

«ВСЕ БЕШЕНОЙ БУРЯ, ВСЕ ЗЛЕЕ И ЗЛЕЙ...»

Ю. И. Ермолаев

Юрий Иванович Ермолаев, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией по теоретическому и экспериментальному изучению солнечного ветра и его влияния на околоземное пространство Института космических исследований РАН. Руководитель проекта 04-02-16131.

Вынесенные в заголовок статьи известные слова Ф. И. Тютчева, на наш взгляд, как нельзя лучше характеризуют события конца октября — ноября 2003 г., когда многие средства массовой информации пестрели сообщениями о небывалой солнечной активности и сильнейших магнитных бурях на Земле, при этом эмоциональные оценки событий варьировались от восторженно оптимистичных до трагично-пессимистичных. СМИ соревновались, у кого магнитная буря будет выглядеть ужаснее, не очень заботясь ни о соответствии материала реальности, ни о возможном провоцировании психоза у неустойчивой части публики.

На примере событий октября—ноября 2003 г. [8—10] мы предлагаем читателю ознакомиться с основными представлениями современной науки о солнечно-земных связях, которые в прикладном аспекте обычно называют космической погодой, и обсудить проблемы влияния факторов космической погоды на живую и неживую природу, а также надежности предсказаний геомагнитных возмущений.

А он, мятежный, просит бури...

Восстанавливая хронологию тех событий (рис. 1), начать, по-видимому, следует с середины октября, когда при очень спокойном Солнце на его диске появилась большая активная область.

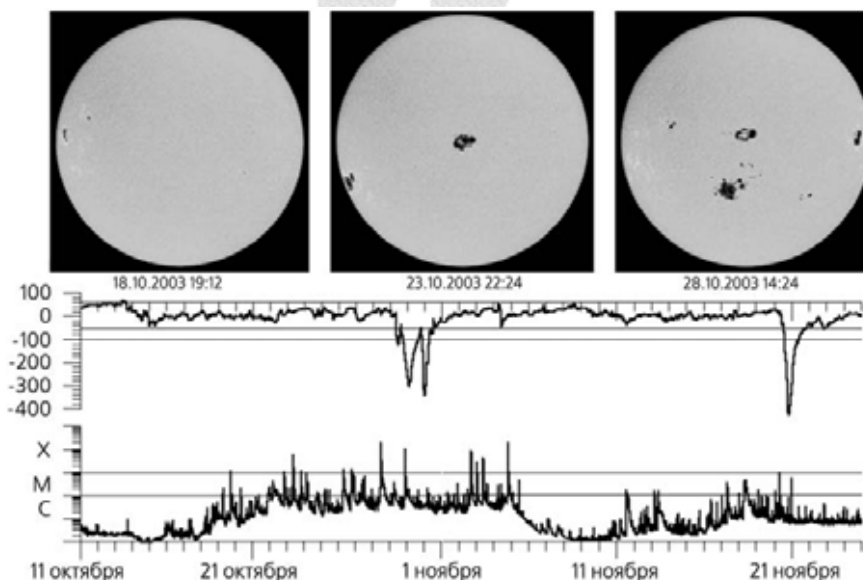


Рис. 1. Результаты наблюдений в период с 11 октября по 24 ноября 2003 г. Вверху — движение активных областей при вращении Солнца (слева направо) по данным космического аппарата «SOHO». В середине — Dst-индекс, определяемый по магнитным измерениям наземных станций (от -50 до -100 нТ и менее -100 нТ — умеренные и сильные магнитные бури). Внизу — логарифм потока рентгеновского излучения (в диапазоне $1-8 \text{ \AA}$) по измерениям спутника «GOES12» (класс C — от 10^{-6} до 10^{-5} , M — от 10^{-5} до 10^{-4} и X — более 10^{-4} Вт/м^2).

За счет вращения Солнца эта область перемещалась от лимба к центру диска и 23 октября послужила источником сильной вспышки (класса X5 по рентгеновской классификации спутников серии «GOES», осуществляющих непрерывный мониторинг Солнца; классы C, M и X определяются как логарифм потока рентгеновского излучения в диапазоне 1—8 Å — соответственно от 10^{-6} до 10^{-5} , от 10^{-5} до 10^{-4} и более 10^{-4} Вт/м²) [8—10].

