

УДК 533.9; 533.951

## ВАЖНЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ГЕЛИОГЕОФИЗИКЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА

Е.А. Пономарев, А.С. Леонович

### THE PRINCIPAL ACHIEVEMENTS IN HELIOGEOPHYSICS IN THE SECOND HALF OF XX CENTURY

E.A. Ponomarev, A.S. Leonovich

Возникновение гелиогеофизики как самостоятельной отрасли науки было обусловлено началом интенсивных исследований ближнего космоса с помощью космических аппаратов – в 60-х г. XX в. В докладе кратко излагаются современные взгляды на строение Солнца, в особенности его внешних оболочек, в частности короны. Излагается история развития представлений о формировании солнечного ветра – главного, наряду с рентгеновским и ультрафиолетовым излучением Солнца, агента воздействия на магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли. Хотя связь физических процессов на Солнце и в околоземном космическом пространстве угадывалась достаточно давно, именно благодаря прямым измерениям параметров околоземной среды на спутниках и межпланетных станциях исследование солнечно-земных связей удалось поставить на прочный фундамент количественных измерений. С появлением космических аппаратов удалось наладить регулярные наблюдения полей и плазмы в околоземном космическом пространстве (ОКП), исследовать связь возмущений, распространяющихся в межпланетной среде, с возмущениями на Солнце и в ОКП. Была открыта полость в солнечном ветре, отделенная от межпланетного пространства головной ударной волной. За ударной волной расположено течение термализованного солнечного ветра и обтекаемая этим течением кометообразная полость – магнитосфера Земли, оказавшаяся сложно устроенным образованием, состояние которого контролируется параметрами солнечного ветра. В докладе кратко излагается система взглядов на основные физические процессы, протекающие в магнитосфере, в частности – на происхождение и физическую сущность геомагнитных бурь и суббурь.

Formation of helio-geophysics as self-dependent branch of science has been caused by the beginning of intensive explorations of near-Earth space by spacecrafts - in 60th years of XX century. The up-to-date view about structure of the Sun, especially about its outer shells, solar corona particularly, are briefly viewed in the review. The history of development of notions about arising the solar wind - the main, alongside with X-ray and a ultra-violet radiation of the Sun, agent of action on the magnetosphere, ionosphere and the Earth's atmosphere is viewed. Though a connections of physical processes on the Sun and in the near-Earth space was surmised for rather long time, just owing to direct measurements of parameters of near-Earth medium on the satellites and interplanetary spacecrafts the solar-terrestrial relations became possible to be based on a strong foundation of the quantitative measurements. With the appearing of spacecrafts the regular observations of electromagnetic fields and plasma in a near-Earth space, the relation of perturbations spreading in the interplanetary medium with perturbations on the Sun and in the near-Earth space became possible to be studied. The cavity in the solar wind, separated from an interplanetary space by the Bow shock has been discovered. Flux of the thermalized solar wind and comet-like cavity- the Earth's magnetosphere, flowing around by this flux, which was found complicatedly structured formation, condition of which is controlled by the solar wind parameters are situated behind the Bow shock. The system of views on the basic physical processes which take place in the magnetosphere, in particular - about nature and physical substance of geomagnetic storms and substorms are briefly viewed.

Исследование межпланетного пространства реактивными приборами» - так называлась книжка К.Э. Циолковского, вышедшая в свет в середине тридцатых годов 20 века [1]. Однако реальные исследования околоземного космического пространства космическими аппаратами начались лишь в 60 г. прошлого века и сразу приобрели характер жесткого соревнования между СССР и США. Эта ситуация почти повторяла другую – четырехвековой давности, когда две передовые по тому времени морские державы Испания и Португалия вступили в непримиримую конкуренцию за преобладание на океанских просторах. Такая историческая параллель не случайна. В обоих случаях приоритет в освоении новой среды сулил крупные экономические и политические преимущества [2].

Для обеспечения деятельности на просторах мирового океана нужны были новые знания. И они появились в виде новых наук – мореходной астрономии, метеорологии и гидродинамики, подтолкнув также развитие географии. Другими словами – великие географические открытия явились катализатором интеллектуальной активности человечества на целый исторический период. Нечто похожее мы переживаем и сейчас, в эпоху освоения последней природной среды, еще не вовлеченной человеком в

военно-хозяйственный оборот. В этом и состоит косвенный ответ на вопрос «зачем нам нужен космос?». Долговременное и бесперебойное функционирование сложных технических систем в жестких условиях космического пространства невозможно без квалифицированного научного сопровождения. Именно это обстоятельство вызвало к жизни новую науку «солнечно-земную физику» [3, 4]. Ниже мы в краткой и, по возможности, наглядной форме рассмотрим наиболее значительные достижения в этой новой области знания.

