У ПРИРОДЫ ЕСТЬ И КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

Кандидат физико-математических наук А. ПЕТРУКОВИЧ, доктор физико-математических наук Л. ЗЕЛЕНЫЙ, Институт космических исследований.

В XX веке земная цивилизация незаметно переступила в своем развитии очень важный рубеж. Техносфера — область человеческой активности – расширилась далеко за пределы границ естественной среды обитания — биосферы. Эта экспансия носит как пространственный – за счет освоения космического пространства, так и качественный характер – за счет активного использования новых видов энергии и электромагнитных волн. Но все равно для инопланетян, смотрящих на нас с далекой звезды, Земля остается всего лишь песчинкой в океане плазмы, заполняющем Солнечную систему и всю Вселенную, и нашу стадию развития можно сравнить скорее с первыми шагами ребенка, чем с достижением зрелости. Новый мир, открывшийся человечеству, не менее сложен и, как, впрочем, и на Земле, далеко не всегда дружественен. При его освоении не обошлось без потерь и ошибок, но мы постепенно учимся распознавать новые опасности и преодолевать их.

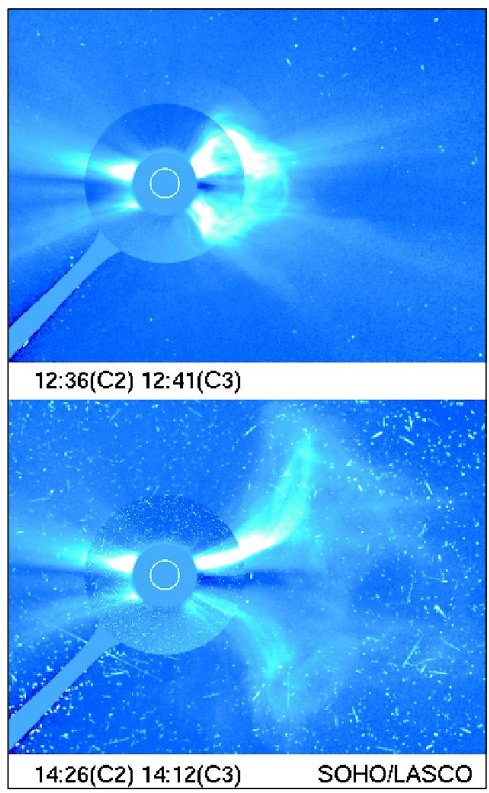
А опасностей этих немало. Это и радиационный фон в верхних слоях атмосферы, и потеря связи со спутниками, самолетами и наземными станциями, и даже катастрофические аварии на линиях связи и электропередач, происходящие во время мощных магнитных бурь.

СОЛНЦЕ — ЭТО НАШЕ ВС¨

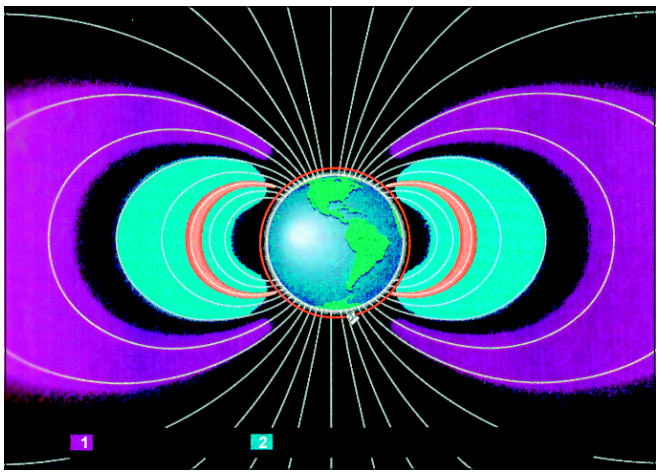
Солнце поистине является центром нашего мира. Миллиарды лет оно удерживает планеты около себя и обогревает их. Земля остро чувствует изменения солнечной активности, проявляющиеся в настоящее время главным образом в виде 11-летних циклов. Во время всплесков активности, учащающихся в максимумах цикла, в короне Солнца рождаются интенсивные потоки рентгеновского излучения и энергичных заряженных частиц — солнечных космических лучей, а также происходят выбросы огромных масс плазмы и магнитного поля (магнитных облаков) в межпланетное пространство. Хотя магнитосфера и атмосфера Земли довольно надежно защищают все живое от прямого воздействия солнечных частиц и излучений, многие создания рук человеческих, например радиоэлектроника, авиационная и космическая техника, линии связи и электропередач, трубопроводы, оказываются очень чувствительны к электромагнитному и корпускулярному воздействию, приходящему из околоземного космического пространства. Мы уже рассказывали о том, как устроена магнитосфера Земли и как околоземное пространство реагирует на солнечную активность (см. «Наука и жизнь» № 7, 2001 г.). Познакомимся теперь с наиболее практически важными проявлениями солнечной и геомагнитной активности, часто называемыми «космическая погода».

