитного поля (в гео-солнечно-магнитосферной системе координат) B_y , B_z в нТл (Petrukovich, Zakharov, 2007). a_p аппроксимируется

полиномом от величины E (рис. 8.4.8). Коэффициент корреляции модельного и реального индекса составляет 0,8 (модель, основанная на $E = VB_z$, дает корреляцию только 0,6). Любая подобная эмпирическая модель, в целом обеспечивая приемлемое статистическое совпадение с реальностью, выявляет наличие в природном сигнале и существенной стохастической составляющей, связанной с неоднозначностью отклика сложной магнитосферной системы и неидеальностью индекса, как характеристики геомагнитной активности. Эта составляющая не может быть описана как зависимость от каких-либо параметров, по крайней мере, на уровне современного знания устройства магнитосферы.

Оперативный количественный геомагнитный прогноз стал возможен благодаря прямым наблюдениям межпланетной сре-

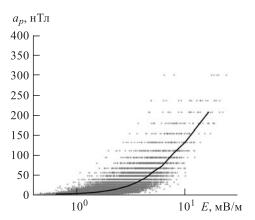


Рис. 8.4.8. Зависимость a_p -индекса от функции связи солнечного ветра. Показаны индивидуальные значения за 1963-2003 гг. и средняя кривая

ды. Прогноз СКЛ и рентгеновского излучения по измерениям на таком спутникемониторе практического смысла не имеет, так как из-за высокой скорости их распространения заблаговременность прогноза будет практически нулевой. Сдвиг же расположения спутника за точку либрации, дальше от Земли, потребует нереально большого расхода топлива для удержания спутника на приемлемой межпланетной траектории и может привести к существенному снижению достоверности прогноза.

8.4.6. Прогноз СКЛ

На сегодняшний день прогнозирование потоков СКЛ является чрезвычайно актуальной для многих приложений, но все еще далекой от решения задачей (Ishkov, 2001). После солнечной вспышки СКЛ достигают Земли через несколько часов, однако ве-

роятность прихода, время, величина потока и их энергетический состав слабо коррелируют с видимыми характеристиками источника. Часто приходится довольствоваться соображениями о глобальной конфигурации ММП: если Земля соединена силовой линией ММП с источником, то вероятно СКЛ дойдут до Земли быстрее и их поток будет более интенсивным. С учетом спиральной конфигурации ММП вспышки с западными солнечными долготами в этом смысле более опасны, чем с восточными.

Сейчас для практических целей используется несколько методик оперативного прогноза СКЛ. Прогноз пиковой интенсивности СКЛ строится на десятки минут вперед на основе данных о начале возрастания и крутизне переднего фронта высокоэнергичных СКЛ (Митрикас и Цетлин, 2000). Мониторинговые измерения потоков СКЛ проводятся на борту орбитальных станций и ряда спутников и эти наблюдения могут использоваться для быстрого предупреждения о возросшей радиационной опасности.

Проблема заблаговременного прогноза и планирования частично решается с помощью вероятностной модели СКЛ (Nymmik, 1999a, b), позволяющей вычислить вероятность получения той или иной радиационной дозы на конкретной орбите при данном уровне солнечной активности. Такая модель полезна при планировании работ в открытом космосе, а также для общей оценки радиационной опасности на борту орбитальных станций и в межпланетных миссиях.

8.4.7. Перспективные методики прогноза

Несмотря на появление в последние десять лет большого количества новых видов наблюдений Солнца и околоземного пространства, все-таки решающего скачка в качестве прогноза на всех его уровнях не произошло. Это связано в первую очередь с «провалами» в наличии надежных данных и моделей ряда ключевых звеньев цепи солнечно-земных связей, например, процесса распространения возмущения в межпланетном пространстве. Представляется, что значительному улучшению краткосрочных (на несколько дней) прогнозов будут способствовать следующие факторы.

