

«Ветер, ветер, ты могуч...»

Солнечный ветер и космическая погода

Ю.И.Ермолаев, Л.М.Зеленый

По мере развития техники вообще и космической в частности становится все очевиднее: космические факторы заметно воздействуют на многие технологические системы как внеземного, так и наземного базирования. Кроме того, эти факторы влияют и на биологические объекты, включая человека (не только на космонавтов в сложных условиях космического полета, но и на простых жителей Земли) [1–4]. Еще в конце 60-х годов прошлого столетия в нашей стране было решено создать серию космических аппаратов для изучения солнечно-земных связей и прогноза состояния околоземного космического пространства. Эта серия искусственных спутников Земли получила название «Прогноз», которое и без пояснений указывает на ставившиеся задачи. Первые два таких спутника стартовали 14 апреля и 29 июня 1972 г. В работу по этой программе включилась большая группа сотрудников Института космических исследований, о чем мы и расскажем.

Немного о солнечно-земных связях

Сначала остановимся на некоторых представлениях, используемых при описании сис-



Юрий Иванович Ермолаев, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией по теоретическому и экспериментальному изучению солнечного ветра и его влияния на околоземное пространство ИКИ РАН. Участник экспериментов на искусственных спутниках Земли «Прогноз-7, -8», «Прогноз-10—Интеркосмос» (проект «Интершок»), «Прогноз-11, -12» (проект «Интербол»).



Лев Матвеевич Зеленый, член-корреспондент РАН, лауреат премии Гумбольдта, директор ИКИ РАН, профессор Московского физико-технического института. Область научных интересов — теория токовых слоев и пересоединения в бесстолкновительной плазме, турбулентность и процессы переноса в космической среде. Член ряда международных научных организаций, включая Международную академию астронавтики.

темы Солнце—Земля. Под солнечно-земными связями обычно понимают всю совокупность прямых и опосредованных воздействий со стороны Солнца на процессы в околоземном пространстве и на Земле (рис.1) [3]. По сложившейся традиции, из анализа исключаются стационарные эффекты, и рассматриваются главным образом процессы передачи возмущений вдоль всей цепочки.

Существует два канала передачи энергии от Солнца к Земле: электромагнитное и корпускулярное излучения. Основная доля энергии Солнца — около 1.37 кВт на 1 м² поверхности (что соответствует мощности электрического чайника) — поступает по электромагнитному каналу. Этот поток энергии лежит главным образом в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн. Его величина сохра-

няется с высокой точностью и носит название «солнечная постоянная», так как изменения не превышают долей процента. Он достигает Земли за 8 мин, большей частью поглощается атмосферой и поверхностью Земли и играет определяющую роль в формировании нашего климата. Излучение в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазоне длин волн сильно изменяется при развитии активных процессов на Солнце, однако доля его в общем потоке лучистой энергии крайне мала (даже во время сильнейших солнечных вспышек, когда поток рентгеновского излучения возрастает на три порядка, он остается на шесть порядков меньше солнечной постоянной), а от его губительного воздействия все живое на Земле защищено атмосферой. Второй канал — корпускулярное излучение, — будучи на несколько порядков слабее по величине переносимой энергии, оказывается ключевым при формировании космической погоды, и именно его мы и будем в дальнейшем рассматривать.

Корпускулярное излучение состоит из *солнечного ветра* и *космических лучей*. В последнее время космические лучи принято называть энергичными частицами, что лучше отражает их физическую сущность, так как они представляют собой заряженные частицы — электроны, протоны и другие ионы, — разогнанные до огромных, часто околорелятивистских, скоростей. Эти частицы бывают галактического и солнечного происхождения. Галактические энергичные частицы рождаются за пределами нашей Солнечной системы, их поток на орбите Земли в среднем ниже потока частиц солнечного происхождения, особенно в периоды активности нашего светила. Солнечные энергичные частицы ускоряются во время активных процессов на Солнце (вспышки, разрушение арок и др.) и в межпланетной среде (главным образом на ударных волнах).

По существу, энергичные частицы — это проникающая радиация, которая может разрушать молекулы живой и неживой природы. К счастью, достигнуть поверхности Земли им не дают магнитосфера и атмосфера. Однако в космосе и даже во время трансарктических авиAPERелетов они могут представлять угрозу людям и приборам. Именно из-за действия радиации на электронику чаще всего выходят из строя приборы космических аппаратов. Хотя эти частицы и заряжены, их энергии слишком высоки, а концентрация слишком мала, чтобы считать их плазмой. Плазма — это «коллектив частиц», каждая из которых влияет на далеких соседей. А космические лучи — это частицы-«индивидуалисты», никак не связанные друг с другом.

В отличие от космических лучей, частицы солнечного ветра — постоянно «убегающей» плазмы солнечной атмосферы — действуют коллективно и поэтому описываются законами физики плазмы [2]. Хотя их концентрация на орбите Земли составляет в среднем около 10 см^{-3} (с точки зрения земного экспериментатора, это глубочайший вакуум, недостижимый в земных лабора-

ториях), электроны и ионы непрерывно взаимодействуют друг с другом посредством электрических и магнитных полей и ведут себя как идеально проводящая жидкость (электропроводность такой плазмы близка к электропроводности ртути при комнатной температуре).

В целом концепцию, описывающую связь геомагнитных явлений с процессами на Солнце, можно представить следующим образом [5–8]. Источником энергии геомагнитных явлений служит Солнце, которое потоками солнечного ветра передает энергию *магнитосфере* Земли, образующейся в результате обтекания этим ветром земного магнитного диполя (на границе магнитосферы — *магнитопаузы* — давление плазмы и магнитного поля солнечного ветра уравновешивается давлением плазмы и магнитного поля земного происхождения). Энергия от солнечного ветра поступает в магнитосферу лишь в случае, когда межпланетное магнитное поле имеет заметную компоненту, параллельную земному магнитному диполю, т.е. отрицательную (южную) компоненту B_z . В этом случае на дневной части магнитопаузы встречаются противо-

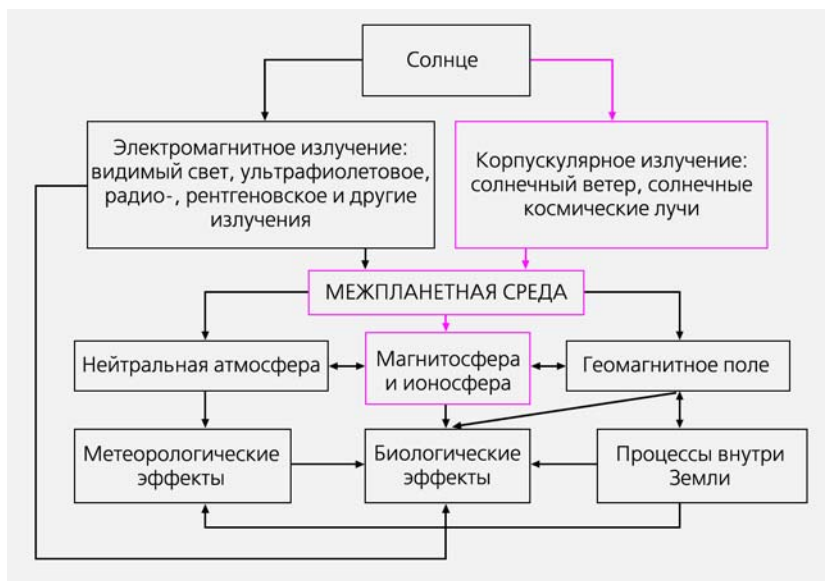


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая солнечно-земные связи. Цветом отмечены связи, рассматриваемые в статье.