Многие научные центры у нас и за рубежом поспешили сделать прогноз о генерации этой вспышкой возмущения в солнечной атмосфере и межпланетной среде, которое через один-два дня станет источником сильнейшей магнитной бури на Земле, и предрекали массу различных неприятностей человечеству — от техногенных катастроф до серьезных проблем со здоровьем. Однако, как часто бывает при такого рода прогнозах, ни 24 октября, ни в последующие двое суток магнитной бури на Земле не произошло — наблюдались лишь сильные, однако обычные для тех мест возмущения полярной магнитосферы: видимо, само возмущение прошло мимо магнитосферы, лишь краешком задев ее. Когда затем последовали такие же сильные (X10 и X9) солнечные вспышки 28—29 октября, прогнозы были уже более умеренными, и тем неожиданной для неспециалистов оказалась мощная магнитная буря 30 октября. После очередной серии вспышек 2—3 ноября и сильнейшей за последние три года вспышки 4 ноября (класс X20) стали прогнозировать новую магнитную бурю, но, как и в случае со вспышкой 23 октября, «торпеда мимо прошла...» Магнитосфера оставалась спокойной и после слабых вспышек (класса M2—M5), но 18 ноября вспышка класса M5 привела к сильнейшей буре, зарегистрированной 20 ноября (см. рис. 1).

Здесь, мне кажется, пора успокоить моих коллег: я не собираюсь «сыпать соль на раны» науки, перечисляя «проколы» некоторых научных работников. (Я думаю, они себя уже сами «наказали», нарушив основное правило взаимодействия науки и общества: ты можешь, сколько хочешь обсуждать в среде ученых идеи, гипотезы, теории, но общество должно получать от науки только 100-процентные результаты, которые могут быть использованы на практике). Поспешные заявления, с одной стороны, невольно бросают тень на всю науку и вызывают естественный скепсис у думающих людей, а с другой стороны, усиленные печатным словом, приводят к массовым психозам, которые могут оказаться пагубнее реальных физических причин. Поэтому моя задача — постараться реабилитировать науку, честно показав, что на сегодняшний день она может, а чего — нет.

У природы нет плохой погоды...

Хотя на Земле, по-видимому, не было народа, который не усматривал бы связь Солнца с земными делами и человеком, в научном плане отсчет времени солнечно-земной физики, вероятно, следует начать с наблюдения Ричардом Каррингтоном (Англия) в 1859 г. солнечной вспышки, которую он сопоставил с произошедшей через сутки магнитной бурей на Земле. Особое место в изучении этого вопроса занимает наш соотечественник А. Л. Чижевский (1897—1964), который в 1915—1930 гг. показал, что многие биологические процессы изменяются в соответствии с характерными периодами солнечной активности [1]. В своих воззрениях он пошел еще дальше и утверждал, что и социальные процессы связаны с солнечной активностью, а не с борьбой производительных сил и производственных отношений. Ряд идей Чижевского в дальнейшем проверялся у нас и за рубежом [3, 6], и некоторые из них не нашли научного подтверждения, тем не менее, его имя по праву стоит во главе научного направления, которое изучает влияние факторов солнечной и около земной космической активности на биологические объекты.

Сразу оговоримся, что существуют два канала передачи энергии от Солнца к Земле [2]: электромагнитное и корпускулярное излучения. Электромагнитное является основным, так как именно по этому каналу к Земле поступает наибольшая доля энергии Солнца — около $1,37$ кВт/м². Этот поток энергии лежит преимущественно в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн и очень постоянен — изменения не превышают долей процента; он да же но-

сит название «солнечная постоянная». В основном он поглощается атмосферой и поверхностью планеты, играя важную роль в атмосферной погоде. В ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах электромагнитное излучение сильно изменяется в случае активных процессов на Солнце, однако потоки энергии на этих длинах волн крайне малы (даже во время сильнейших вспышек, когда поток рентгеновского излучения возрастает на три порядка, он, в совокупности с ультрафиолетовым, остается на шесть порядков меньше солнечной постоянной); от их губительного воздействия все живое на Земле защищено атмосферой.

Корпускулярное излучение на несколько порядков слабее по величине переносимой энергии, но при этом играет ключевую роль в космической погоде [2, 4, 5, 7, 8]. Это излучение состоит из солнечного ветра и космических лучей. Космические лучи принято называть энергетичными частицами, что лучше отражает их физическую сущность: они представляют собой заряженные частицы как галактического, так и солнечного происхождения (электроны, протоны, ионы), разогнанные до огромных, часто релятивистских, скоростей. Галактические энергетичные частицы рождаются за пределами Солнечной системы, их поток в среднем ниже потока частиц солнечного происхождения; возрастание активности нашего светила приводит к уменьшению потока галактических частиц. Солнечные энергетичные частицы ускоряются во время активных процессов на Солнце (при вспышках, разрушении арок — структур магнитного поля и т. д.), а также в межпланетной среде (главным образом на ударных волнах). По существу энергетичные частицы — это радиация, которая может проникать внутрь тел и разрушать молекулы живой и неживой природы. К счастью, поверхность Земли надежно защищена атмосферой. Однако в космосе и даже во время трансарктических авиаперелетов энергетичные частицы могут представлять угрозу людям и приборам (главным образом электронным устройствам). Именно из-за действия радиации наблюдались в описываемый период сбои в работе научной аппаратуры «SOHO» и «ACE» (рис. 2 на цветной вклейке) [9, 10].