Развитие наблюдений и расчетов солнечных магнитных полей дает надежду, что в ближайшем будущем будет возможно предсказывать B_z -составляющую ММП по реальным оперативным магнитограммам структуры солнечных полей как для рекуррентных, так и для спорадических солнечных событий. Уже достаточно давно известны методы (Hoeksema, Scherrer, 1986), позволяющие на основе измерений магнитного поля на фотосфере рассчитывать поле на поверхности источника солнечного ветра. Основываясь на этих расчетах, Wang, Sheeley (1990, 1992) предложили способ определения полярности межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра у Земли и доказали его эффективность. Поскольку в этой методике используются синоптические карты солнечного магнитного поля, она применима только к относительно медленным изменениям солнечной и межпланетной обстановки. Недавно Robbins et al. (2004) и Обридко и др. (2004) предложили усовершенствования этой методики, улучшающие качество прогноза скорости солнечного ветра. По наблюдениям магнитного поля Солнца можно предсказывать не только полярность межпланетного магнитного поля, но и его напряженность, а также B_z -компонент (Белов и др., 2006; Fry et. al., 2003). Похожие подходы есть и к решению проблемы прогноза конфигурации ММП после корональных выбросов массы.

Стереонаблюдения корональных выбросов массы, идущих к Земле. Космические аппараты STEREO, запущенные в 2006 г., будут выведены в точки, находящиеся до 120° впереди и позади Земли вдоль ее орбиты, что позволит впервые непосредственно наблюдать с помощью коронографов распространение возмущений от Солнца к Земле.

Наблюдения космических лучей солнечного и межпланетного происхождения на космических аппаратах. Когда к Земле приближается большое межпланетное воз-

мущение, способное создать магнитную бурю, увеличивается поток малоэнергичных (как правило, с энергией до 10 МэВ) протонов (например, Cane et al., 1988).

Наземные наблюдения вариаций галактических космических лучей. Сейчас в режиме реального времени доступны измерения около 25 наземных станций космических лучей. Высокоэнергичные (с характерной энергией 10 ГэВ) космические лучи взаимодействуют с вариациями ММП в распространяющихся возмущениях солнечного ветра. Из-за этого их угловое распределение у Земли может характерным образом изменяться задолго до подхода такого возмущения (Nagashima et al., 1994; Belov et. al., 1995; Munakata et. al., 2000).

Тщательная обработка изображений Солнца, получаемых проектом SOHO в видимом диапазоне длин волн, позволила диагностировать различные моды звуковых (сейсмических) колебаний Солнца и судить по ним о наличии активных областей (неоднородностей) на невидимой стороне Солнца (Lindsee, Braun, 1990). При увеличении чувствительности этот гелиосейсмологический метод может существенно улучшить среднесрочный прогноз.

8.4.8. Достоверность прогноза

Очень важной задачей является оценка оправдываемости прогноза. Наиболее оптимальным является использование так называемых матриц сопряженности. Наиболее просто она выглядит, когда рассматривается прогноз одного типа событий, например, вспышки. Тогда возможны 4 ситуации: «да+да» (событие прогнозировалось и оно произошло), «нет+да» (пропуск события), «да+нет» (событие прогнозировалось, но не произошло, завышенный прогноз), «нет+нет» (событие не прогнозировалось и оно действительно не произошло). Очевидно, что отношение суммарного числа событий типов «да+да» и «нет+нет» к полному числу событий характеризует точность прогноза. (см например http://www.sec.noaa.gov/forecast_verification/)

Приведем эту матрицу для прогнозов Медонского центра (Симон и МакИнтош, 1976). В первом столбце указано число и тип выданных прогнозов, далее в строке процент реальных наблюдений каждого типа после данного прогноза, сумма процентов в каждой строке равна 100 (табл. 8.4.3).