положно направленные магнитные поля межпланетного и земного происхождения, и происходит их эрозия (пересоединение), в результате чего магнитосфера становится «открытой» для поступления в нее солнечного ветра. Если скорость поступления энергии оказывается выше скорости ее диссипации, энергия накапливается в магнитосфере. При превышении некоторого определенного уровня накопления любое возмущение вне или внутри магнитосферы может привести к выделению этой энергии (по так называемому триггерному механизму) в виде пересоединения магнитных силовых линий, глобальной перестройки токовой системы магнитосферы и нагрева/ускорения плазмы, т.е. к магнитосферному возмущению. К таким возмущениям относятся сравнительно небольшие возмущения в полярных областях магнитосферы (суббури) и сильные (главным образом в приэкваториальной

области магнитосферы) возмущения (магнитные бури). Для описания магнитных бурь обычно используются два индекса — *Dst*- и *Kp*-индексы, показывающие отклонение магнитной индукции от среднего значения. Первый определяют с помощью магнитометрических станций, расположенных вблизи экватора, второй — на средних широтах (рис.2). Различаются эти индексы также формой представления: *Kp* представляется в квазилогарифмической форме, а *Dst* — в линейной. Средние значения магнитного поля составляют 30–50 тыс. нТ в зависимости от местонахождения станции, а вариации поля во время магнитных возмущений — несколько сотен нанотесла (т.е. не превышают нескольких процентов). В соответствии с расположением сети станций, используемых для измерения, *Dst*-индекс более чувствителен к магнитной буре (изменению кольцевого тока), а *Kp*-индекс реагирует и на маг-

нитные бури, и на полярные суббури, что зачастую приводит к неоднозначности интерпретации наблюдений.

Теория и эксперимент

Существование солнечного ветра было предсказано еще до начала космической эры как по наблюдениям хвостов комет (рис.3), так и на основе теоретических рассмотрений советскими, американскими и германскими учеными в 40-е годы прошлого века [2, 3]. После того как удалось установить, что солнечная корона обладает очень высокой температурой (по современным представлениям, до 2 млн градусов), стало понятно: плазма солнечной короны не может полностью удерживаться гравитационным полем Солнца и убегает в межпланетное пространство, заполняя собой и замороженным в нее магнитным полем, вытягиваемым из Солнца, всю гелиосферу (т.е. всю Солнечную систему до границы ее взаимодействия с межзвездным газом). Хотя, грубо говоря, вся Солнечная система находится внутри солнечной короны,

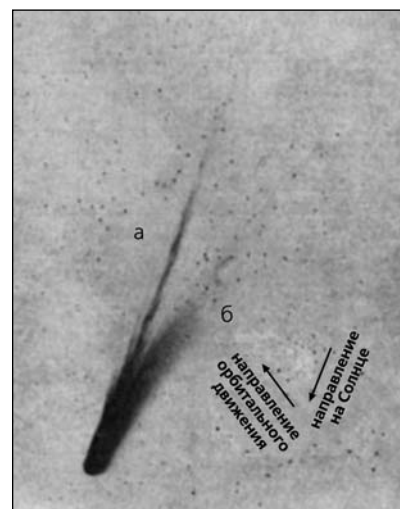
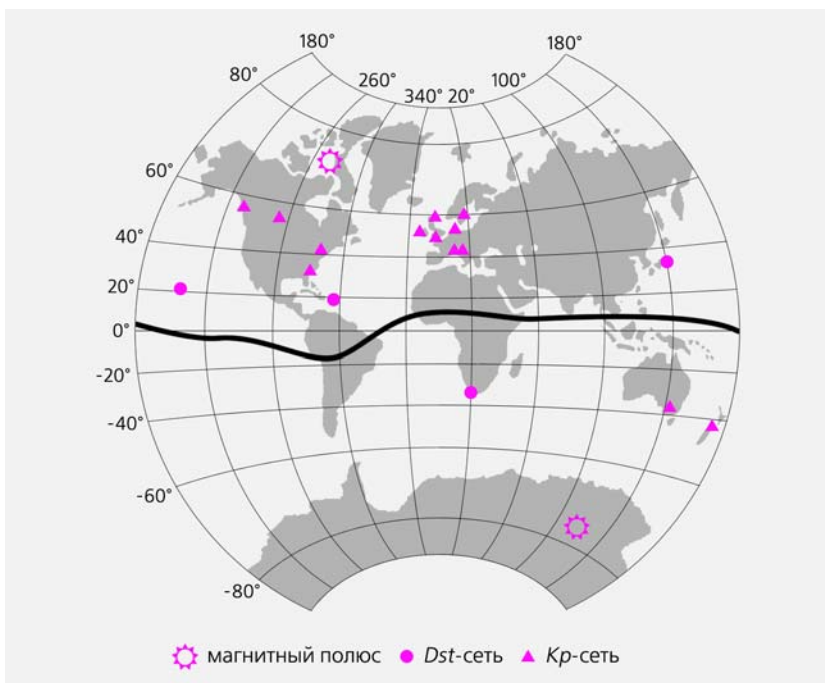


Рис.2. Местоположение магнитных станций, используемых для определения *Kp*- (треугольники) и *Dst*- (кружки) индексов. Звездочки показывают положение магнитных полюсов (ось магнитного диполя Земли отклонена от оси вращения на угол 11,5°, жирной линией показано положение магнитного экватора на поверхности Земли).

Рис.3. Фотография кометы Мркоса 1957 V (негатив): а — плазменный прямолинейный хвост, б — широкий газово-пылевой хвост.

плазму за пределами нескольких солнечных радиусов от поверхности Солнца принято уже называть солнечным ветром, так как его характеристики сильно отличаются от характеристик плазмы в основании короны. Сам термин, по-видимому, впервые появился в немецкой научной литературе, а главным пионером теоретического изучения этого явления стал Е.Паркер (США). Существование солнечного ветра было доказано экспериментально в 1959 г. группой советских ученых во главе с К.И.Грингаузом (1918—1993) с помощью приборов, установленных на космическом аппарате «Луна-2», а позже — «Луна-3».