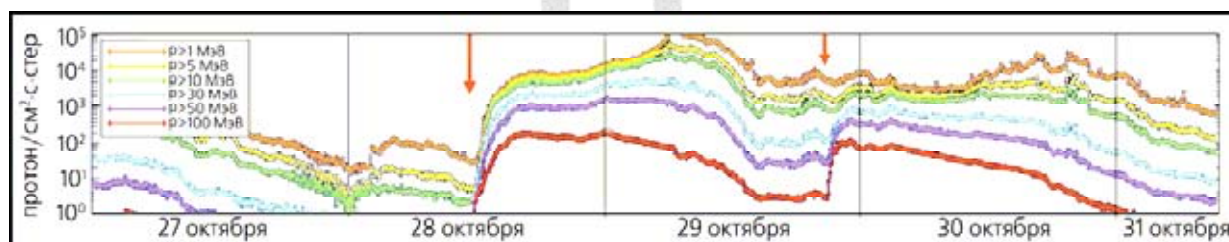


Рис.2. Временной ход потоков энергетичных частиц 27—31 октября 2003 г. по измерениям спутника «GOES%11» (величина энергии частиц показана разным цветом). Видно, как 27 октября заканчивается всплеск потоков, возникших после вспышки 26 октября. Красными стрелками показаны моменты вспышек классов X17 и X10: сбои в работе приборов на аппаратах «ACE» и «SOHO» произошли 28 октября, после усиления потоков частиц.

Плазма солнечной короны при своей высокой температуре (до $2 \cdot 10^6$ К) не может быть полностью удержана гравитационным полем Солнца и убегает в межпланетное пространство, заполняя собой и вытягиваемым из Солнца магнитным полем всю гелиосферу [2, 5, 8]. Хотя, грубо говоря, вся Солнечная система находится внутри солнечной короны, плазму, расположенную выше нескольких солнечных радиусов над поверхностью Солнца, принято называть солнечным ветром, так как его характеристики сильно отличаются от плазмы в основании короны. И плазма солнечного ветра, и плазма в окрестностях Земли — практически идеальные проводники электрического тока, поэтому в соответствии с законами магнитной электродинамики внешняя плазма солнечного ветра и межпланетное магнитное поле не могут вплотную приблизиться к Земле, обладающей собственным сильным магнитным полем. Поскольку магнитное поле Земли хорошо описывается уравнением магнитного диполя, принято говорить о земном магнитном диполе. В результате взаимодействия солнечного ветра и межпланетного магнитного поля с плазмой и магнитным диполем Земли образуется некоторая полость — магнитосфера. На ее границе, удаленной в подсолнечной области на расстояние около 60 тыс. км от Земли, находится магнитопауза, где существует баланс давлений плазмы и магнитного

поля внешнего и внутреннего происхождения. Магнитосфера, в первом приближении, недоступна для внешней плазмы солнечного ветра; единственно, что он может сделать, — это преобразовать форму магнитопаузы таким образом, чтобы все изменения в солнечном ветре были бы компенсированы изменениями формы магнитопаузы, и в каждый момент времени на ней выполнялось условие равенства давлений (рис. 3).

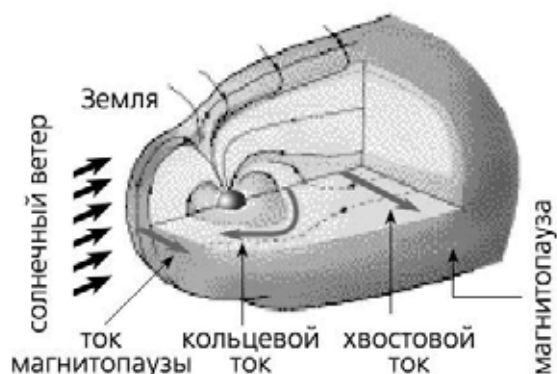


Рис. 3. Структура магнитосферы Земли. Солнечный ветер «сдувает» магнитное поле Земли, и там, где их давления уравниваются, образуется магнитопауза, которая поддерживается системой токов, показанных на рисунке; Земля обозначена шариком внутри магнитосферы.