ОПАСНО! РАДИАЦИЯ!

Пожалуй, одним из наиболее ярких проявлений враждебности космического пространства к человеку и его творениям, кроме, конечно, почти полного по земным меркам вакуума, является радиация – электроны, протоны и более тяжелые ядра, разогнанные до огромных скоростей и спо-



Рентгеновские снимки солнечной короны, постоянно наблюдаемой спутником SOHO, после солнечной вспышки покрываются многочисленными белыми точками. Их появление вызвано тем, что протоны высокой энергии солнечных космических лучей проникают в радиоэлектронные системы космических аппаратов, в том числе и в ячейки ПЗС-матриц, формирующих изображение, вызывая многочисленные сбои.



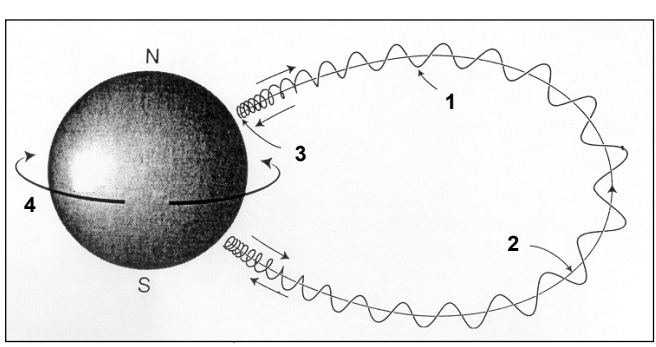
В реальном магнитном поле внутренней магнитосферы Земли электроны высокой энергии наиболее надежно удерживаются во внешнем радиационном поясе (1), а протоны – во внутреннем (2).

собные разрушать органические и неорганические молекулы. О вреде, который радиация наносит живым существам, хорошо известно, но достаточно большая доза облучения (то есть количество энергии, поглощенной веществом и пошедшей на его физическое и химическое разрушение) может выводить из строя и радиоэлектронные системы. Электроника страдает также и от «единичных сбоев», когда частицы особо высокой энергии, проникая глубоко внутрь электронной микросхемы, изменяют электрическое состояние ее элементов, сбивая ячейки памяти и вызывая фальшивые срабатывания. Чем сложнее и современнее микросхема, тем меньше размеры каждого элемента и тем больше вероятность сбоев, которые могут привести к ее неправильной работе и даже к остановке процессора. Эта ситуация по своим последствиям схожа с внезапным зависанием компьютера в разгар набора текста, с той лишь разницей, что аппаратура спутников, вообще говоря, предназначена для автоматической работы. Для исправления ошибки приходится ждать следующего сеанса связи с Землей при условии, что спутник будет способен выйти на связь.

Первые следы радиации космического происхождения на Земле были обнаружены австрийцем Виктором Гессом еще в 1912 году. Позднее, в 1936 году, за это открытие он получил Нобелевскую премию. Атмосфера эффективно защищает нас от космического излучения: поверхности Земли достигает совсем не много так называемых галактических космических лучей с энергиями выше нескольких гигаэлектронвольт, рожденных за пределами Солнечной системы. Поэтому изучение энергичных частиц за пределами атмосферы Земли сразу стало одной из основных научных задач космической эры. Первый эксперимент по измерению их энергии был поставлен группой советского исследователя Сергея Вернова в 1957 году. Действительность превзошла все ожидания — приборы зашкалило. Спустя год руководитель аналогичного американского эксперимента Джеймс Ван Аллен понял, что это не сбой в работе прибора, а реально существующие мощнейшие потоки заряженных частиц, не относящихся к галактическим лучам. Энергия этих частиц недостаточно велика, чтобы они могли достигать поверхности Земли, но в космосе этот «недостаток» с лихвой компенсируется их количеством. Основным источником радиации в окрестностях Земли оказались высокоэнергичные заряженные частицы, «живущие» во внутренней магнитосфере Земли, в так называемых радиационных поясах.

