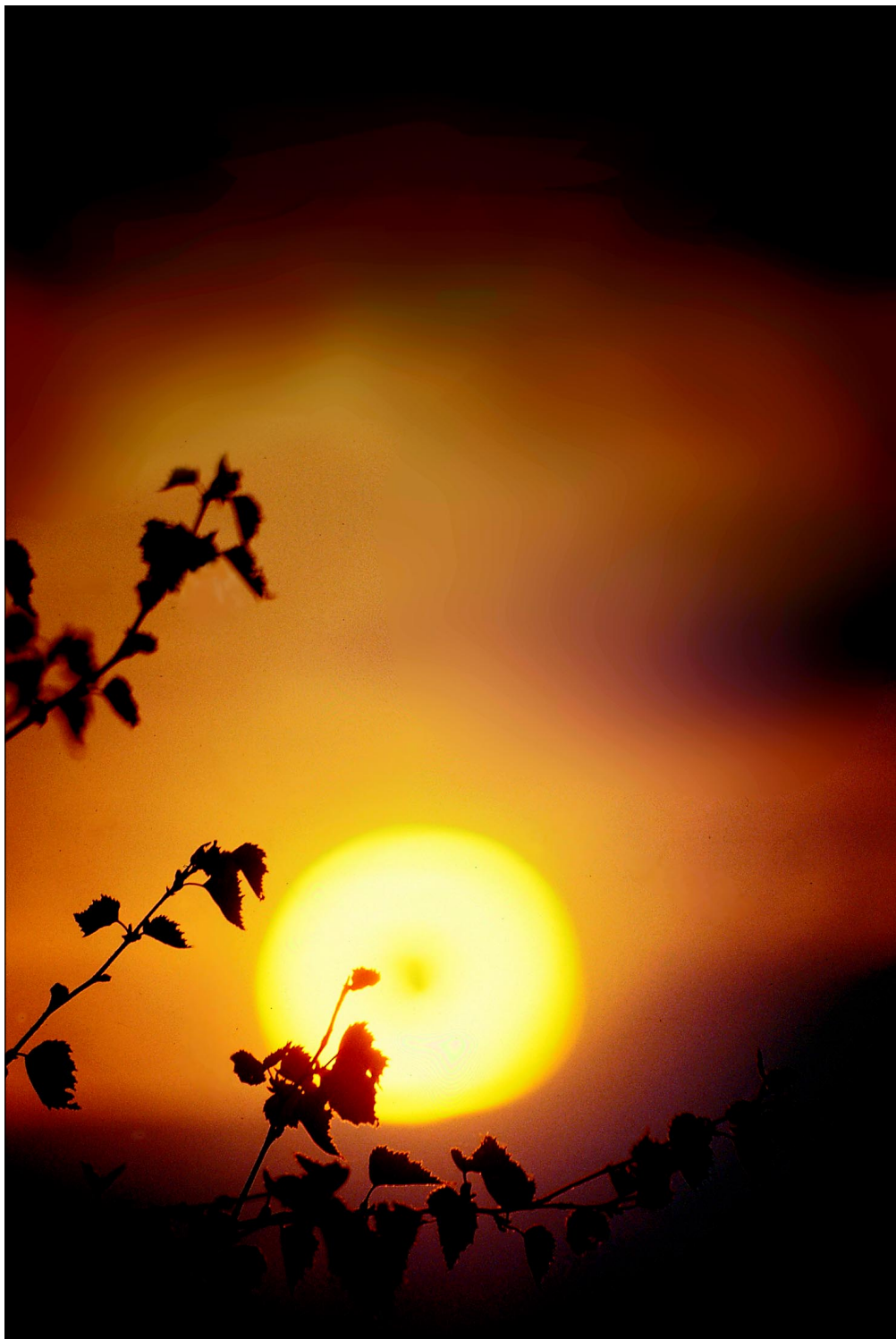


ПРОГНОЗ ПОГОДЫ XXI МАГНИТНЫЕ ОБЛАКА И



ВЕКА: ОЖИДАЮТСЯ ЭЛЕКТРОННЫЕ ОСАДКИ

Прогноз геомагнитной обстановки стал неотъемлемой частью нашей повседневной жизни и все чаще используется во многих, в том числе очень далеких от космоса, областях человеческой деятельности: газеты регулярно печатают прогнозы магнитных бурь. С ними нередко связывают предсказания «неблагоприятных дней», которые якобы наступят через месяц-полтора. Можно ли им доверять? Электродинамические связи между Солнцем и Землей, через которые солнечные процессы существенно влияют как на космическую и земную технику, так и на людей, называют сейчас «космической погодой» (см. «Наука и жизнь» №№ 7, 10, 2001 г.). Однако глубина наших знаний об этих связях все еще не позволяет добиться желаемой точности в подобных предсказаниях. Тем интереснее посмотреть — как же делают прогнозы космической погоды и, в частности, магнитных бурь и как, несмотря на некоторую традиционную загадочность космической науки, научиться понимать содержание прогноза, руководствуясь в основном здравым смыслом и опытом восприятия прогноза обычной — атмосферной — погоды.

Кандидат физико-математических наук А. ПЕТРУКОВИЧ и доктор физико-математических наук Л. ЗЕЛЕНЬИЙ.

Наша планета надежно защищена от космических воздействий атмосферой и геомагнитным полем, и большинство земных объектов и живых существ чувствует лишь настоящие космические ненастья — солнечные вспышки и магнитные бури. Хотя для обычного, немного мнительного человека