В действительности ситуация оказывается более сложной. Когда у меж планетного магнитного поля (ММП) появляется компонента, параллельная земному магнитному диполю (ее иначе называют южной компонентой ММП), в области соприкосновения противоположно направленных ММП и земного поля происходит нарушение условия идеальной проводимости плазмы, и в результате эрозии магнитного поля плазма и энергия солнечного ветра попадает внутрь магнитосферы [4, 5]. В зависимости от темпа поступления энергии солнечного ветра внутрь магнитосферы возможны три сценария реакции магнитосферы на этот поток энергии [8] (для их описания воспользуемся аналогией с воздушным шариком):

1. Когда скорость поступления энергии меньше или равна скорости стационарной диссипации энергии внутри магнитосферы, «шарик» не меняет своей формы и каких-либо существенных изменений в магнитосфере не наблюдается, т. е. магнитосфера остается невозмущенной;

2. Когда скорость поступления энергии несильно превышает скорость диссипации, «шарик» слегка надувается, в нем открываются мелкие дырочки и часть энергии стравливается, что приводит к восстановлению его формы. Роль таких мелких дырочек играют магнитные суббури, благодаря которым высвобождается магнитная энергия, накопленная в магнитосфере (рис. 4). К наиболее впечатляющим проявлениям суббурь относится полярное сияние, которое образуется в результате бомбардировки нейтральных атомов атмосферы потоками плазмы из хвоста магнитосферы, ускоренными вдоль магнитных силовых линий. Этот сценарий описывает квазистационарную диссипацию энергии, так как магнитосфера способна долгое время стравливать излишки энергии в полярные области обоих полушарий Земли в виде суббурь с характерным временем повторения около 3 ч;

3. Когда скорость поступления энергии существенно превышает скорость стационарной и квазистационарной диссипации, «шарик» надувается так сильно, что лопается — происходит глобальная перестройка токовой системы магнитосферы и ионосферы, сопровождаемая сильными возмущениями магнитного поля на Земле, что по существу и называется магнитной бурей. При этом основной вклад в изменение магнитного поля вносит кольцевой ток (см. рис. 3), проходящий в области геомагнитного экватора; поэтому, в отличие от магнитных суббурь, когда возмущения магнитного поля наблюдаются в основном в полярных областях, во время магнитных бурь поле изменяется и на низких широтах вблизи экватора. При сильных магнитных бурях полярные сияния могут опускаться на 20—30° к экватору, а иногда наблюдаться и на низких широтах, как это было ночью 30 октября 2003 г. (рис. 5 на цветной вклейке).

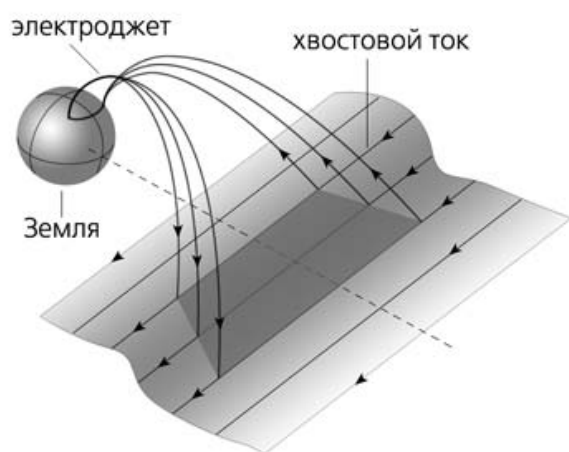


Рис. 4. Во время суббури часть хвостового тока магнитосферы начинает течь через ионосферу Земли, образуя электроджет, который вызывает полярные сияния в ночной стороне аврорального овала (65—72° геомагнитной широты).

Тут необходимо сделать небольшое замечание, касающееся характерных величин и времен [7]. Хотя возникающие во время магнитных бурь токи превышают токи всех электростанций на Земле, а выделяемая энергия равна энергии нескольких бомб, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки, весь «спектакль» развивается в основном на столь больших расстояниях (десятки тысяч километров) от Земли, что реальное изменение соответствующего магнитного поля вблизи ее поверхности составляет порядка 100 нТ, в то время как магнитное поле земного диполя в этой точке может достигать 30—50 тыс. нТ, т. е. изменение составляет доли процента и обычно слабее, чем окружающие нас магнитные поля техногенного происхождения. Время фазы нарастания магнитной бури составляет около полусуток, а фаза восстановления 2—3 сут.



Рис.5. Снимок полярного сияния на юго-западе Москвы, наблюдавшегося 30 октября 2003 г. в 1 ч 26 мин 11 с. Фото И.Е. Кузнецова

Со мною вот что происходит...

Магнитосфера Земли содержит радиационные пояса, заполненные энергетичными частицами. Обычно пилотируемые спутники стараются размещать на орбитах, проходящих ниже нижней кромки радиационного пояса, а спутники связи — выше верхней кромки (на геосинхронных орбитах, где скорость движения спутника равна скорости вращения Земли, и он как бы висит над некоторой территорией). Однако во время магнитных бурь пара метры радиационных поясов заметно изменяются, и это создает угрозу космонавтам и приборам. Кроме того, во время магнитных бурь ионосфера «раздувается», что приводит к торможению низко летящих спутников и риску их падения на Землю.