Известно, что почти дипольное магнитное поле внутренней магнитосферы Земли создает особые зоны «магнитных бутылок», в которых заряженные частицы могут «захватываться» на длительное время, вращаясь вокруг силовых линий. При этом частицы периодически отражаются от околоземных концов силовой линии (где магнитное поле увеличивается) и медленно дрейфуют вокруг Земли по окружности. В наиболее мощном внутреннем радиационном поясе хорошо удерживаются протоны с энергиями вплоть до сотен мегаэлектронвольт. Дозы облучения, которые можно получить при его пролете, настолько велики, что долго в нем рискуют держать только научно-исследовательские спутники. Пило-

В геомагнитном поле заряженные частицы с определенными скоростями могут захватываться в так называемые «магнитные бутылки»: траектории электронов и протонов (1) длительное время «привязаны» к силовым линиям (2), многократно отражаясь от их околоземных концов (3) и медленно дрейфуя вокруг Земли (4).



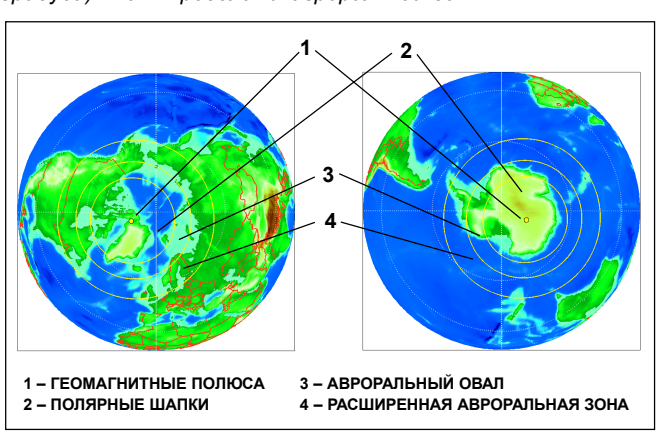
тируемые корабли прячутся на более низких орбитах, а большинство спутников связи и навигационных космических аппаратов находится на орбитах выше этого пояса. Наиболее близко к Земле внутренний пояс подходит в точках отражения. Из-за наличия магнитных аномалий (отклонений геомагнитного поля от идеального диполя) в тех местах, где поле ослаблено (над так называемой бразильской аномалией), частицы достигают высот 200—300 километров, а в тех, где оно усилено (над восточно-сибирской аномалией), — 600 километров. Над экватором пояс отстоит от Земли на 1500 километров. Сам по себе внутренний пояс довольно стабилен, но во время магнитных бурь, когда геомагнитное поле ослабевает, его условная граница спускается еще ближе к Земле. Поэтому положение пояса и степень солнечной и геомагнитной активности обязательно учитываются при планировании полетов космонавтов и астронавтов, работающих на орбитах высотой 300—400 километров.