одного лишь сообщения о грядущей буре бывает достаточно, чтобы он забеспокоился о своем здоровье, техническим потребителям необходимо получить сведения о множестве других параметров: радиационном фоне, величине магнитного поля в конкретных точках земной поверхности, состоянии ионосферы. Тем не менее в своем рассказе мы остановимся сейчас только на одном, наиболее интересном проявлении космической погоды — на геомагнитной активности. Так обычно называют быстрые и резкие изменения (вариации) геомагнитного поля, которые всегда сопровождают магнитные бури — настоящие катастрофы, развивающиеся в околоземном космическом пространстве.

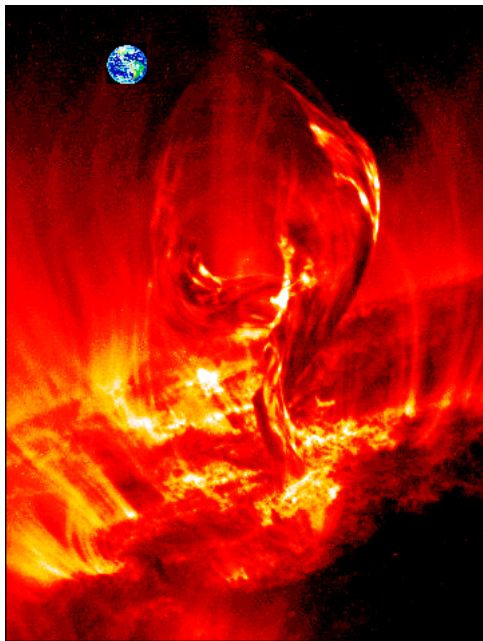
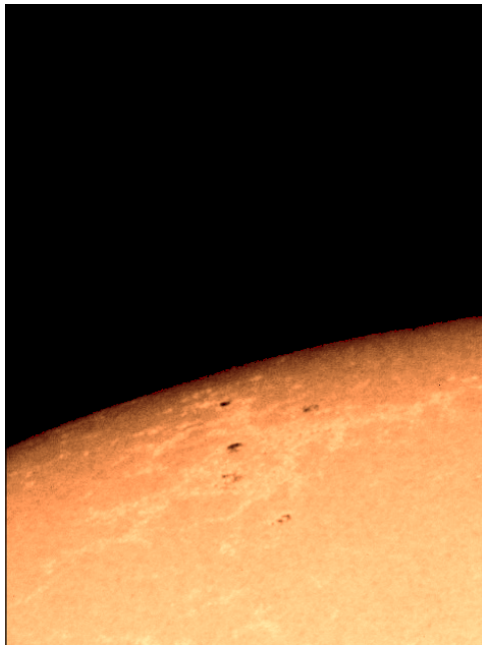
Амплитуду вариаций геомагнитного поля часто используют как наиболее общую характеристику силы магнитных бурь. Для этого применяют специальный индекс геомагнитной активности K_p , который рассчитывают каждые три часа по измерениям магнитного поля на нескольких станциях, расположенных в различных частях земного шара. Он имеет уровни от 0 до 9, подобно шкале силы землетрясений; каждому следующему уровню шкалы соответствуют вариации в 1,6—2 раза большие предыдущего. Сильным геомагнитным вариациям — магнитным бурям — соответствуют уровни K_p больше 4. Так называемые супербури (superstorms — по английской терминологии) с K_p , равным 9, случаются очень редко — в среднем один раз за цикл солнечной активности, примерно 11 лет. Наряду с K_p используют также индекс A_p , равный средней амплитуде ва-