. Таблица 8.4.3 Матрица сопряженности для прогнозов Медонского центра

Прогноз	Спокойный	Эруптивный	Активный	Протонный
Спокойный, 2463	89,9	9,2	0,85	0,08
Эруптивный, 343	47,1	50,0	2,9	0,00
Активный, 84	24	55	18	3
Протонный, 28	15	40	15	30
Средняя действительная вероятность	83,3	15,6	2,0	0,6

Числа под главной диагональю обычно выше, чем в симметричных ячейках над главной диагональю. Это отражает естественное желание прогнозиста застраховаться от ошибки. Психологически, прогнозист считает, что пропуск события больший грех, чем завышенный прогноз. Это подводит нас к важному, но до сих пор редко используемому в реальной прогностической практике понятию о дозе оправданного риска. При прогнозировании спокойной ситуации особого мастерства, как правило, не требуется, оно проявляется именно при прогнозировании редких событий: 50-процентный прогноз события, естественная вероятность которого 0.6% — это огромное достижение.

Цена ошибки может быть совершенно разной, в зависимости от цели, для которой этот прогноз используется. Возьмем, например, эксперимент по искусственному воздействию на магнитосферу, проводившийся в рамках советско-французского сотрудничества в начале 70-х гг. прошлого века. Ожидаемый эффект был очень слаб и требовалось провести эксперимент в абсолютно спокойных условиях. В этих условиях требования к мастерству прогнозирования спокойной обстановки резко возрастают. Аналогичная ситуация имеет место, например, и при планировании выхода космонавта в открытый космос.

8.4.9. Выводы

В целом ситуацию с прогнозом нельзя назвать удовлетворительной. Прогноз высоты цикла до его начала регулярно дает сбои и есть точка зрения, что он вообще невозможен при нашем нынешнем уровне знания. Существенное улучшение качества прогноза в ближайшее время здесь кажется маловероятным, но ожидание некоторого спада солнечной активности в начале XXI в. выглядит вполне обосновано. Прогноз части цикла на несколько месяцев вперед по сглаженным числам Вольфа дается с довольно высокой степенью оправдываемости. Однако, при этом возможны значительные флуктуации вспышечной активности. Что же касается прогноза вспышек на 1-3 дня вперед и прогноза магнитных бурь после солнечного эруптивного события (рентгеновской вспышки, КВМ) то, несмотря на гигантское увеличение объема информации, имеющейся в руках прогнозиста, как основные принципы прогноза, так и оправдываемость все еще нуждаются в существенном улучшении. Здесь уже давно ожидается резкое увеличение качества прогноза на пути соединения современных наблюдений солнечных магнитных полей с достижениями численного моделирования. В последние десять лет существенный шаг вперед был сделан с появлением надежного сверхкраткосрочного геомагнитного прогноза по спутниковым измерениям солнечного ветра перед Землей.

8.5. Заключение

А.А. Петрукович

Наука о системе солнечно-земных связей — междисциплинарная область на границе космической физики и геофизики, фундаментальных и прикладных работ. Решение практических проблем влияния космической среды связано с исследованиями по радиофизике, физике твердого тела, биологии и медицине. В современном мире необходимость рассмотрения эффектов космической погоды является особенно насущной, так как жизнь человека и общества критически зависит от технических средств, а учет долговременных изменений среды обитания становится необходимым элементом планирования. С течением времени актуальность этой проблематики будет возрастать, в связи с экспансией экономической активности на приполярные территории, бурным развитием спутниковых технологий, телекоммуникационных систем и пр.

В то время как для решения ряда задач (прогноз, распространение радиоволн) в первую очередь требуется развитие количественных подходов, для отдельных проблем (воздействие на климат, гелиобиология) механизмы влияния не всегда ясны даже качественно, а экспериментальные данные часто противоречивы. Эти области являются в настоящее время предметом интенсивных исследований.