Магнитные бури негативно влияют не только на «космические небеса», но и на «грешную землю». Сейчас невозможно представить жизнь и быт современного человека без радиосвязи, а во время магнитных возмущений огромные территории (в основном в приполярных областях) лишаются устойчивой радиосвязи, нарушается нормальная работа навигационных приборов и, как следствие, — функционирование отдельных видов транспорта. Изменения магнитных полей наводят электрические токи в проводниках. Хотя эта ЭДС мала (несколько вольт на километр), в протяженных проводниках, таких как линии электропередачи, газопроводы, железнодорожные пути и др., могут создаваться условия для нарушения работы этих систем, как, например, произошло 13 марта 1989 г. в Канаде, когда во время сильной магнитной бури вышел из строя мощный трансформатор и большая часть страны на несколько часов оказалась без электричества.

Влияние факторов космической погоды на мир техники достаточно хорошо изучено, понятны физические механизмы их воздействия, совершенствуются методы борьбы с негативными последствиями [2, 4, 5]. Что же касается влияния этих факторов на биологические объекты, в том числе человека, то в настоящее время у науки больше вопросов, чем ответов.

Систематические работы в области гелиобиологии начались в разных странах около полувека назад [1]. Однако энтузиазм исследователей очень быстро сменился скептицизмом, так как полученные результаты либо давали слишком малые корреляции, либо противоречили друг другу [2, 6]. Дело в том, что влияние космических факторов на биологические объекты необходимо определить на фоне других очень мощных факторов — социальных, сезонных, климатических и т. д. Например, лишь само присутствие солнышка на небе в огромной степени сказывается на самочувствии человека. По этому учет всех факторов требует длительных и дорогостоящих экспериментов с большой статистикой наблюдений. Такие базы данных лишь в последние годы становятся доступными для исследований, которые активно ведутся как у нас в стране (в частности, в Институте космических исследований РАН), так и за рубежом. Единственное, что не вызывает в настоящее время сомнений, это то, что магнитные бури негативно влияют не на всех людей, а лишь на определенные группы риска, например на людей с сердечно-сосудистой патологией [6]. К сожалению, на данном этапе наука не может определенно высказаться относительно конкретных механизмов влияния магнитных бурь на человека. Многие факты еще предстоит изучить. Так, в нескольких опытах было установлено, что некоторые люди чувствуют приближение магнитной бури за один-два дня до ее начала. Иначе говоря, не исключено, что существует иная, нежели описанная выше, цепочка причинно-следственных связей, и на человека оказывает влияние изменение не магнитного поля, а других факторов.

Остановимся на двух гипотезах, описывающих возможный механизм воздействия бури на человека. Первая основана на предположении, что во время магнитной бури в ионосфере возбуждаются низкочастотные инфразвуковые волны; при столь низкой частоте они не попадают в диапазон, регистрируемый нашим ухом, и, тем не менее, могут воздействовать на отдельные органы и системы человека. Вторая гипотеза связана с хронобиологией — наукой, изучающей роль циклов в жизнедеятельности организмов. Магнитное поле на Земле имеет слабую (по величине) циклическую компоненту, которую различные системы живых существ

используют для задания ритмов деятельности, аналогично тому, как кварц в часах задает ритм работы часового механизма. Даже крайне малая по сравнению с величиной магнитного поля Земли «добавка» от магнитной бури может исказить этот ритм и при вести к рассинхронизации систем организма. Этот процесс аналогичен переносу человека на несколько часовых поясов: здоровый организм через пару дней «поймает ритм» и будет нормально функционировать, а для больного это испытание может иметь серьезные последствия.

Можно привести и другие вероятные механизмы воздействия магнитных бурь на биосферу, однако все они — всего лишь научные (или не очень) гипотезы, которые требуется досконально изучить, прежде чем утверждать, что они имеют отношение к реальности. Тем не менее, приведенные примеры иллюстрируют два принципиальных класса таких гипотез: согласно одним, внешнее воздействие имеет достаточно энергии, чтобы вызвать изменения в биологических системах, а согласно другим, внешнее воздействие всего лишь «дает ложную информацию», и организм за счет запасенной в нем энергии неадекватно реагирует на внешние изменения. Ввиду того, что во время магнитных бурь внешние воздействия обладают чрезвычайно малой энергией, большая часть исследователей отдает предпочтение второму классу гипотез.

Что день грядущий мне готовит?