Паркер сделал принципиальный шаг для описания солнечного ветра. Вместо интуитивно понятного гидростатического уравнения, предполагающего, что гравитация уравновешивается давлением газа солнечной атмосферы

$$\frac{dp}{dr} = -\rho \frac{GM_{\odot}}{r^2},$$

он использовал гидродинамическое уравнение

$$\rho v \frac{dv}{dr} + \frac{dp}{dr} = -\rho \frac{GM_{\odot}}{r^2},$$

допускающее, что такое статическое равновесие не устанавливается и начинается движение газа. Здесь ρ , v , p — плотность, скорость и давление плазмы, r — расстояние от центра Солнца, G — гравитационная постоянная, M_{\odot} — масса Солнца. Решения последнего уравнения в первом приближении удовлетворительно объясняют результаты наблюдений солнечного ветра на орбите Земли ($v = 400$ км/с, $\rho = 10$ см⁻³), но самое главное, что они позволяют скорости превысить скорость звука в среде. Это означает, что условия истечения плазмы в солнечной короне можно сравнить с условиями в реактивном двигателе — сопле Лавалья (рис.4.), и

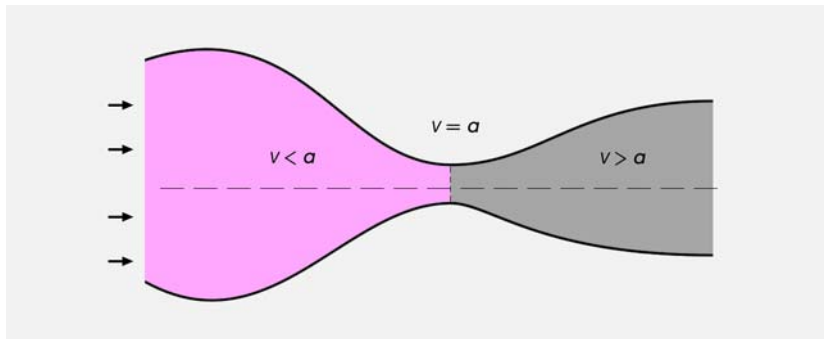


Рис.4. Схематическое изображение течения газа в сопле Лавалья; v — скорость газа, a — скорость звука.

плазма на высоте нескольких солнечных радиусов переходит от дозвукового к сверхзвуковому течению. Идея сопла Лавалья состоит в том, что дозвуковое течение газа ускоряется при сужении сечения сопла, а сверхзвуковое течение, наоборот, ускоряется при его расширении, т.е. идет непрерывное ускорение газа. Этот принцип лежит в основе работы всех ракетных двигателей. На Солнце роль меняющегося профиля канала течения газа выполняет гравитация. От характера течения зависит взаимодействие солнечного ветра с планетами: прежде чем вступить во взаимодействие с плазменными или газовыми оболочками планет, сверхзвуковой солнечный ветер должен затормозиться, создавая околопланетные ударные волны.

Несмотря на то, что модель Паркера качественно правильно описывала общее поведение параметров солнечного ветра, предсказанные ею значения наблюдались только в экстремально медленном и плотном солнечном ветре. Для получения реально наблюдаемых величин необходимо ввести в уравнения дополнительные источники энергии в области ускорения плазмы (т.е. необходимо отказаться от допущения об адиабатичности истечения плазмы). Механизмы, обеспечивающие нагрев солнечной короны и ускорение солнечного ветра, по всей видимости, имеют общую

природу, но в настоящее время точно неизвестны. Модель Паркера — чисто газодинамическая и не учитывает наличия магнитного поля и его влияния на динамику плазмы в солнечной короне. Источник нагрева солнечной короны связан с диссипацией магнитного поля, но из-за того, что проводимость горячей плазмы солнечной короны очень высока, обычный джоулев нагрев происходит очень медленно и в действие вступают более тонкие, кинетические эффекты, разыгрывающиеся на малых масштабах.

Сложные конвективные течения в фотосфере приводят к образованию иерархий многомасштабных магнитных структур. Магнитное поле при этом становится очень неоднородным, но его изменения на больших масштабах подобны тем, что возникают на масштабах, меньших в десятки и сотни раз. Это позволяет говорить о том, что такое поле может рассматриваться как самоподобная фрактальная структура. Подобная структура, которая формирует распределение магнитного поля в подножии силовых трубок, сморщенных в растекающийся солнечный ветер, естественно, влияет и на структуру магнитного поля в нем. В этом смысле можно сказать, что солнечный ветер обладает памятью. Конечно, нелинейные процессы, происходящие в солнечном ветре, приводят к изменению спектра

турбулентности, и в итоге эти два конкурирующих процесса (память о фотосферном источнике и нелинейная самоорганизация) определяют, как устроено магнитное поле солнечного ветра. На рис.5, слева, показано распределение магнитных силовых трубок вблизи поверхности Солнца. В этих расходящихся трубках, напоминающих сопло Лавала (рис.4), солнечный ветер ускоряется до сверхзвуковых скоростей. Современные теоретические расчеты [9] показывают, что при наблюдениях с борта космического аппарата должен регистрироваться степенной спектр флуктуаций магнитного поля $\sim \omega^{-\alpha}$ (ω — частота флуктуаций) с изломом. Именно такое поведение и демонстрируют многочисленные данные, полученные различными космическими аппаратами. На орбите Земли (1 а.е.) излом происходит на характерной частоте $\Omega_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ Гц (т.е. флуктуации обладают периодом 3–4 сут). При больших частотах $\alpha = 5/3$ (результат самоорганизации магнитных силовых трубок в кластеры более крупного размера), при меньших частотах — $3/2$ (следствие эффекта памяти о фотосферном распределении).

Интересно, что с удалением от Солнца (скажем, на орбите Юпитера — на расстоянии 5.2 а.е.) зона, где магнитное поле еще помнит о предыстории, пропадает, и уже весь степенной спектр имеет наклон $5/3$. Распределение магнитных полей в этой области схематически показано на рис.5, справа. Результаты наблюдений межпланетного магнитного поля на космических аппаратах «Voyager-1, -2» в точности согласуются с этим выводом.

Модель Паркера не только не учитывает влияния магнитного поля, но и имеет другое ограничение — носит однокомпонентный характер. В ней рассматривается движение только одной жидкости, в то время как плазма состоит из электронной и ионных составляющих; последние, помимо протонов, включают альфа-частицы (двукратно ионизованные атомы гелия — их около 4%) и более тяжелые ионы (их всех менее 1%), рис.6. Массовый состав солнечного ветра несет ценную информацию не только о параметрах Солнца, но и об образовании всей Солнечной системы из галактического протооблака 4.5 млрд лет назад. Ионизационный

состав (т.е. степень ионизации ионов различных химических элементов) позволяет оценить средние скорости (температуру) в нижней короне, где на узком интервале высот происходит переход от столкновительного режима течения плазмы к бесстолкновительному.