Еще одной ключевой особенностью солнечно-земной физики является нацеленность этого направления на формирование представления о Земле как о глобальной космической экосистеме, зависящей в первую очередь от Солнца, но включающей и несолнечные факторы, такие как, например, ГКЛ. Важными аспектами исследований в этом

смысле являются долгосрочные прогнозы на десятки и сотни лет вперед и определение исторической роли различных факторов (например, динамики солнечной активности и геомагнитного поля) в создании условий для развития жизни на Земле.

8.6. Приложение. Ресурсы сети Интернет по солнечно-земной физике

А.А. Петрукович, А.Н. Зайцев

В настоящее время сеть Интернет без преувеличения стала одним из основных факторов, определяющих развитие исследований по солнечно-земной физике. Характерной чертой экспериментальных работ в этой области науки является их комплексность. приводящая к необходимости анализа измерений, сделанных в различных точках земной поверхности и космического пространства, и связанного с этим обмена данными. Например, для анализа динамики магнитосферы необходимо знать характеристики солнечного ветра, а для интерпретации геомагнитных вариаций — иметь возможность просмотра магнитограмм по всему земному шару. До 90-х гг. ХХ в. такой обмен осуществлялся через систему Мировых центров данных (МЦД), созданных в период МГГ (1957-1958 гг.), а также через печатные каталоги, которые издавались агентствами и отдельными проектами. Сейчас космические данные стали широко доступны любому исследователю, владеющему доступом в Интернет через сайты соответствующих МЦД или специальных баз данных. Стало правилом свободное распространение обзорных данных, часто называемых «графиками быстрого просмотра» (quick-looks) или ключевыми параметрами (key parameters) уже в ходе эксперимента. Позднее формируются архивы откалиброванных финальных данных. В связи с доступностью и быстрым развитием Интернет-технологий в значительной мере отпала необходимость собирать данные в отдельных специализированных центрах.

Другим важным аспектом «интернетизации» солнечно-земных исследований стала возможность распространять и получать данные в «реальном времени» практически сразу после их измерения, что позволяет всем желающим проводить, например, экспресс анализ всплесков солнечной активности и геомагнитных возмущений для оценки текущего состояния «космической погоды». В настоящее время в таком режиме доступны наблюдения достаточно большого числа наземных и космических проектов.

Помимо источников «первичных» данных существует и большое количество вспомогательных ресурсов, предоставляющих доступ к различным продуктам анализа: начиная с вычислений геомагнитных координат и каталогов различных геофизических событий (например, солнечных вспышек) до возможности обращения к численным моделям, при использовании которых требуется применение суперкомпьютеров. Важным подспорьем исследователям и преподавателям в области физики солнечно-земных связей являются электронные архивы различных журналов и конференций, описания проектов, материалы научно-популярного и учебного характера. В целом, количество источников информации по солнечно-земной физике в сети Интернет стало таким большим, что даже специалисты не всегда знают о всех возможностях сети.

Поэтому мы посчитали нужным привести аннотированный список некоторых ресурсов по $C3\Phi$, который может служить введением или путеводителем в море сведений и источников, имеющихся в сети Интернет.

В целом, совершенствование коммуникационных технологий и развитие сети Интернет в корне поменяло уровень доступности экспериментальных данных и способы общения между специалистами, что привело к качественно новому уровню

исследований по солнечно-земной физике. Однако, как и прежде, развитие науки в первую очередь определяется проведением целенаправленных экспериментов. Сеть Интернет остается ключевым инструментом, позволяющим наиболее полно использовать результаты наблюдений.