Каким образом можно предсказать появление магнитных бурь? Как я уже объяснил выше, для возникновения магнитной бури необходимо, чтобы из солнечного ветра в магнитосферу Земли поступило количество энергии выше некоторого порога; само же поступление и его скорость определяются величиной и длительностью южной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Поэтому основная задача сводится к тому, чтобы по наблюдениям Солнца предсказать время, величину и место появления южной компоненты ММП в окрестности магнитосферы Земли. Решить эту задачу математически точно в настоящее время не представляется возможным. Это связано, прежде всего, с трудностью построения математической модели, описывающей сложную систему, которая включает цепочку плазменных областей (солнечную атмосферу и межпланетную среду), где доминируют разные физические процессы, а граничные и начальные условия для них пока еще не до конца изучены. В этих условиях допустимы упрощенные подходы, описывающие вместо динамики всей совокупности физических параметров последовательность отдельных повторяющихся явлений, которые выражаются в характерном наборе этих параметров; в ряде случаев это позволяет выявить доминирующие физические связи и построить прогностические схемы для системы Солнце — солнечный ветер — геомагнитосфера [4, 5, 7].

Обычно ММП лежит в плоскости солнечного экватора, и заметная южная компонента ММП отсутствует; большая и долговременная южная компонента ММП может содержаться только в возмущенных течениях солнечного ветра различных типов, к которым относятся магнитные облака и области взаимодействия быстрого и медленного потоков солнечного ветра. Магнитные облака образуются в результате активных динамических процессов в солнечной атмосфере, сопровождающихся выбросами корональной массы (рис. 6).

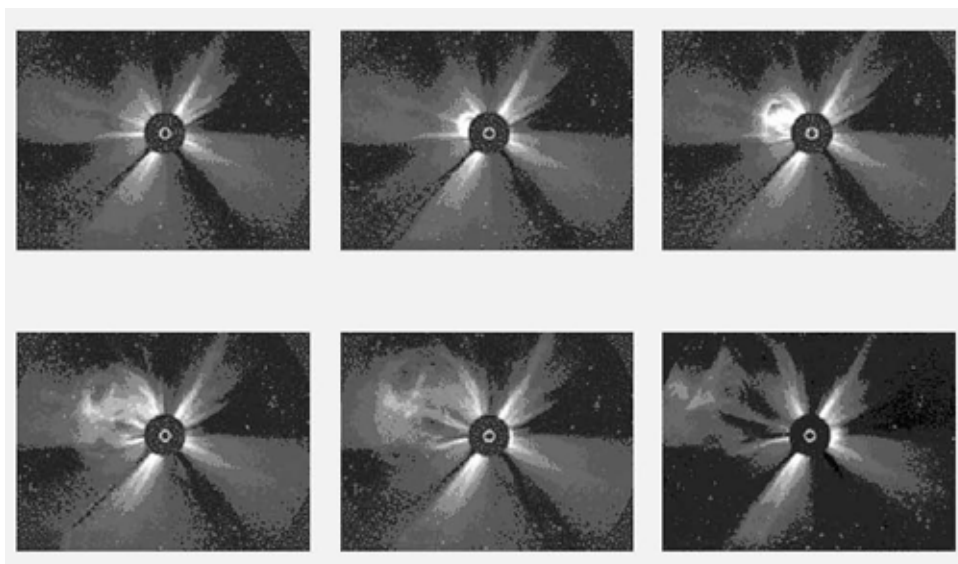


Рис. 6. Восьмичасовая последовательность наблюдений выброса корональной массы 5—6 августа 1999 г., проводившихся с помощью коронографа белого света на космическом аппарате «SOHO». Белая окружность показывает размер и положение Солнца. Выброс, хорошо заметный в верхней левой четверти рисунков, движется приблизительно перпендикулярно линии Солнце—Земля и поэтому не попадет в окрестность Земли.

Это необязательно должны быть солнечные вспышки; возможны, например, отрыв волокон или эруптивные протуберанцы — одним словом, любая быстрая перестройка магнитных (токовых) структур Солнца. Наблюдать выбросы корональной массы,двигающиеся к Земле, достаточно сложно технически. Систематические их наблюдения начались с запуском в 1996 г. космической обсерватории «SOHO». Чтобы зарегистрировать слабое свечение плазмы, необходимо вырезать область яркого солнечного диска из поля зрения прибора, и поэтому определить ряд параметров выброса,двигающегося на наблюдателя, невозможно. Для решения этой проблемы планируется запустить два космических аппарата проекта STEREO (НАСА), которые будут разведены по орбите Земли (один должен обгонять Землю, другой отставать от нее). Таким образом, выбросы,двигающиеся к Земле, можно будет наблюдать, во-первых, практически на лимбе, во-вторых, — стереоскопически, что позволит более точно определять их параметры, в частности начальную траекторию.

Считается, что выбросы корональной массы и образуют магнитные облака в межпланетной среде. В этих облаках наблюдается повышенное магнитное поле, которое скручено в жгут и часто «зацеплено» за солнечную корону одним или обоими концами. Такая конфигурация приводит к тому, что в магнитных облаках появляются долговременные крупномасштабные структуры с южной компонентой ММП; пролетая мимо магнитосферы Земли, они могут возбуждать магнитные бури. Примером воздействия магнитного облака может быть явление 10—11 января 1997 г. [4], которое привело к выходу из строя американский телевизионный ретранслятор TELSTAR401A.