риаций геомагнитного поля по земному шару. Он измеряется в нанотеслах (земное поле равно примерно 50 000 нТл). Уровню $K_p = 4$ приблизительно соответствует A_p , равное 30, а уровню $K_p = 9$ отвечает A_p больше 400. Ожидаемые значения таких индексов и составляют основное содержание геомагнитного прогноза. В русскоязычных прогнозах часто встречаются также качественные описания уровня активности, например «слабовозмущенное» ($K_p = 4$) или «сильновозмущенное» ($K_p > 5$) состояние магнитного поля.

Прежде чем углубиться в детали космического прогноза, полезно провести аналогию с прогнозом обычной — атмосферной — погоды. Обращаясь к сообщениям Гидрометцентра, мы хотим узнать, холодной ли будет зима, будет ли ясно в следующие выходные и брать ли зонтик завтра. Чем ближе интересующий период, тем конкретнее и точнее должны быть предсказания. Перед выходом на улицу достаточно просто посмотреть в окно, чтобы получить достоверную информацию о том, сияет ли Солнце или небо затянуло тучи. Прогноз на ближайшие дни предупреждает о возможном приходе атмосферного фронта с осадками. Сводка же погоды на месяц вперед никогда не содержит предупреждений о конкретном дожде в «следующий четверг». Тем не менее квалифицированный «дальний» прогноз температуры и осадков по-своему необходим для сельского хозяйства, коммунальных служб, речников и энергетиков.

Такие же простые соображения применимы и для понимания космической погоды: предупреждения о начинающейся магнитной буре должны иметь стопроцентную достоверность, а месячные сводки содержат скорее сведения о среднем состоянии

ОБ ОСНОВАХ НАУК



Во время максимумов солнечной активности на поверхности нашего светила появляются внешне безобидные потемнения — солнечные пятна, отмечающие зоны, где интенсивность магнитного поля повышена. Рано или поздно избыточная магнитная энергия выделяется взрывным образом над пятнами во время солнечных бурь, порождая всплески рентгеновского излучения — солнечные вспышки, потоки солнечных космических лучей и выбрасывая огромные массы солнечного вещества — магнитные облака, увлекаемые затем солнечным ветром в межпланетное пространство. Если Земля оказывается на пути такого облака, начинается магнитная буря. Ее питает энергия, которая выделяется при «пересоединении» — аннигиляции противоположно направленных магнитных полей Земли и облака. Часть этой энергии расходуется на колебания геомагнитного поля и полярные сияния у поверхности Земли. Бури негативно влияют и на работу технических систем, и на здоровье людей (см. «Наука и жизнь» №№ 7 и 10 за 2001 г). Например, 19 июля 2000 года над небольшой группой пятен, сфотографированных в видимом диапазоне (слева), на самом деле находился огромный (рядом приведен для сравнения диск Земли) и фантастически красивый выброс горячей плазмы (справа). В этот раз земной магнитной бури не произошло: облако было слишком мало, чтобы преодолеть притяжение Солнца и улечь в межпланетное пространство. Снимок сделан в рентгеновском диапазоне с космического аппарата TRACE, США.