Научно-популярные и образовательные ресурсы.

www.kosmofizika.ru — русскоязычный образовательный и информационный сайт, созданный проф. Л.Л. Лазутиным, сотрудником НИИЯФ МГУ.

www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html — образовательный сайт НАСА по физике магнитосферы. На сайте имеется хорошо структурированная информация по всем аспектам СЗФ.

radiojove.gsfc.nasa.gov — образовательный проект JOVE — любительские наблюдения радиоизлучений Юпитера и Солнца.

image.gsfc.nasa.gov/poetry/inspire — образовательный проект INSPIRE организован подобно проекту JOVE, но в его основе лежат наблюдения за радиоизлучениями на очень низких частотах, источником которых служат грозы на Земле.

www.windows.ucar.edu/ — образовательный ресурс Чикагского университета для учителей американских школ «Окно во Вселенную» («Windows to Universe») охватывает все аспекты космофизики от Земли до Солнца и планет.

www.hao.ucar.edu/Public/education/education.html — хорошая подборка информации о солнечно-земной физике.

solar-center.stanford.edu — большой выбор информации по физике Солнца и солнечной системы для студентов и учителей. Особенно интересен раздел solar-center. stanford.edu/singing/singing.html, посвященный гелиосейсмологии.

www.oulu.fi/~spaceweb/textbook — учебник по космической физике университета Oулу, Φ инляндия.

www.spaceweathercenter.org — научно-популярный ресурс общественного Института космических исследований (Space Science institute) в Боулдере, США.

Необходимо отметить, что по правилам финансирующих организаций США и Европы, любой проект по космическим исследованиям в обязательном порядке должен содержать образовательную и научно-популярную части (public outreach and education), на создание которых должна быть потрачена определенная часть бюджета. Это привело к наличию большого количества англоязычной информации по солнечно-земной тематике в сети Интернет.

Основные организации. Приведем список адресов основных организаций, занимающихся исследованиями по солнечно-земной физике. Как правило, сайты этих организаций представляют собой Интернет-порталы, содержащие большое количество полезной информалии.

Российские организации.

iki.cosmos.ru — Институт космических исследований (ИКИ РАН), Москва. Ведущий институт России в области космических исследований, в том числе по СЗФ.

www.izmiran.ru — Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН), г. Троицк Московской области. Старейший институт России в области СЗФ, основан в 1940 г.

http://www.gao.spb.ru — Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулково, Санкт-Петербург. Основанная в 1839 г. в качестве центрального астрономического учреждения России, координировала также первые отечественные исследования в области СЗФ. Выпускает электронный бюллетень «Солнечные данные» http://www.gao.spb.ru/russian.win/sd.

http://www.solarstation.ru — Горная станция ГАО РАН, Кисловодск (основана в 1948 г.). Головное учреждение Службы Солнца СССР. Единственное учреждение России, продолжающее ежедневные комплексные наблюдения Солнца до настоящего времени.

www.sinp.msu.ru — Институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына при МГУ им. М.В. Ломоносова (НИИЯ Φ МГУ), Москва. Успешно ведет космические эксперименты с 1958 г.

www.iszf.irk.ru — Институт солнечно-земной физики (ИСЗФ СО РАН), Иркутск. Ведущий научный центр по солнечно-земной физике в сибирском регионе.

www.ikir.kamchatka.ru — Институт космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР ДВО РАН), Камчатка. Кроме научных лабораторий ИКИР поддерживает работу ряда комплексных экспедиций и обсерваторий.

pgia.ru — Полярный геофизический институт (ПГИ КНЦ РАН), Апатиты. Один из ведущих научных центров Кольского полуострова.

ikfia.ysn.ru — Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера (ИКФИА СО РАН), Якутск. Ведет исследования космических лучей, полярных сияний и физики ионосферы в высоких широтах, основан в 1962 г.

www.aari.nw.ru/clgmi/geophys/index_ru.htm — Отдел геофизики в Арктическом и Антарктическом НИИ (ГНЦ РФ ААНИИ) при Росгидромете РФ, Санкт-Петербург. Поддерживает наблюдения на ряде полярных станций.

spaceweather.ru — по этому адресу находится более подробный список Интернетадресов всех российских организаций, имеющих отношение к солнечно-земной физике.