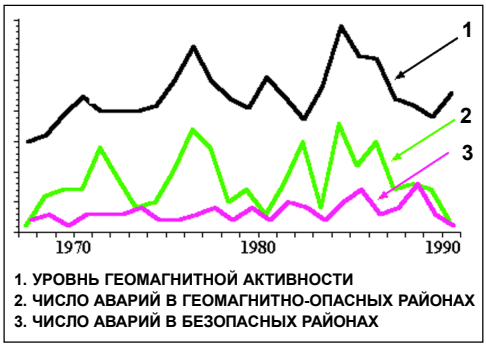
Во внешнем радиационном поясе наиболее эффективно удерживаются энергичные электроны. «Население» этого пояса очень нестабильно и многократно возрастает во время магнитных бурь за счет вброса плазмы из внешней магнитосферы. К сожалению, именно по внешней периферии этого пояса проходит геостационарная орбита, незаменимая для размещения спутников связи: спутник на ней неподвижно «висит» над одной точкой земного шара (ее высота около 42 тысяч километров). Поскольку радиационная доза, создаваемая электронами, не столь велика, то на первый план выходит проблема электризации спутников. Дело в том, что любой объект, погруженный в плазму, должен находиться с ней в электрическом равновесии. Поэтому он поглощает некоторое количество электронов, приобретая отрицательный заряд и соответствующий «плавающий» потенциал, примерно равный температуре электронов, выраженной в электронвольтах. Появляющиеся во время магнитных бурь облака горячих (до сотен килоэлектронвольт) электронов придают спутникам дополнительный и неравномерно распределенный, из-за различия электрических характеристик элементов поверхности, отрицательный заряд. Разности потенциалов между соседними деталями спутников могут достигать десятков киловольт, провоцируя спонтанные электрические разряды, выводящие из строя электрооборудование. Наиболее известным следствием такого явления стала поломка во время одной из магнитных бурь 1997 года американского спутника TELSTAR, оставившая значительную часть территории США без пейджерной связи. Поскольку геостационарные спутники обычно рассчитаны на 10—15 лет работы и стоят сотни миллионов долларов, то исследования электризации поверхностей в космическом пространстве и методы борьбы с ней обычно составляют коммерческую тайну.

Еще один важный и самый нестабильный источник космической радиации — это солнечные космические лучи. Протоны и альфа-частицы, ускоренные до десятков и сотен мегаэлектронвольт, заполняют Солнечную систему только на короткое время после солнечной вспышки, но интенсивность частиц делает их главным источником радиационной опасности во внешней магнитосфере, где геомагнитное поле еще слишком слабо, чтобы защитить спутники. Солнечные частицы на фоне других, более стабильных источников радиации «отвечают» и за кратковременные ухудшения радиационной обстановки во внутренней магнитосфере, в том числе и на высотах, используемых для пилотируемых полетов.

Наиболее глубоко в магнитосферу энергичные частицы проникают в приполярных районах, так как частицы здесь могут большую часть пути свободно двигаться вдоль

Эффекты, связанные с солнечной и геомагнитной активностью, наиболее сильно проявляются в приполярных районах Земли: в полярной шапке — круге, ограниченном примерно 72 градусами геомагнитной широты, и в авроральной зоне (65—72 градуса). Во время сильных магнитных бурь возмущения захватывают и более низкие широты, вплоть до 55 градусов геомагнитной широты. Интересно, что Россия, будучи самой северной страной с точки зрения географии, в геомагнитном смысле уступает пальму первенства странам Западного полушария. Геомагнитный полюс смещен относительно Северного географического полюса в сторону Канады, поэтому авроральная зона на российской стороне охватывает из более-менее освоенных районов только Кольский полуостров, север Тюменской области и район Норильска. На американском же континенте в эту зону попадают практически вся Канада и северо-восточные промышленные штаты США. В Южном полушарии все обитаемые территории находятся далеко за пределами авроральной зоны.





Число аварий в энергосетях США в районах повышенного риска (близких к авроральной зоне) возрастает вслед за уровнем геомагнитной активности. В годы минимума активности вероятности аварий в опасных и безопасных районах практически уравниваются.

силовых линий, почти перпендикулярных к поверхности Земли. Приэкваториальные районы более защищены: там геомагнитное поле, почти параллельное земной поверхности, изменяет траекторию движения частиц на спиральную и уводит их в сторону. Поэтому трассы полетов, проходящие в высоких широтах, значительно более опасны с точки зрения радиационного поражения, чем низкоширотные. Эта угроза относится не только к космическим аппаратам, но и к авиации. На высотах 9—11 километров, где проходит большинство авиационных маршрутов, общий фон космической радиации уже настолько велик, что годовая доза, получаемая экипажами, оборудованием и часто летающими пассажирами, должна контролироваться по правилам, установленным для радиационно опасных видов деятельности. Сверхзвуковые пассажирские самолеты «Конкорд», поднимающиеся на еще большие высоты, имеют на борту счетчики радиации и обязаны лететь, отклоняясь к югу от кратчайшей северной трассы перелета между Европой и Америкой, если текущий уровень радиации превышает безопасную величину. Однако после наиболее мощных солнечных вспышек доза, полученная даже в течение одного полета на обычном самолете может быть больше, чем доза ста флюорографических обследований, что заставляет всерьез рассматривать вопрос о полном прекращении полетов в такое время. К счастью, всплески солнечной активности подобного уровня регистрируются реже, чем один раз за солнечный цикл — 11 лет.