С самого начала космических исследований для изучения химического состава солнечного ветра использовались два метода: (1) экспонирование в солнечном ветре мишеней с последующим их возвратом на Землю и анализом в земных лабораториях и (2) анализ ионов солнечного ветра *in situ* на космическом аппарате в анализаторах, использующих электрические и магнитные поля. Поскольку возвращать образцы на Землю сложно и оперативно получать данные в ходе подобного полета нельзя, в последнее время предпочтение отдавалось второму методу. Первый же, когда использовался более 30 лет назад в США («Apollo-11 и -12») и СССР («Союз-4, -5, -9» и «Луна-16»), дал ценную информацию об изотопном составе и содержании некоторых инертных газов солнечного ветра. В недавнем эксперименте «Genesis»

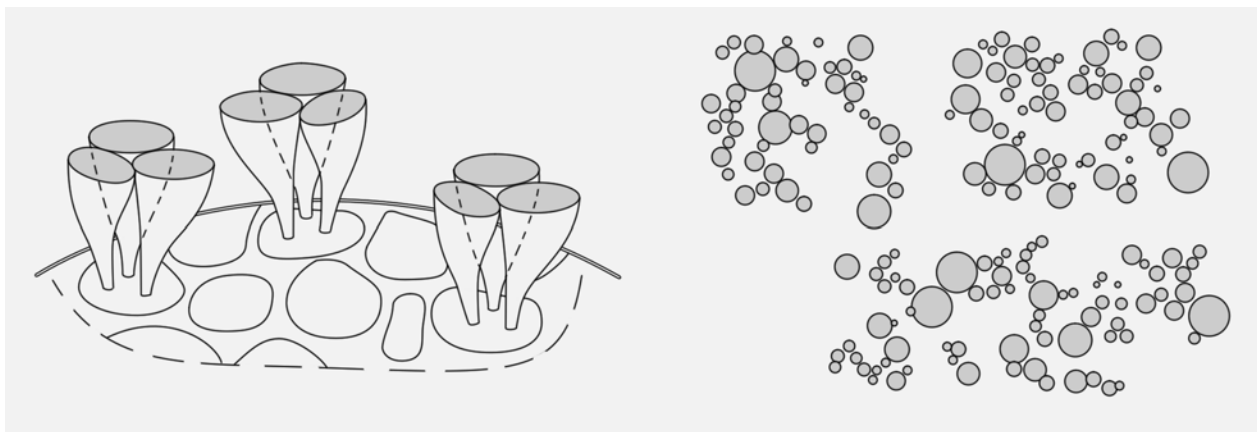


Рис.5. Схематическое изображение структуры магнитного поля: в атмосфере Солнца (слева) и на расстояниях в несколько а.е. от него (поперечное сечение самоподобной «мультифрактальной» структуры, справа). По мере удаления от Солнца межпланетное магнитное поле меняет структуру — за счет нелинейных процессов в солнечном ветре возрастает число мелкомасштабных структур, а вклад крупномасштабных магнитных силовых трубок фотосферного происхождения существенно уменьшается. При пролете подобной структуры мимо космического аппарата регистрируются флуктуации магнитного поля со степенными спектрами, описанными в тексте.

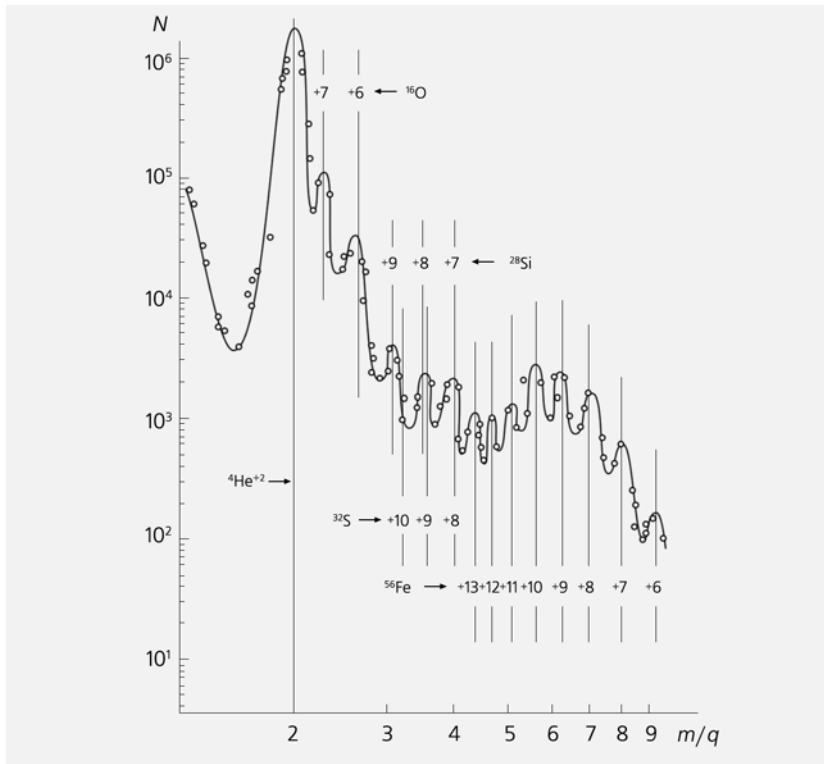


Рис.6. Массовый спектр ионов солнечного ветра, измеренный спутником «Прогноз-7» в 1978–1979 гг. По горизонтальной оси — отношение массы частицы к ее заряду, по вертикальной — число частиц, зарегистрированных в энергетическом «окне» прибора за 10 с. Цифры со знаком «+» обозначают заряд иона. Протонный пик (при $m/q = 1$) не показан, так как он более чем на порядок превышает пик альфа-частиц.

НАСА вернулось к нему и пыталось повторить эти эксперименты на технологически более высоком уровне. К сожалению, проект потерпел неудачу из-за того, что на фазе спуска у аппарата не раскрылся парашют, и капсула с образцами разбилась при ударе о землю. Тем не менее, как сообщают американские коллеги, некоторые ячейки не были полностью разрушены, и есть надежда, что научная информация будет частично сохранена.