Зарубежные организации.

www.sec.noaa.gov — самый известный центр космической погоды, Боулдер, США. Центр ведет оперативную работу, исследования и архив данных.

www.qi.alaska.edu/space — Геофизический институт Университета Аляски.

 ${\tt space.rice.edu/ISTP}-{\tt cправочный ресурс Университета Райса, США.}$

civspace.jhuapl.edu/programs/index.php — отделение гражданского космоса Лаборатории прикладной физики Университета Джона Гопкинса — одного из основных производителей научных космических аппаратов в США и сопутствующих исследований.

www.nasa.gov- сайт космического агентства США со ссылками на многие космические проекты.

www.jpl.nasa.gov — сайт Jet Propulsion Laboratory — одного из основных центров НАСА, специализирующегося на проектах исследования солнечной системы.

www.gsfc.nasa.gov — Центр Годдарда — ведущая организация HACA по космическим исследованиям. В закоулках этого портала можно найти массу полезных вещиц: Spdf.gsfc.nasa.gov — гид по ресурсам центра.

www.igpp.ucla.edu, www.ssl.berkeley.edu — Институт геофизики и планетной физики в Лос-Анжелесе и лаборатория космической науки в Беркли Университета Калифорнии — крупные университетские центры по космической физике.

solar-center.stanford.edu — Центр исследования Солнца Станфордского университета.

sci.esa.int — научный портал Европейского космического агентства.

www.fmi.fi — Финский метеорологический институт — лидер полярных исследований скандинавского региона.

www.cesr.fr — CESR — один из основных центров экспериментальной космической науки Франции.

www.iwf.oeaw.at — Институт космических исследований Австрийской академии наук.

www.stelab.nagoya-u.ac.jp — STELAB — основной центр солнечно-земных исслелований в Японии.

www.isas.jaxa.jp — Институт космической науки и аэронавтики японского космического агентства.

Прогнозные центры в Интернете.

www.geospace.ru — центр прогнозов ИПГ Гидрометеослужбы РФ — официальный источник прогнозов в России

forecast.izmiran.rssi.ru — центр прогнозов ИЗМИРАН.

iki.cosmos.ru/sw.htm — сверхкраткосрочный прогноз геомагнитной активности по данным о параметрах солнечного ветра на сайте ИКИ РАН.

www.sec.noaa.gov — самый известный центр космической погоды, Боулдер, США. sidc.oma.be — основной европейский прогнозный центр в Бельгии.

www.spaceweather.com — коммерческая компания, компактно и достаточно полно представляющая данные по космической погоде. Также даны ссылки на все ведущие зарубежные источники данных.

www.ises-spaceweather.org — Международная служба космической среды International Space Environment Service (ISES).

Сайты с данными экспериментов по СЗФ. Все подобные источники информации перечислить невозможно. Приведем основные адреса — централизованные архивы многих экспериментов. Развитие сети Интернет позволило приступить к созданию виртуальных обсерваторий, объединяющих различные источники данных без перекачки информации на один сервер. В будущем виртуальные обсерватории должны предоставить возможность обработки и унификации данных «на лету», но уже на начальном этапе содержат достаточно подробные подборки ссылок на архивы соответствующей тематики.

Необходимо отдельно упомянуть еще об одном аспекте — о правах на использование данных. Несмотря на то, что в Интернете данные доступны для анонимного пользователя, правила пользования ими могут быть различны и обычно объяснены на страницах архива. Существует два основных варианта таких правил.

- 1. Данные открытого доступа (public domain) могут быть свободно использованы при условии упоминания источника данных в разделе «благодарности» научной публикации и информировании автора эксперимента о выходе статьи. В любом случае приветствуется обращение к автору в случае затруднений с интерпретацией данных. Обычно к этой категории относятся результаты старых, давно законченных экспериментов и отдельных проектов, имеющих статус открытых обсерваторий (например, работающих многие годы наземных наблюдательных сетей и многих современных проектов НАСА).
- 2. Данные только для просмотра, как правило, содержат не полностью обработанные измерения или рисунки для быстрого просмотра, ознакомления и отбора событий. Для получения полных данных или публикации картинок необходимо обращение к авторам.