ВЗБУДОРАЖЕННАЯ ИОНОСФЕРА

На нижнем этаже электрической солнечно-земной цепи расположена ионосфера – самая плотная плазменная оболочка Земли, буквально как губка впитывающая в себя и солнечное излучение, и высыпания энергичных частиц из магнитосферы. После солнечных вспышек ионосфера, поглощая солнечное рентгеновское излучение, нагревается и раздувается, так что плотность плазмы и нейтрального газа на высоте нескольких сотен километров увеличивается, создавая значительное дополнительное аэродинамическое сопротивление движению спутников и пилотируемых кораблей. Пренебрежение этим эффектом может привести к «неожиданному» торможению спутника и потере им высоты полета. Пожалуй, самым печально известным случаем такой ошибки стало падение американской станции «Скайлэб», которую «упустили» после крупнейшей солнечной вспышки, произошедшей в 1972 году. К счастью, во время спуска с орбиты станции «Мир» Солнце было спокойным, что облегчило работу российским баллистикам.

Однако, возможно, наиболее важным для большинства обитателей Земли эффектом оказывается влияние ионосферы на состояние радиоэфира. Плазма наиболее эффективно поглощает радиоволны только вблизи определенной резонансной частоты, зависящей от плотности заряженных частиц и равной для ионосферы примерно 5—10 мегагерцам. Радиоволны более низкой частоты отражаются от границ ионосферы, а волны более высокой — проходят сквозь нее, причем степень искажения радиосигнала зависит от близости частоты волны к резонансной. Спокойная ионосфера имеет стабильную слоистую структуру, позволяя за счет многократных отражений принимать радиосигнал диапазона коротких волн (с частотой ниже резонансной) по всему земному шару. Радиоволны с частотами выше 10 мегагерц свободно уходят через ионосферу в открытый космос. Поэтому радиостанции УКВ- и FM-диапазонов можно слышать только в окрестностях передатчика, а на частотах в сотни и тысячи мегагерц связываются с космическими аппаратами.

Во время солнечных вспышек и магнитных бурь количество заряженных частиц в ионосфере увеличивается, причем так неравномерно, что создаются плазменные сгустки и «лишние» слои. Это приводит к непредсказуемому отражению, поглощению, искажению и преломлению радиоволн. Кроме того, нестабильные магнитосфера и ионосфера и сами генерируют радиоволны, заполняя шумом широкий диапазон частот. Практически величина естественного радиофона становится сравнимой с уровнем искусственного сигнала, создавая значительные затруднения в работе систем наземной и космической связи и навигации. Радиосвязь даже между соседними пунктами может стать невозможной, но взамен можно случайно услышать какую-нибудь африканскую радиостанцию, а на экране локатора увидеть ложные цели (которые нередко принимают за «летающие тарелки»). В приполярных районах и зонах аврорального овала ионосфера связана с наиболее динамичными областями магнитосферы и поэтому наиболее чувствительна к приходящим от Солнца возмущениям. Магнитные бури в высоких широтах могут практически полностью блокировать радиоэфир на несколь-

ко суток. При этом, естественно, замирают и многие другие сферы деятельности, например авиасообщение. Именно поэтому все службы, активно использующие радиосвязь, еще в середине XX века стали одними из первых реальных потребителей информации о космической погоде.