По данным прямых измерений, химический состав солнечного ветра (рис.6) хорошо согласуется со средним составом солнечной атмосферы, полученным путем анализа солнечного электро-магнитного спектра, и составом метеоритов, который, как считается, близок к составу

межзвездного газа. Правда, химический состав солнечного ветра гораздо постояннее, чем состав вещества на Солнце, определенный астрономическими методами, и коррелируют только их средние значения. Разная степень изменчивости химического состава солнечной атмосферы и солнечного ветра до сих пор остается загадкой. Результаты регистрации состояния ионизации показывают, что по различным парам ионов температура короны составляет от 1 до 2 млн градусов, а поскольку по распределению плотности вещества в короне можно рассчитать высоту, где происходит «замораживание» ионизационного состояния данного иона, то удастся построить средний радиальный температурный градиент в короне на расстояниях

несколько солнечных радиусов. Одной из загадок остается тот факт, что время от времени наблюдаются заметные потоки однократно ионизованного гелия (на уровне нескольких процентов от потока альфа-частиц), которого для температуры 1 млн градусов должно быть в миллион раз меньше, чем двукратно ионизованного. Интервалы наблюдения однократно ионизованного гелия, как правило, совпадают с интервалами прихода к спутнику так называемых магнитных облаков (см. ниже), поэтому можно предположить, что во время выброса корональной массы, порождающего магнитное облако на расстоянии в 1 а.е., часть холодной (температура несколько тыс. градусов) фотосферной плазмы, экранированной от горячей плазмы короны сильным магнитным полем, пересекает горячую корону, не изменив своего ионизационного состояния.

Солнечный ветер и магнитные бури

Как мы уже отмечали выше, поступление энергии в магнитосферу и магнитные возмущения на Земле возможны только тогда, когда межпланетное магнитное поле содержит большую и длительную южную компоненту, появление которой обычно связано с определенным типом солнечного ветра (рис.7). Квазистационарный солнечный ветер (медленные потоки из корональных стримеров и быстрые потоки из корональных дыр) обычно не содержит длительных интервалов южной компоненты, так как поле в основном лежит в плоскости эклиптики. Однако иногда в солнечном ветре распространяются крупномасштабные возмущения, такие как межпланетные ударные волны, магнитные облака, области сжатия на границе разноскоростных течений и некоторые другие. Они различаются значениями ряда парамет-

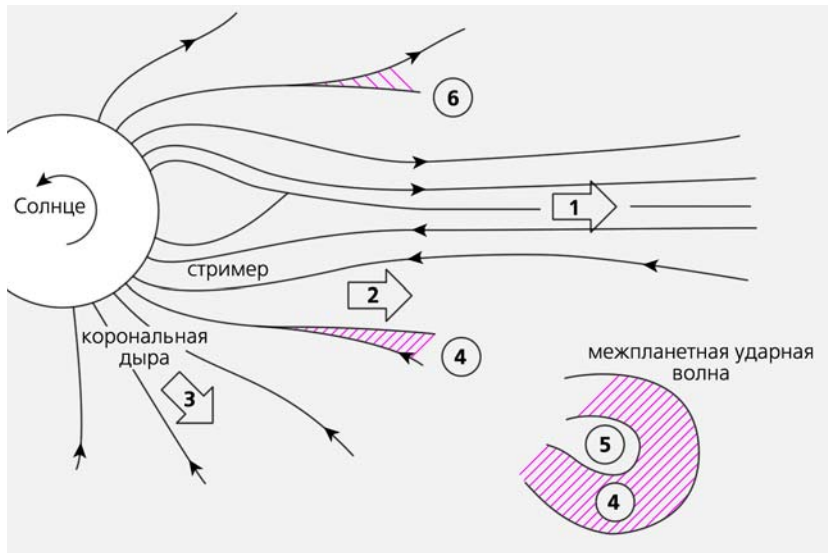


Рис.7. Схематическое изображение основных крупномасштабных типов течений солнечного ветра: гелиосферный токовый слой (1), медленный поток из корональных стримеров (2), быстрый поток из корональных дыр (3), область сжатия (4), выброс корональной массы (5) и область разрежения (6). Линиями со стрелками показаны силовые линии межпланетного магнитного поля.

ров (скорости, температуры, концентрации, соотношения теплового и магнитного давлений, содержания гелия и др.), но объединяет их присутствие заметной южной компоненты B_z . Это может привести к накачке

магнитосферы энергией и возбуждению магнитосферных возмущений. Как показывает статистический анализ (рис.8), наибольшее число магнитных бурь (около 2/3) порождается двумя типами солнечного ветра:

магнитными облаками и областями сжатия в области разноразностных потоков, причем если последние почти равновероятно возбуждают и сильные, и умеренные бури, то первые вызывают сильные бури в два раза чаще, чем умеренные. Хотя общая доля возбуждаемых обоими типами бурь практически не изменяется в 11-летнем цикле солнечной активности, доля бурь от каждого из этих типов имеет по два максимума за цикл, и они меняются в противофазе. Отметим, что в среднем за 25 лет (1976—2000) наблюдалось 25 бурь в год, причем в годы солнечного минимума магнитные бури могли отсутствовать несколько месяцев, а в годы вблизи максимума наблюдаться практически каждую неделю.

Одним из первых космических катаклизмов, наблюдаемых в солнечном ветре с помощью космических аппаратов, была серия вспышек и межпланетных возмущения в августе 1972 г. Тогда на спаде 20-го цикла солнечной активности (за нулевой принят цикл с максимумом в 1750 г.) за короткий период со 2 по 7 августа наблюдались четыре очень сильные солнечные