Начнем с достаточно полной подборки сайтов геомагнитных данных.

www.ava.fmi.fi/image/index.html — скандинавский геомагнитный меридиан IM-AGE, включающий более 30 магнитных обсерваторий. Стандартная регистрация компонент магнитного поля — каждые 10 с, разрешение — 0,1 нТл. Большинство станций дают данные в реальном времени.

stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210/ — геомагнитный меридиан 210° . Данные свободно доступны в 1-минутном формате, начало работы проекта 1990 г. По запросам доступны данные с разрешением 1 с.

magnet.gi.alaska.edu/-Геофизический институт на Аляске, поддерживает цепочку магнитометров.

www.carisma.ca — сеть геомагнитных станций в Канаде, работает более 30 лет.

cgsm.ca/data.html — портал всех канадских наземных наблюдений.

web.dmi.dk/projects/chain/ — гренландские магнитные обсерватории. Данные доступны по запросу.

space.augsburg.edu/space/MaccsHome.html — цепочка магнитометров MACCS (Magnetometer Array for Cusp and Cleft Studies) на широтах $75-78^\circ$.

www.dcs.lancs.ac.uk/iono/samnet/ — широтная цепочка магнитометров в Европе на субавроральных широтах SAMNET Sub-Auroral Magnetometer Network. Данные доступны по запросу.

www.intermagnet.org — сеть «Интермагнет» объединяет более 90 обсерваторий по всему миру, как правило, не входящих в большие проекты.

www.aari.nw.ru/clgmi/geophys/index.htm — геомагнитные данные российских арктических и антарктических станций на сайте ААНИИ.

www.wdcb.ru/stp/online_data.ru.html — большая коллекция российских магнитограмм на сайте российского отделения мирового центра данных.

www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp_index/ — международная служба K_p -индекса.

swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html — мировой центр данных в Киото, Япония. Центр сбора наземных геомагнитных данных и вычисления основных индексов D_{st} и AE. Сервис предоставляется в реальном времени.

www.aari.nw.ru/index_en.html — PC-index полярной шапки, разработанный в AA-НИИ.

Другие данные.

www.ssrt.org.ru/, www.sao.ru/hq/sun/ — изображения Солнца с радиотелескопа ССРТ, ИСЗФ, Иркутск и РАТАН-600, САО.

sohowww.nascom.nasa.gov/ — архив крупнейшего солнечного космического проекта SOHO

cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm — мировая сеть наблюдений космических лучей.

superdarn.jhuapl.edu/ — портал проекта «Superdarn» — системы радарного зондирования приполярной ионосферы на сайте APL.

sd-www.jhuapl.edu/Aurora/index.html — еще один ресурс APL, посвященный ионосферным и авроральным исследованиям.

leadbelly.lanl.gov — архив данных по энергичным частицам на геостационарной орбите.

cdaweb.gsfc.nasa.gov — основной архив информации по всем спутниковым проектам, связанным с исследованиями космического пространства по солнечно-земной тематике.

spidr.ngdc.noaa.gov — архив магнитограмм, солнечных и геомагнитных индексов и другой похожей информации, собираемый геофизическим центром NGDC NOAA.

darts.isas.jaxa.jp — архив японских спутниковых проектов «Yohkoh», «Geotail», «Akebono».

Виртуальные обсерватории

vspo.gsfc.nasa.gov — доступ к данным по космической физике.

virtualsolar.org — обсерватория солнечных данных.

www.egso.org/ — Европейская солнечная обсерватория.

maggy.engin.umich.edu/mist/vgmo.html — обсерватория геомагнитных данных.

vho.nasa.gov — обсерватория гелиосферных данных, в основном по солнечному ветру и космическим лучам.