ТОКОВЫЕ СТРУИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Любители книг о полярных путешественниках наслышаны не только про перебои радиосвязи, но и про эффект «сумасшедшей стрелки»: во время магнитных бурь чувствительная стрелка компаса начинает вертеться как угорелая, безуспешно пытаясь уследить за всеми изменениями направления геомагнитного поля. Вариации поля создаются струями ионосферных токов силой в миллионы ампер — электроджетов, которые возникают в полярных и авроральных широтах при изменениях в магнитосферной токовой цепи. В свою очередь магнитные вариации, согласно всем известному закону электромагнитной индукции, генерируют вторичные электрические токи в проводящих слоях литосферы Земли, в соленой воде и в оказавшихся поблизости искусственных проводниках. Наводимая разность потенциалов невелика и составляет примерно несколько вольт на километр (максимальное значение было зарегистрировано в 1940 году в Норвегии и составило около 50 В/км), но в протяженных проводниках с низким сопротивлением – линиях связи и электропередач, трубопроводах, рельсах железных дорог — полная сила индуцированных токов может достигать десятков и сотен ампер.

Наименее защищены от подобного влияния воздушные низковольтные линии связи. И действительно, значительные помехи, возникавшие во время магнитных бурь, были отмечены уже на самых первых телеграфных линиях, построенных в Европе в первой половине XIX века. Сообщения об этих помехах можно, вероятно, считать первыми историческими свидетельствами нашей зависимости от космической погоды. Получившие распространение в настоящее время волоконно-оптические линии связи к такому влиянию нечувствительны, но в российской глубинке они появятся еще нескоро. Значительные неприятности геомагнитная активность должна доставлять и железнодорожной автоматике, особенно в приполярных районах. А в трубах нефтепроводов, зачастую тянущихся на многие тысячи километров, индуцированные токи могут значительно ускорять процесс коррозии металла.

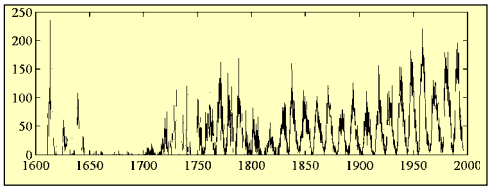
В линиях электропередач, работающих на переменном токе частотой 50—60 Гц, индуцированные токи, меняющиеся с частотой менее 1 Гц, практически вносят только небольшую постоянную добавку к основному сигналу и должны были бы слабо влиять на суммарную мощность. Однако после аварии, произошедшей во время сильнейшей магнитной бури 1989 года в канадской энергетической сети и оставившей на несколько часов половину Канады без электричества, такую точку зрения пришлось пересмотреть. Причиной аварии оказались трансформаторы. Тщательные исследования показали, что даже небольшая добавка постоянного тока может вывести из строя трансформатор, предназначенный для преобразования переменного тока. Дело в том, что постоянная составляющая тока вводит трансформатор в неоптимальный режим работы с избыточным магнитным насыщением сердечника. Это приводит к избыточному поглощению энергии, перегреву обмоток и в конце концов к аварии всей системы. Последовавший анализ работоспособности всех энергетических установок Северной Америки выявил и статистическую зависимость между количеством сбоев в зонах повышенного риска и уровнем геомагнитной активности.

КОСМОС И ЧЕЛОВЕК

Все описанные выше проявления космической погоды можно условно характеризовать как технические, а физические основы их влияния в общем известны – это прямое воздействие потоков заряженных частиц и электромагнитных вариаций. Однако невозможно не упомянуть и о других аспектах солнечно-земных связей, физическая сущность которых не вполне ясна, а именно о влиянии солнечной переменности на климат и биосферу.

Перепады полного потока излучения Солнца даже во время сильных вспышек составляют менее одной тысячной солнечной постоянной, то есть, казалось бы, они слишком малы, чтобы непосредственно изменять тепловой баланс атмосферы Земли. Тем не менее существует ряд косвенных доказательств, приведенных в книгах А. Л. Чижевского и других исследователей, свиде-

Изменение солнечной активности влияет на живую природу. На срезе ствола сосны хорошо видно, что ширина годичных колец и, следовательно, скорость роста дерева меняются с периодом около одиннадцати лет.



Солнечная активность, выраженная среднемесячными числами Вольфа, имеет характерную цикличность, но величины максимумов и периодичность не были постоянны в течение последних 400 лет. Длительность солнечного цикла составляла от 10 до 14 лет. В конце XVII и начале XIX века отмечались периоды пониженной активности, во время которых солнечная периодичность практически не проявлялась, а в XX веке солнечная активность была выше, чем в предыдущих столетиях.