магнитосферы, чем о конкретных магнитных возмущениях. Более того, геомагнитный прогноз даже в чем-то проще обычного прогноза погоды. Прежде всего, потому что, в отличие от сложной динамики взаимосвязанных процессов в земной атмосфере, механизм электромагнитного влияния Солнца на Землю, составляющий основу

космической погоды, можно описать как единую цепь следующих друг за другом событий. Первопричиной всех космических ненастий служат различные проявления солнечной активности, в частности солнечные вспышки. Виновники земных магнитных бурь — магнитные облака, которые вылетают из атмосферы Солнца при вспышках. Их со скоростью 300—1500 км/с уносит солнечный ветер, поэтому они достигают Земли только спустя несколько дней после своего рождения. А солнечный свет проводит в пути всего лишь 8 минут. Эта разница во времени создает определенные удобства для прогноза магнитной бури, но все-таки не позволяет уверенно предсказать ее возникновение.

Кроме того, геомагнитные вариации во время магнитных бурь имеют глобальный характер: их проявления в умеренных широтах практически одинаковы по всему земному шару. Отдельно в прогнозах отмечают только ночную авроральную зону — пояс между 60-м и 80-м градусами магнитной широты на противоположной от Солнца стороне Земли, где геомагнитная активность значительно более высока. Посмотрим теперь, как составляются прогнозы, наиболее часто упоминаемые в печати.

Широкую и в некотором смысле неза заслуженную известность получили сводки геомагнитной активности на 27 и 45 дней вперед. Прежде всего, ясно, что геомагнитный прогноз на такой срок может быть только прогнозом солнечной активности. Более того, так как Солнце вращается с периодом 27 дней, элемент солнечной поверхности, который будет обращен к Земле через 2 — 3 недели, в данный момент не виден: он находится на обратной стороне Солн-

ца! На чем же могут основываться такие заблаговременные предсказания?

Оказывается, активные области — группы солнечных пятен — на поверхности Солнца часто существуют дольше, чем длится один оборот, и на основании наблюдений за предыдущие дни можно составить примерную карту пятен на один-два следующих оборота. Но при этом время возникновения отдельных солнечных вспышек, длительность которых не превышает нескольких часов, а следовательно, и создаваемых ими магнитных бурь предсказать практически невозможно. Реально лишь попытаться предугадать время предполагаемого прохода уже известной активной области на поверхности Солнца через центральный меридиан, откуда ее воздействие на Землю наиболее вероятно. Именно на эти интервалы времени и предсказывают слабовозмущенную геомагнитную обстановку. Высокие значения индексов *Kp* и *Ap*, характерные для магнитных бурь, в таком прогнозе встретить практически невозможно.

Добиться большей конкретности прогноза можно только на ближайшие три — семь дней. В этом случае достаточно сведений о видимой в данный момент части солнечной поверхности. Как только из-за восточного (левого, если смотреть с Земли: наше светило, как и все остальное в Солнечной системе, вращается против часовой стрелки) края солнечного диска появляется новая активная область — группа пятен, выдается предупреждение о повышенной вероятности возникновения солнечных вспышек и соответственно бурных всплесков геомагнитной активности в ближайшие дни. Хотя конкретное время начала вспышки или бури предсказать довольно трудно, эти все еще несколько расплывчатые прогнозы запрашивают, например, космические агентства, учитывающие радиационные опасности магнитных бурь при планировании работ космонавтов и астронавтов в открытом космосе.

За вспышками наиболее удобно следить, измеряя рентгеновское излучение Солнца на космических аппаратах: во время вспышки его интенсивность подскакивает в сотни и тысячи раз. С Земли проводить подобный мониторинг невозможно, потому что рентгеновское излучение пол-

ностью поглощается атмосферой. Поэтому вот уже тридцать лет, как эти наблюдения круглосуточно проводят американские геостационарные спутники GOES, непрерывно передавая результаты на Землю. Поток энергии Солнца (в ваттах на квадратный метр), измеряемый GOES в диапазоне длин волн между 1 и 8 ангстрем, служит шкалой силы вспышек, которая измеряется в баллах. Для Земли считаются опасными вспышки балла M1 (10^5 Вт/м²) и более. Вспышки от M2 до M9 соответственно в 2 — 9 раз сильнее. Интенсивность 10^{-4} Вт/м² (M10) обозначается как X1; показателю X2 соответствует 2×10^{-4} Вт/м² и так далее. В год солнечного максимума бывает до десяти вспышек с баллом выше X1. Самая сильная вспышка текущего солнечного цикла X57 ($5,7 \times 10^{-3}$ Вт/м²) была зафиксирована 14 июля 2000 года. Наземные солнечные телескопы позволяют зарегистрировать наиболее крупные вспышки в оптическом диапазоне и определить их координаты на солнечном диске, но по понятным причинам наземные наблюдения невозможно проводить непрерывно.