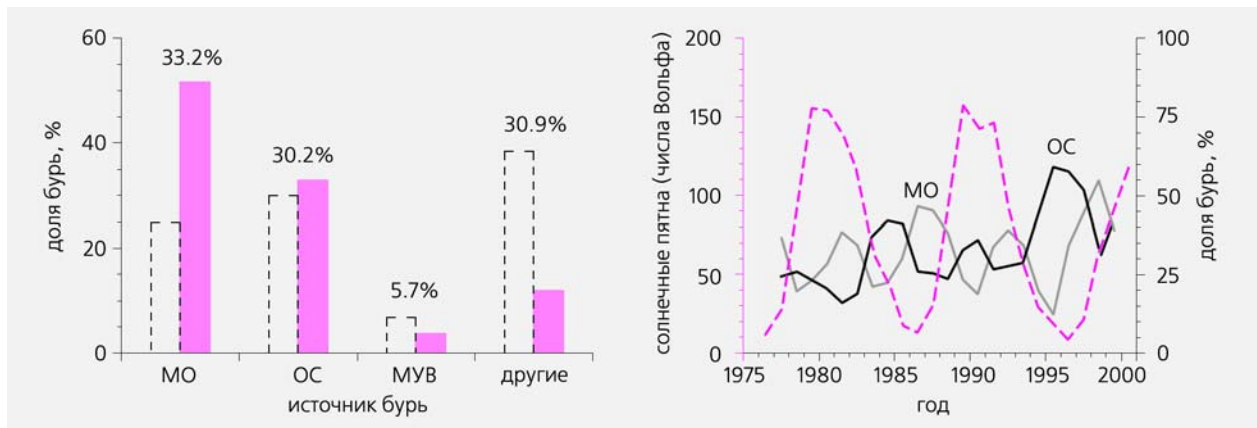


Рис.8. Доля магнитных бурь, вызываемых солнечным ветром различных типов за период 1976—2000 гг.: магнитными облаками (МО), областями сжатия в районе взаимодействия разноразностных течений (ОС), межпланетными ударными волнами (МУВ) и остальными (слева). Штриховые прямоугольники — для умеренных магнитных бурь ($-100 < Dst < -60$ нТ), цветные прямоугольники — для сильных магнитных бурь ($Dst < -100$ нТ); указаны суммарные цифры для всех магнитных бурь. Сглаженные кривые, показывающие изменение по годам доли магнитных бурь, возбуждаемых магнитными облаками (серая кривая) и областями сжатия в районе взаимодействия разноразностных потоков (справа). Штриховая линия показывает изменение числа солнечных пятен в цикле солнечной активности.

вспышки (оптического класса 2В и 3В; сигнал в рентгеновском диапазоне волн в то время не мог быть измерен, так как рентгеновских телескопов не было за пределами земной атмосферы), и к Земле пришли три сильные межпланетные ударные волны. Впервые наблюдалось такое сильно возмущенное событие, которое удалось достаточно подробно документировать, — благодаря тому, что на орбите были спутники «Прогноз-1 и -2», а также «NEOS-2» и «Pioneer-9». После первой вспышки пришла ударная волна, за которой скорость солнечного ветра составила около 2000 км/с (при средней скорости ветра 400 км/с), а концентрация около 30 см⁻³ (при среднем значении 8 см⁻³). Благодаря удачному расположению космических аппаратов были оценены форма ударной волны, а также поток энергии (100 эрг/см²·с), выброшенная масса (~10¹⁷ г) и энергия (~10³³ эрг). К счастью для Земли, эти сильные солнечные и межпланетные возмущения привели к серии хотя и серьезных, но не катастрофических магнитных бурь на Земле (величина *Dst*-

индекса достигала от -115 до -154 нТ). Заметим, что число магнитных бурь с *Dst* менее -100 нТ за 25 лет с 1976 по 2000 г. составило около 200, т.е. величина магнитных бурь в августе 1972 г. была вполне обычной при том, что условия на Солнце и в межпланетной среде были экстремальными.

Экстремальные условия на Солнце и в солнечном ветре также наблюдались на фазе спада текущего 23-го цикла солнечной активности в октябре—ноябре 2003 г. [10,11]. Как хорошо видно на рис.9, солнечная активность началась 19 октября с вспышки балла X1.1 в активной области (АО) 10484 в Северном полушарии. За 16 суток в ней и еще в двух активных областях (в Южном полушарии — АО 10486 и в Северном — АО 10488) осуществилось 16 больших вспышек, 11 из которых имели рентгеновский балл X, при этом основная вспышечная активность пришлось на самую большую по площади группу пятен АО 10486. После того, как АО 10486 ушла с видимой полусферы Солнца, вспышечная активность в течение почти

двух недель была сравнительно низкой. Когда данные активные области под номерами 10501 (на предыдущем обороте Солнца — 10484), 10507 (10488) и 10508 (10486) вернулись на видимую сторону Солнца, наиболее активной стала АО 10501, и почти все значительные вспышки были произведены ею, но все три АО стали меньше по площади, менее сложными и активными, чем в предыдущий раз. Надо отметить, что за все время наблюдений количество очень сильных бурь было довольно мало: с 1957 по начало 2003 г. произошло всего три магнитные бури с *Dst* < -400 нТ (11 февраля 1958 г. -426, 15 июля 1959 г. -429 и 13 марта 1989 г. -589 нТ). Поэтому две сильнейшие бури в октябре—ноябре 2003 г. (30 октября -401 и 20 ноября -472 нТ) существенно расширяют экспериментальный материал по таким экстремальным возмущениям магнитосферы Земли.

Анализ солнечных и геомагнитных данных типа представленных на рис.9 показывает очень низкую корреляцию между ними: большинство солнеч-

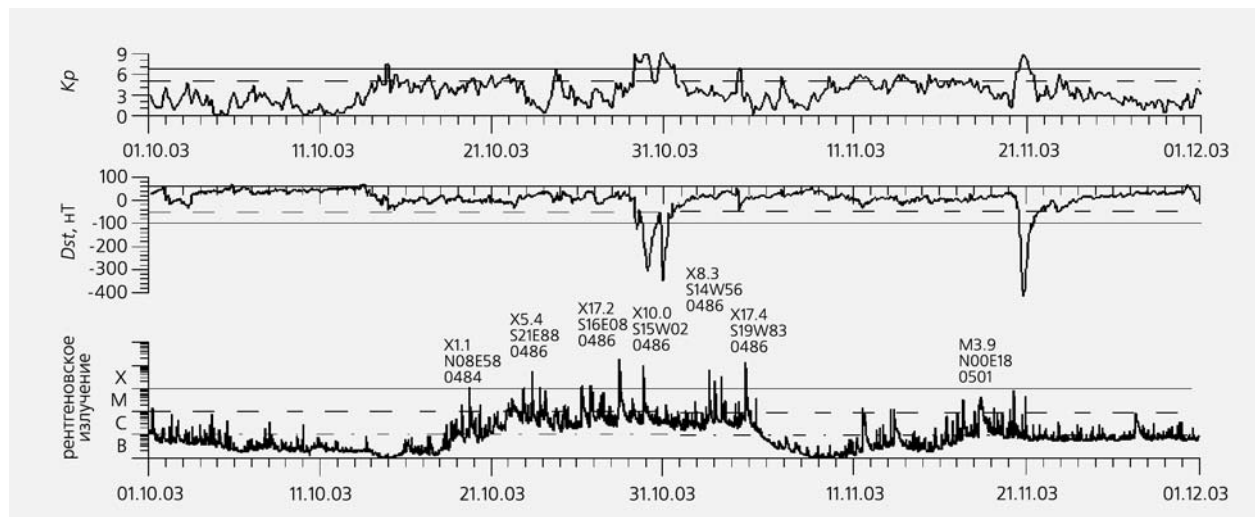


Рис.9. Результаты наземных измерений магнитного поля и наблюдений Солнца в октябре—ноябре 2003 г. *Kp*- и *Dst*-индексы (вверху и в середине; штриховые и сплошные линии указывают границы умеренных и сильных магнитных бурь). Рентгеновское излучение по измерениям спутника «GOES-12» (внизу; буквами и различными линиями показаны классы вспышек X, M, C, B). Для некоторых вспышек показаны рентгеновский класс вспышки, положение (S — Южное, N — Северное, E — Восточное, W — Западное полушарие, градусы) и номер активной области по классификации NOAA.