тельствующих о реальности солнечного влияния на климат и погоду. Отмечалась, например, выраженная цикличность различных погодных вариаций с периодами, близкими к 11- и 22-летним периодам солнечной активности. Эта периодичность отражается и на объектах живой природы — она заметна по изменению толщины древесных колец.

В настоящее время широкое (может быть, даже излишне широкое) распространение получили прогнозы влияния геомагнитной активности на состояние здоровья людей. Мнение о зависимости самочувствия людей от магнитных бурь уже твердо устоялось в общественном сознании и даже подтверждается некоторыми статистическими исследованиями: например, количество людей, госпитализированных «скорой помощью», и число обострений сердечно-сосудистых заболеваний явно возрастает после магнитной бури. Однако с точки зрения академической науки доказательств собрано еще недостаточно. Кроме того, в человеческом организме отсутствует какой-либо орган или тип клеток, претендующих на роль достаточно чувствительного приемника геомагнитных вариаций. В качестве альтернативного механизма воздействия магнитных бурь на живой организм часто рассматривают инфразвуковые колебания – звуковые волны с частотами менее одного герца, близкими к собственной частоте многих внутренних органов. Инфразвук, возможно, излучаемый активной ионосферой, может резонансным образом воздействовать на сердечно-сосудистую систему человека. Остается только заметить, что вопросы зависимости космической погоды и биосферы еще ждут своего внимательного исследователя и к настоящему времени остаются, наверное, самой интригующей частью науки о солнечно-земных связях.

В целом же влияние космической погоды на нашу жизнь можно, вероятно, признать существенным, но не катастрофичным. Магнитосфера и ионосфера Земли неплохо защищают нас от космических угроз. В этом смысле интересно было бы проанализировать историю солнечной активности, пытаясь уяснить, что может ждать нас в будущем. Во-первых, в настоящее время отмечается тенденция к увеличению влияния солнечной активности, связанная с ослаблением нашего щита — магнитного поля Земли — более чем на 10 процентов за последние полвека и одновременным удвоением магнитного потока Солнца, служащего основным посредником при передаче солнечной активности.

Во-вторых, анализ солнечной активности за все время наблюдений солнечных пятен (с начала XVII века) показывает, что солнечный цикл, в среднем равный 11 годам, существовал не всегда. Во второй половине XVII века, во время так называемого минимума Маундера, солнечных пятен практически не наблюдалось в течение нескольких десятилетий, что косвенно свидетельствует и о минимуме геомагнитной активности. Однако идеальным для жизни этот период назвать трудно: он совпал с так называемым малым ледниковым периодом – годами аномально холодной погоды в Европе. Случайно это совпадение или нет, современной науке доподлинно неизвестно.

В более ранней истории отмечались и периоды аномально высокой солнечной активности. Так, в некоторые годы первого тысячелетия нашей эры полярные сияния постоянно наблюдались в Южной Европе, свидетельствуя о частых магнитных бурях, а Солнце выглядело помутневшим, возможно, из-за наличия на его поверхности огромного солнечного пятна или корональной дыры – еще одного объекта, вызывающего повышенную геомагнитную активность. Начнись такой период непрерывной солнечной активности сегодня, связь и транспорт, а с ними вся мировая экономика оказались бы в тяжелейшем положении.

◘

Космическая погода постепенно занимает подобающее ей место в нашем сознании. Как и в случае с обыкновенной погодой, мы хотим знать, что нас ждет и в отдаленном будущем, и в ближайшие дни. Для исследований Солнца, магнитосферы и ионосферы Земли развернута сеть солнечных обсерваторий и геофизических станций, а в околоземном космосе парит целая флотилия научно-исследовательских спутников. Основываясь на приводимых ими наблюдениях, ученые предупреждают нас о солнечных вспышках и магнитных бурях.

ЛИТЕРАТУРА

Киппенхан Р. **100 миллиардов Солнц: Рождение, жизнь и смерть звезд.** — М., 1990.

Куликов К. А., Сидоренко Н. С. **Планета Земля.** — М., 1972.

Мирошниченко Л. И. **Солнце и космические лучи.** — М., 1970.

Паркер Е. Н. **Солнечный ветер** // Астрономия невидимого. — М., 1967.