После того как солнечная вспышка зарегистрирована, дать прогноз, казалось бы, просто — событие уже произошло. Однако после подавляющего большинства вспышек магнитных бурь не происходит. В чем же дело? Во-первых, достаточно мощные выбросы солнечного вещества, способные преодолеть притяжение Сол-

Ответ на вопрос: каким будет следующий солнечный цикл? — служит предметом долговременного солнечного прогноза. Поскольку число Вольфа (пропорциональное числу солнечных пятен) фактически является единственной независимой характеристикой солнечной активности, исследователи пытаются определить высоту и время следующего максимума, изучая форму предыдущих циклов. Пять лет назад прогнозировалось наступление к 2000 году «возможно, самого большого в истории максимума» со средним числом Вольфа более 160 (слева). Как мы сейчас уже знаем, высота сглаженного максимума не превысила 120 (справа), то есть была ниже, чем у двух предыдущих циклов. Мало того, текущий цикл оказался еще и двуглавым. Пунктирными линиями на правом рисунке показан коридор для ожидаемого в ближайшие годы хода солнечной активности.



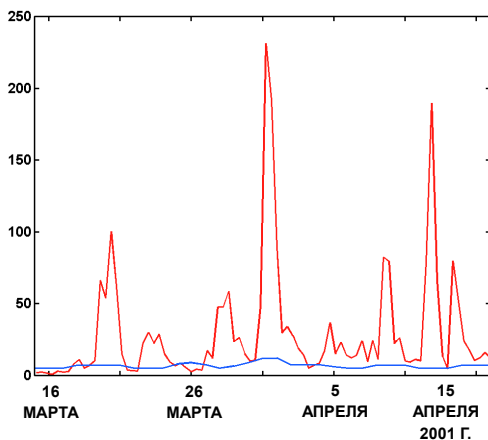
нца и превратиться в магнитное облако, рождаются далеко не всегда. Во-вторых, хотя поперечник облаков у орбиты Земли может достигать нескольких миллионов километров, они все же остаются достаточно малыми в масштабах Солнечной системы (напомним, что расстояние от Земли до Солнца составляет 150 миллионов километров). Поэтому далеко не все магнитные облака опасны. Траектория вылета выбросов обычно близка к радиальной, поэтому наиболее велика вероятность «попасть» по Земле из центральных участков видимого солнечного диска — вблизи линии, соединяющей центр Солнца с Землей. Облака от вспышек, происходящих на периферии солнечного диска и на обратной стороне Солнца, скорее всего, пролетят мимо.

Итак, если вспышка достаточно мощная, а ее местоположение на солнечном диске «подходящее», то предупреждение о «неминуемой сильнейшей магнитной буре», ожидаемой в ближайшие двое-трое суток, обычно широко освещается прессой. Так составляется трехдневный геомагнитный прогноз. Однако определить заранее точное время начала бури (определяемое скоростью движения магнитного облака) и ее силу (зависящую от распределения магнитного поля в облаке) все равно еще невозможно. Зачастую даже сам факт приближения облака к Земле нельзя подтвердить достоверно. В дополнение ко всем бедам часто магнитные бури средней величины вызываются не магнитными облаками, а областями с повышенной плотностью солнечного ветра, образующимися при столкновении быстрых и медленных его течений и никак не связанными с солнечной активностью. Все же, несмотря на некоторое несовершенство, этот тип прогноза многие годы был своего рода последним рубежом на подступах к Земле: после регистрации «подходящей» солнечной вспышки оставалось лишь обреченно ждать начала магнитной бури.