Области сжатия образуются не в солнечной атмосфере, а по пути солнечного ветра, когда медленное течение плазмы догоняется более быстрым течением, которое, как правило, берет начало из корональных дыр (рис. 7). Корональная дыра — достаточно стационарная область солнечной короны с расходящимся магнитным полем, что создает более благоприятные условия для ускоренного выхода плазмы в межпланетное пространство. В результате потоки солнечного ветра ускоряются, а область их истечения оказывается более холодной и поэтому видна на снимках как более темная. Геоэффективность областей взаимодействия разноскоростных течений связана со следующим фактом: если до сжатия в области взаимодействия сохранилась хотя бы малая южная компонента ММП, то в результате сжатия она возрастет; темп поступления энергии в магнитосферу будет выше, чем при невозмущенном солнечном ветре, и энергия в магнитосфере может превысить порог магнитной бури.

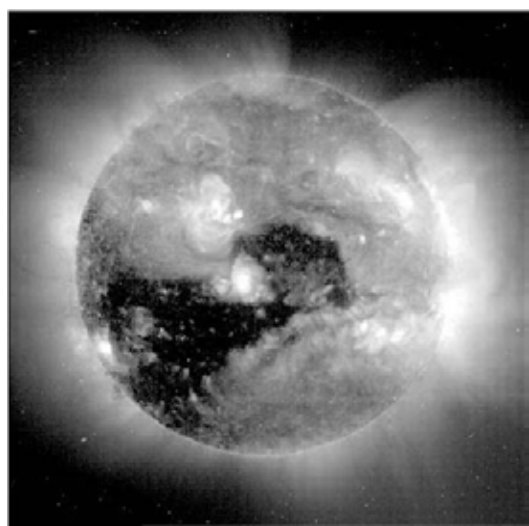


Рис. 7. Изображение корональной дыры, полученное с помощью ультрафиолетового телескопа на космической обсерватории «SOHO».

Прежде чем перейти к описанию процедуры прогноза магнитных бурь, необходимо отметить, что прогнозы разнятся по временным масштабам. Довольно часто даются 27 и 45-дневные прогнозы, которые касаются лишь солнечной активности: появятся ли на Солнце солнечные пятна, корональные дыры и другие структуры, способные стать источниками выбросов или быстрых потоков солнечного ветра. По аналогии с атмосферной погодой, в таком прогнозе может сообщаться лишь о том, например, что в следующие месяц-полтора, вероятно, будет на одну-две бури больше (меньше), чем за аналогичный период прошлого года; указать же конкретные даты и силу магнитных бурь невозможно.

Когда же из-за восточного (левого, если смотреть с Земли) лимба Солнца показались солнечные структуры, способные привести к солнечным возмущениям, или появились корональные дыры, то, предполагая, что геоэффективными они бывают только вблизи центрального меридиана (в секторе вблизи линии Солнце—Земля), строится 7-дневный прогноз. Хотя и в этом случае он только приблизителен по дате, его часто используют, например, при планировании выхода космонавтов в открытый космос.

Наконец, когда вблизи центрального меридиана проходит корональная дыра или происходит вспышка, разрыв волокон и другие сильные возмущения солнечной атмосферы, пытаются сделать 2-суточный прогноз.

Как уже отмечалось, для возбуждения магнитной бури необходимы несколько условий: чтобы образовалось магнитное облако или область сжатия в солнечном ветре; чтобы появилась длительная и большая компонента южного ММП, а магнитное облако или область сжатия имели такую траекторию, которая позволила бы им оказаться вблизи магнитосферы Земли и вступить с ней во взаимодействие.

Каждое из этих условий носит вероятностный характер, т. е. выполняется с некоторой вероятностью. Полная вероятность прогноза магнитной бури получается как произведение трех вероятностей и поэтому оказывается достаточно маленькой [7, 8]. Сопоставление солнечных явлений с возникновением магнитных бурь, согласно описанной процедуре, показывает, что та кой 2-суточный прогноз имеет эффективность около 30—40%, т. е. только три-четыре предсказания из 10 реализуются в действительности, а шесть семь оказываются ложными. Кроме того, прогноз должен указать время начала бури, а поскольку скорость движения возмущений в солнечном ветре может изменяться в два-три раза, а время движения от Солнца до Земли может составлять от 1.5 до 5 сут., то и предсказанное время содержит неопределенность около 3 сут. Интересно отметить, что если взять величину ожидаемого «окна» появления магнитной бури ($5.0 - 1.5 = 3.5$ сут.) и средний период появления магнитных бурь в возмущенные годы (8—10 сут.), то их отношение позволяет оценить частоту попадания бурь в заданные временные «окна» даже при случайном распределении солнечных и магнитосферных возмущений: она составляет 35—40%. Это означает, что оценка эффективности

2суточных прогнозов частично или полностью может быть отнесена к случайным процессам. Таким образом, необходимо продолжить выявление таких наблюдаемых характеристик солнечной активности, которые помог ли бы увеличить эффективность прогнозов до приемлемых значений — около 70—80%.