ных вспышек к появлению магнитных бурь не приводит, хотя практически после каждой вспышки СМИ начинают наперегонки давать прогнозы о неизбежной через пару дней буре. Возникает естественный вопрос — почему низка эта корреляция? Как отмечалось выше, для возбуждения прогнозируемой магнитной бури необходимо выполнение нескольких условий: прежде всего, должен возникнуть детектируемый источник на Солнце (реально мы можем заметить только появление корональных дыр и выброса корональной массы); из этого источника должно образоваться магнитное облако или область сжатия в солнечном ветре; они должны содержать длительную и большую компоненту южного магнитного поля; наконец, они должны иметь такую траекторию, чтобы оказаться вблизи магнитосферы Земли и вступить во взаимодействие с ней.

Каждое из этих условий носит вероятностный характер. Полная вероятность правильно предсказать магнитную бурю после замеченной вспышки получается как произведение трех вероятностей и поэтому оказывается достаточно малой. Составление солнечных явлений с возникновением магнитных бурь (см. рис.10, составленный по большому количеству опубликованных работ [8]) показывает, что такой двухсуточный прогноз на основе наблюдений выбросов корональной массы имеет эффективность около 30–40%, т.е. только три-четыре предсказания из 10 реализуются в действительности, а шесть-семь оказываются ложными. Все опубликованные данные о высокой корреляции были получены для обратной «трассировки» событий от Земли к Солнцу, т.е. в попытках найти на беспокойном Солнце причины для достаточно редких магнитных бурь. Складывается парадоксальная ситуация, при которой современная наука

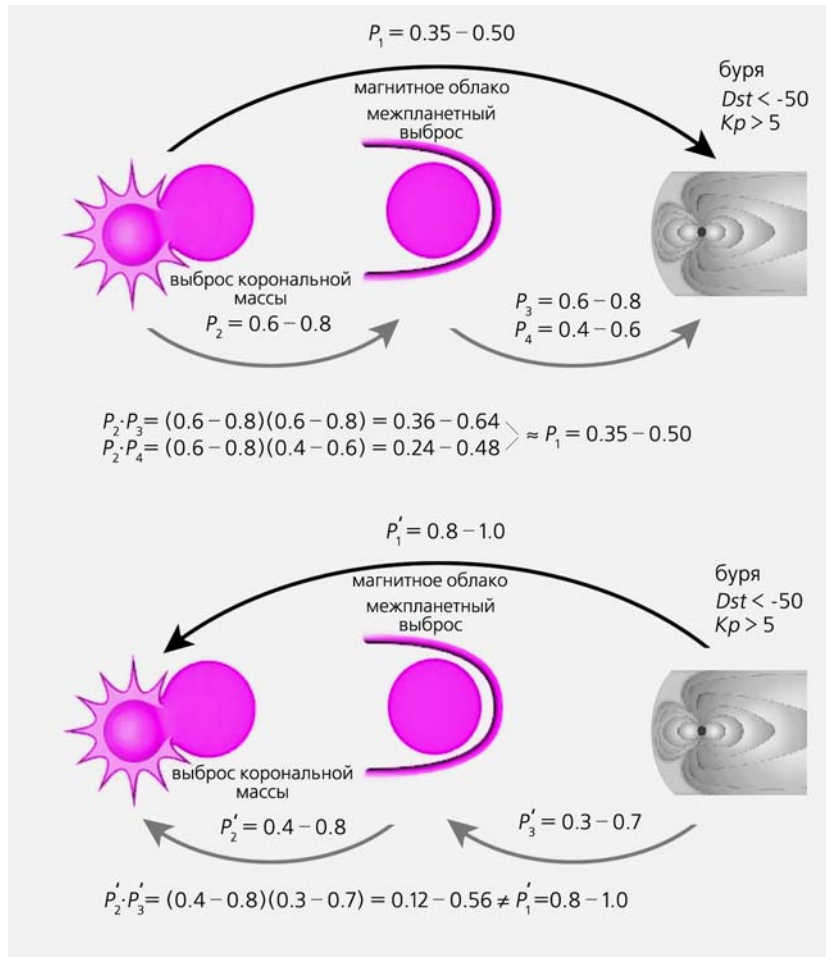


Рис.10. Обобщение опубликованных работ по корреляции выбросов корональной массы, магнитных облаков и геомагнитных бурь для одношаговой (верхняя стрелка) и двухшаговой (нижние стрелки) и для прямой (вверху, стрелки справа налево) и обратной (внизу, стрелки слева направо) трассировок данных. Над стрелками приведены вероятности событий. Для случая прямой последовательности событий: P_1 — вероятность того, что за выбросом корональной массы последует магнитная буря, P_2 — что этот выброс породит магнитное облако или межпланетный выброс, P_3 (P_4) — что магнитное облако (межпланетный выброс) приведет к магнитной буре. Когда события рассматриваются в обратном порядке (ищутся их источники): P'_1 — вероятность того, что магнитной буре удастся сопоставить произошедший ранее корональный выброс, P'_3 — что перед бурей наблюдалось магнитное облако или межпланетный выброс, P'_2 — что этим явлениям предшествовал корональный выброс.

в ретроспективном плане может успешно объяснить происхождение почти всех сильных геомагнитных возмущений, но не может с достаточной степенью достоверности предсказать их возникновение на основе наблюдений Солнца. Чтобы повысить надежность прогноза, тре-

буется дальнейший анализ солнечных данных и выявление подходящих для прогнозирования характеристик.

В отличие от прогноза на основе наблюдений Солнца, измерения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в окрестности Земли

с помощью космических аппаратов позволяют с высокой степенью точности рассчитать количество энергии, поступившей в магнитосферу, и ее реакцию на внешние условия, и такой прогноз достигает 99-процентной надежности [5–7]. Проблема заключается в том, что даже при разнице в скорости распространения в 1000 раз между солнечным ветром и радиосигналом, передающим данные на Землю, из-за близости спутника к Земле мы получаем информацию недостаточно заблаговременно. В последнее десятилетие космические аппараты «WIND», «SOHO» и «ACE» работают в так называемой точке либрации (лагранжева точка L1), расположенной в 1.5 млн км от Земли на линии Солнце—Земля (рис.11). В этой точке силы притяжения Солнца и Земли уравновешивают друг друга, и хотя равновесие