Вплоть до недавнего времени не представлялось возможным обнаружить магнитное облако после его расставания с Солнцем и

до соударения с магнитным полем Земли, что значительно увеличило бы надежность прогноза. Это объясняется исключительно малой плотностью межпланетной плазмы: несколько частиц на кубический сантиметр, по земным меркам — глубокий вакуум, до сих пор недостижимый в лаборатории. Однако высокочувствительные приборы на борту космических аппаратов способны «ощутить» погружение аппарата в облако: плотность плазмы там значительно выше и магнитное поле сильнее, чем в спокойном солнечном ветре. Главная проблема состоит в том, как на длительное время «прицепить» спутник к линии, соединяющей Землю и Солнце, — наиболее вероятному направлению приближения магнитных облаков. Ведь все космические аппараты вращаются вокруг Земли или движутся по межпланетным траекториям и пересекают эту линию лишь изредка. Но, как оказалось, есть и промежуточный вариант. В так называемой точке либрации, находящейся на расстоянии 1,5 миллиона километров от Земли в сторону Солнца, гравитационные силы Земли и Солнца уравновешиваются; искусственный спутник может «зависнуть» здесь на длительное время, как бы балансируя на границе между двумя притягивающими центрами.

Так как радиосигнал распространяется почти в тысячу раз быстрее солнечного ветра, то, сразу же передав на Землю информацию о прохождении магнитного облака из точки либрации по радиоканалу, можно опередить магнитную бурю на несколько десятков минут. В отличие от всех других типов прогноза, достоверность такого, своего рода штормового предупреждения о надвигающемся ненастье близка к ста процентам, так как оно основано на прямых наблюдениях магнитного облака у самых границ околоземного пространства. Несмотря на свою относительную краткосрочность, этот вид прогноза в настоящее время стал необходимой составной частью службы космической погоды, особенно важной для технических подразделений, которые не могут прекращать свою деятельность «на всякий случай» после каждой солнечной вспышки. Своевременное предупреждение полезно также, когда влияние бурь сказывается не мгновенно, а постепенно, в течение одних или нескольких суток, воздействуя, например, на биологические объекты и самочувствие



Ожидаемые среднесуточные величины геомагнитного индекса Ap содержатся в 27- и 45-дневных прогнозах геомагнитной активности. Например, содержание прогноза на период с 13 марта по 16 апреля 2001 года показано на графике синей линией. Хотя предполагалось, что геомагнитная обстановка будет слабозамушенной (Ap в пределах 20), на самом деле за эти дни произошло восемь сильных магнитных бурь, две из которых были действительно выдающимися (красная линия). К сожалению, такой низкий уровень совпадений типичен для подобных прогнозов.

людей. В этом смысле гораздо важнее получать оперативные сообщения о начале бури, чем пользоваться приблизительными прогнозами на месяцы вперед и беспокоиться понапрасну.

С 1997 года в точке либрации постоянно находятся два космических аппарата: европейский спутник SOHO (его снимки были показаны в первой статье — см. «Наука и жизнь» № 7, 2001 г.), изучающий Солнце дистанционно и передающий его изображения в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, и американский спутник ACE, «ответственный» за информацию о солнечном ветре, получаемую с помощью локальных измерений. Ни один отечественный спутник в этой области космического пространства еще не работал, но в Институте космических исследований Российской академии наук совместно с НПО им С. А. Лавочкина сегодня ведется проработка такого космического аппарата «Интербол-3». Для постоянного приема радиосигнала из точки либрации необходимо иметь станции космической связи в разных часовых поясах — ведь принимать сигнал может только антенна, расположенная на дневной стороне и смотрящая на Солнце.

Последний, логически завершающий этап прогноза — регистрация на Земле всплеска геомагнитных вариаций, возникающего с началом магнитной бури. Тем же, кто находится в полярных районах Земли, во время бури имеет смысл в ночное время выйти на улицу и полюбоваться на полярные сияния. Их вызывают потоки электронов, выпадающие в атмосферу из магнитосферы Земли. Это, пожалуй, единственное проявление солнечной и геомагнитной активности, которое может увидеть и невооруженный современный человек. Во время сильных бурь слабое красное свечение ночного неба часто можно наблюдать и в средней полосе России. Не будет преувеличением сказать, что полярные сияния, по-видимому, служат единственным «положительным», то есть радующим глаз, следствием космических бурь. Все остальные или вредны, или просто опасны.