Наиболее точный, но слишком краткосрочный (30—60 мин) прогноз получается на основе анализа спутниковых данных в масштабе реального времени. В настоящее время в передней либрационной точке (на расстоянии 1,5 млн. км на линии Солнце—Земля) находится космический аппарат «АСЕ», который непрерывно передает результаты измерения параметров среды на Землю. Эти параметры позволяют вычислять поступающую в магнитосферу Земли энергию и предсказывать возбуждение магнитных суббурь и бурь. (В частности, с таким прогнозом можно ознакомиться на сайте Института космических исследований РАН по адресу <http://www.iki.rssi.ru/sw.htm>). Сравнение с реальными измерениями геомагнитной обстановки на Земле показывает, что вероятность правильного прогноза в этом случае составляет около 95%.

«Заблаговременность» краткосрочного прогноза может быть увеличена вдвое, до 1—3 ч, если воспользоваться космическим аппаратом, снабженным «солнечным парусом», который использует энергию солнечных фотонов для изменения своей траектории. Дело в том, что обычный аппарат, помещенный в переднюю либрационную точку, находится в неустойчивом равновесии в области, где уравниваются гравитационные силы Солнца и Земли. Если давление солнечного света, падающего на солнечный парус, будет частично компенсировать гравитационную силу Солнца, то космический аппарат можно поместить в новую квазиустойчивую «либрационную точку», рас положенную на большем расстоянии (около 3 млн. км) от Земли; в этом случае прогноз по прямым измерениям солнечного ветра может быть сделан за 1—3 ч, при этом вероятность правильного прогноза существенно не изменится. Испытания солнечного паруса успешно проведены и у нас, и за рубежом; в Институте космических исследований РАН предложен проект запуска такого «Монитора космической погоды».

* * *

Таким образом, ясно, что 45, 27, 7 и 2суточные прогнозы для здорового человека бесполезны, но крайне вредны для мнительных людей. Такие прогнозы должны использоваться лишь специалистами для конкретных областей человеческой деятельности с целью снижения риска негативных последствий от магнитной бури. Причем переход к каждому последующему, более краткосрочному, прогнозу повышает степень его точности, и только специалисты могут адекватно оценить серьезность предполагаемых угроз. Например, 2суточный прогноз крайне важен для больных людей и должен доводиться до их сведения и сведения медиков, так как его необходимо учитывать при планировании лечебных мероприятий. Прогноз за 30—60 мин до начала бури слишком короткий для принятия серьезных мер, и поэтому он должен использоваться как сигнал тревоги и начала реализации заранее подготовленных мер.

К счастью, атмосфера и магнитное поле Земли надежно защищают чело века от факторов космической погоды. Магнитные бури — неотъемлемая часть того мира, который окружает человека с момента его появления на Земле, и они не представляют серьезной опасности для его здоровых собратьев. Те же факторы, которые угрожают здоровью ослабленных людей и нормальному функционированию чувствительной техники, современная наука активно изучает и стремится заранее предсказывать. Прогресс в понимании солнечно-земных связей и совершенствовании космической техники, в конце концов, даст человечеству такой «зонтик», который поможет справляться с ненастями космической погоды.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Чижевский А. Л. *Земное эхо солнечных бурь*. М., 1973.
- 2 *Физика космоса. Маленькая энциклопедия* / Под ред. Р. А. Сюняева. М., 1986.
- 3 Владимирский Б. М., Кисловский Л. Д. *Космические воздействия и эволюция биосферы*. М., 1986.
- 4 Застенкер Г. Н., Зеленый Л. М. // *Земля и Вселенная*. 1999. №5.

- 5 Петрукович А., Зеленый Л. // *Наука и жизнь*. 2001. №10.
- 6 Бреус Т. К., Рапопорт С. И. *Магнитные бури: Медико-биологические и геофизические аспекты*. М., 2003.
- 7 Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю. // *Космические исследования*. 2003. №6.
- 8 Ермолаев Ю. И. // *Земля и Вселенная*. 2004. №5.
- 9 Веселовский И. С., М. И. Панасюк, С. И. Авдюшин и др. // *Космические исследования*. 2004. №5.
- 10 Ермолаев Ю. И., Л. М. Зеленый, Г. Н. Застенкер и др. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. №1.