неустойчиво, аппараты могут долго находиться в ее окрестности при сравнительно небольшом расходе топлива на коррекцию орбиты. Нетрудно вычислить, что при средней скорости солнечного ветра 400 км/с он достигнет Земли из точки L1 приблизительно за 1 ч, а возмущенные потоки — еще быстрее. Этого времени явно недостаточно, чтобы успеть принять какие-нибудь меры после поступления сигнала, поэтому такой сигнал может быть использован только как сигнал тревоги к реализации заранее подготовленных мер. Тем не менее ситуацию можно заметно улучшить, если разместить космический аппарат ближе к Солнцу, чтобы иметь большую величину задержки. На первый взгляд, такое желание входит в противоречие с законами небесной механики, так как аппа-

рат трудно будет удержать на месте, однако в ИКИ был разработан космический проект, в котором эта трудность преодолевается с помощью солнечного паруса. Давление фотонов солнечного света на парус частично компенсирует силу притяжения Солнца, и космический аппарат попадает как бы в либрационную точку для Солнца с меньшей силой тяготения. Расчеты показывают, что при размере паруса приблизительно 30×30 м космический аппарат весом 30 кг может быть удален от Земли до расстояния 3 млн км. В этом случае прогноз мы получим за в два раза больший промежуток времени при достаточно высокой его точности и надежности (не хуже 90%). Таким образом, предложенный проект может существенно улучшить оперативность и качество прогноза космической погоды.

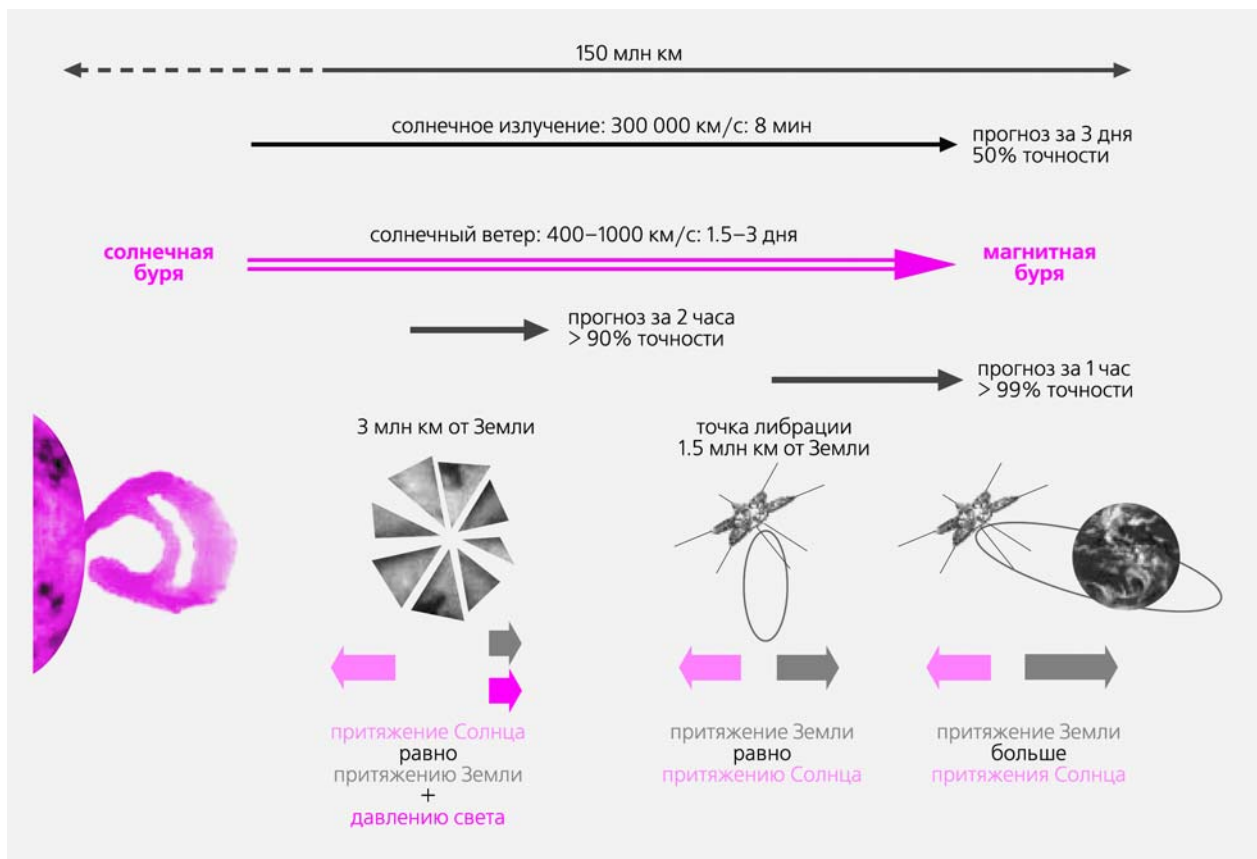


Рис.11. Схема построения прогноза геомагнитной активности на космическом аппарате в либрационной точке и на космическом аппарате с солнечным парусом.

* * *

Итак, геомагнитные возмущения — достаточно распространенные и обыденные явления на Земле. Мы не останавливались здесь на вопросах их влияния на биологические объекты и человека*, отметим только, что в процессе эволюции все живое нау-

* Об этом см. [4], а также статью Т.К.Бреус и С.И.Рапопорта в данном номере.

чилось адаптироваться к изменениям параметров окружающей среды, и на фоне вариаций атмосферного давления и температуры магнитное поле — не самый значащий фактор, влияющий на самочувствие людей. Поэтому геомагнитные бури практически безобидны для подавляющего большинства и могут негативно сказаться исключительно на больных и ослабленных людях. Однако ориентироваться

в этом вопросе следует не на сообщения СМИ, а на рекомендации специалистов и врачей, которые могут оценить реальные угрозы, следующие из прогнозов космической погоды. Что же касается ее влияния на мир техники, оно достаточно хорошо известно, и современная наука учится более точно и своевременно предсказывать опасность и разрабатывает меры, уменьшающие негативные последствия. ■

Литература

1. *Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь. М., 1973.
2. *Хундхаузен А.* Расширение короны и солнечный ветер. М., 1976.
3. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. М., 1986.
4. *Бреус Т.К., Рапопорт С.И.*, Магнитные бури: Медико-биологические и геофизические аспекты. М., 2003.
5. *Акасофу С.И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика: В 2-х т. М., 1975.
6. *Пудовкин М.И., Семенов В.С.* Теория пересоединения и взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли. М., 1985.
7. *Петрукович А.А., Климов С.И.* // Космические исследования. 2000. Т. 38. № 5. С.463—469.
8. *Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю.* // Космические исследования. 2003. №6. С. 573—584.
9. *Зеленый Л.М., Милованов А.В.* // Успехи физических наук. 2004. №8. С.809—852.
10. *Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др.* // Космические исследования. 2004. №5. С.453—508.
11. *Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. №1. С.23—50.