Очевидно, что достичь желаемой точности и полноты прогноза космической погоды можно только международными усилиями. Например, необходимо круглосуточно следить за Солнцем с Земли, и российские телескопы здесь практически идеально дополняют наблюдения американских и европейских обсерваторий. Ни одна развитая страна сейчас не может себе позволить весьма дорогое удовольствие — запускать все необходимые спутники. Роль России с ее опытом космических разработок в таком международном разделении

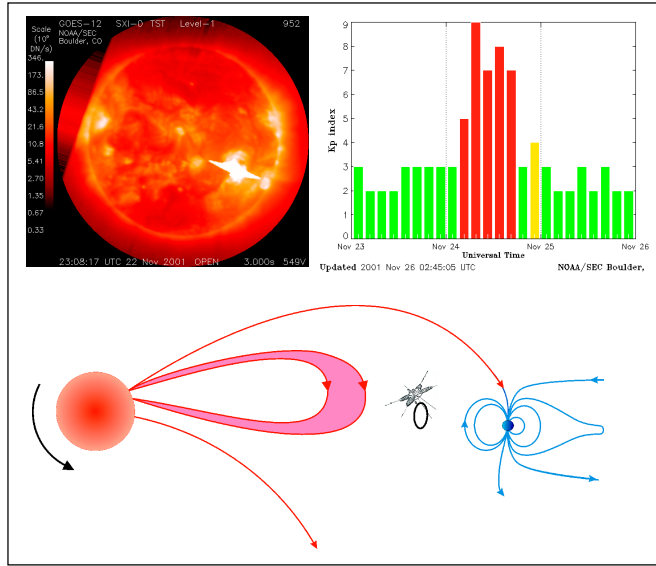


Схема краткосрочного геомагнитного прогноза на примере магнитной бури 23 — 24 ноября 2001 года. Солнечная вспышка класса X1 была зарегистрирована в рентгеновских лучах спутником GOES-12 22 ноября приблизительно в 22 часа по Гринвичу. Положение вспышки на солнечном диске позволяло ожидать магнитную бурю на Земле через двойное расстояние. Фактически магнитное облако, испущенное при вспышке, преодолело расстояние от Земли до Солнца со средней скоростью более 1500 км/с за 35 часов — к 3 часам утра 24 ноября. Магнитная буря длилась весь день 24 ноября и характеризовалась значениями индекса Kp вплоть до 9. Космический аппарат, находящийся в точке либрации, предупредил о подходе облака за 30 минут до его соприкосновения с Землей.

труда может быть очень важна. Так, в 2000 году была завершена российская программа исследований «Интербол», обеспечившая пятилетнюю работу двух спутников на орбитах внутри магнитосферы Земли. Она была тесно скоординирована с родственными программами космических агентств США, Европы и Японии, изучавших с помощью нескольких своих аппаратов Солнце, солнечный ветер и полярные сияния. В настоящее время на орбите находится только один, запущенный в прошлом году, отечественный космический аппарат данного профиля «Коронас-Ф», который наблюдает за Солнцем. Вклад нашей страны в исследование космической погоды может быть значительно увеличен, если удастся довести до конца разработку спутника «Интербол-3», предназначенного для мониторинга солнечного ветра в точке либрации и разработки методов краткосрочного прогноза. Планируется, что он будет работать совместно с флотилией из трех украинских мини-спутников «Прогноз», ответственных за мониторинг ионосферы — самого близкого и наибо-

лее важного для человека «этажа» солнечной-земной цепи.

В заключение немного пофантазируем. Космическая погода — явление глобальное. Ведь в единую электрическую цепь связана вся Солнечная система от Солнца — источника энергии до Земли, чье магнитное поле защищает нас. Современные научные приборы позволяют увидеть почти все этапы работы этой грандиозной электроустановки и спрогнозировать ее состояние в будущем. Мы стараемся уменьшить негативное влияние космоса на космическую и наземную технику, ограничивая свою деятельность или включая специальную защиту. Однако можно ли решить эту проблему кардинально? В состоянии ли человек хоть как-то управлять тем, что происходит в этой грандиозной космической электросети? Конечно, не в наших силах воздействовать на первопричину — солнечную активность, ведь энергетика всплесков на много порядков превосходит все возможности земной цивилизации. Энергия магнитных бурь много меньше, но все же, чтобы повлиять на происходящее с помощью «грубой силы», человечеству придется задействовать буквально все свои энергоресурсы.

К счастью, наши знания о физике космоса позволяют предложить более изящные способы решения проблемы. Можно попытаться произвести тонкую настройку магнитосферы так, чтобы заставить большую часть энергии выделяться наиболее безопасным образом вдали от Земли, в космическом пространстве. Как и в обычной электрической схеме, повлиять на распределение мощности в сети можно, изменив сопротивление отдельных элементов. В восьмидесятые годы был поставлен ряд экспериментов по выпуску облаков плазмы с борта искусственных спутников. По расчетам, дополнительные

заряды могли снизить сопротивление и значительно увеличить ток в области рядом со спутником. Однако из-за огромных размеров магнитосферы заметного воздействия на ее динамику произвести не удалось. Оказалось, что легче это сделать с Земли. Многие магнитосферные токи замыкаются через ионосферу, и при этом относительно небольшие ее участки собирают ток из огромных областей магнитосферы. Поэтому эффективность воздействия здесь может быть гораздо выше, да и энергетические ресурсы на поверхности Земли несравнимы с возможностями космических аппаратов. Проводимость ионосферы можно увеличить, повысив степень ионизации ее нейтральной компоненты с помощью импульсов мощного радиоизлучения, генерируемого гигантскими антенными комплексами (они есть и в России, и в Норвегии, и в США). Хотя первые эксперименты (проведенные, в частности, в ходе недавно завершившегося российского космического проекта «Интербол») показывают, что магнитосфера действительно реагирует на такое искусственное воздействие, необходимо еще много работать, чтобы реально заставить ее подчиняться воле человека. Кто знает, может быть, со временем наша цивилизация больше преуспеет в регулировке магнитных бурь, чем в управлении засухами, ураганами и другими проявлениями атмосферной погоды — непременным атрибутом будущего в понимании писателей-фантастов?

ЛИТЕРАТУРА

Застенкер Г. Н., Зеленый Л. М. **Солнечные магнитные облака атакуют Землю**. «Земля и Вселенная» № 5, 1999, с. 46.

Тамкович Г. М., Зеленый Л. М., Петрукович А. А. **Перспективный российско-украинский проект «Интербол-Прогноз», возможности и реалии**. «Полет», 2002, в печати.

Современные телекоммуникации позволяют практически мгновенно обмениваться показаниями приборов, размещенных в разных концах земного шара и космосе. Не исключение и информация о космической погоде, доступная любому пользователю через сеть Интернета. Каждый может узнать, как сейчас выглядит Солнце, какова геомагнитная обстановка и не видно ли на горизонте магнитного облака. Приведем несколько полезных адресов.

О текущем состоянии геомагнитного поля и величине индекса K_p в Москве и Иркутске можно узнать на сайтах Института земного магнетизма и распространения радиоволн РАН

<http://forecast.izmiran.rssi.ru/> и Института солнечно-земной физики РАН <http://magnit.istp.net.ru/ogmo/patron/> Институт прикладной геофизики Росгидромета представляет геомагнитный прогноз на ближайшую неделю:

http://www.mecom.ru/roshydro/pub/servers/igp_0303/igp_home.htm

С краткосрочным прогнозом магнитных бурь на основе наблюдений солнечного ветра в точке либрации можно ознакомиться в Институте космических исследований РАН

<http://www.iki.rssi.ru/forecast/>

Полный архив всех данных и прогнозов американского центра космической среды SEC NOAA доступен на сайте

<http://www.sec.noaa.gov/> (на английском языке). Это основной и самый полный источник информации о космической погоде.

Основные геомагнитные прогнозы SEC NOAA на русском языке можно увидеть на сайте центра ФОБОС <http://www.gismeteo.ru/weather/geomagn.htm>

Состояние Солнца «глазами» космического аппарата SOHO (в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах) представлено на <http://sohowww.nascom.nasa.gov/> (на английском языке).