Начнем с Солнца – практически единственного поставщика энергии для всех процессов в солнечной системе. Солнце – гигантский (радиусом около 700 000 км) плазменный шар, имеющий достаточно сложную структуру [4–6] (рис. 1). Во внутренних областях Солнца, в ядре, расположена зона реакций ядерного синтеза, протекающих предположительно по гелиевому (протон-протонному) циклу. Энергия, выделяемая в ядре, передается к поверхности Солнца путем диффузии энергичных частиц и электромагнитного излучения. На глубине около 0.2R (где R – радиус Солнца) в перенос энергии включается тепловая конвекция, которая выше становится главным механизмом этого переноса.

Различные слои Солнца вращаются с разной уг-

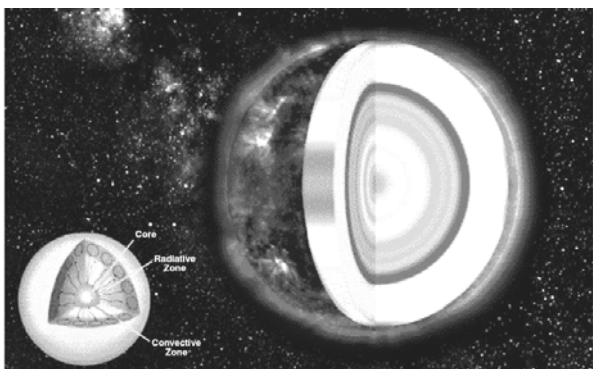


Рис. 1. Структура внутренних слоев Солнца.

ловой скоростью. С разной скоростью происходит вращение и в различных широтных зонах каждого слоя. Конвекция сложным образом взаимодействует с этим дифференциальным вращением, порождая сложную картину магнитных полей вблизи солнечной поверхности (см. рис. 2). Именно в конвективной зоне формируются периодические процессы, воспринимаемые нами как солнечная активность. Значительный вклад в прояснение этого сложного вопроса принадлежит группе иркутских теоретиков, руководимой Л.Л. Кичатиновым [7].

На внешней границе конвективной области параметры солнечной плазмы резко меняются и образуется видимая граница солнечного шара – фотосфера. Солнечная плазма обладает высокой проводимостью. Из-за температурной неоднородности возникает термоЭДС и электрические токи. Магнитное поле этих токов может многократно усиливаться из-за того, что магнитные силовые линии «вморожены» в хорошо проводящую плазму, «запутываются» конвективным движением (рис. 3). Так на поверхности Солнца появляются вторичные магнитные поля большой напряженности.

Они накладываются на общее магнитное поле Солнца [8], которое генерируется в более глубоких слоях. Механизм его генерации еще плохо изучен. Из-за конечной проводимости электрические токи интенсивно затухают, постоянно переводя часть магнитной энергии в тепло. Поэтому плотность магнитной энергии в общем меньше кинетической.

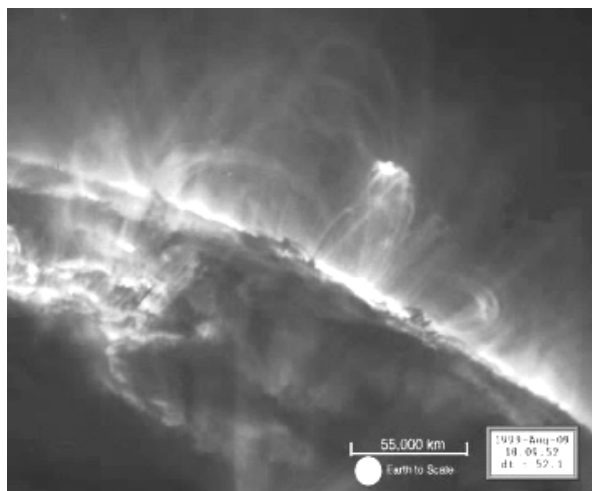


Рис. 2. Силовые линии магнитных полей на поверхности Солнца.

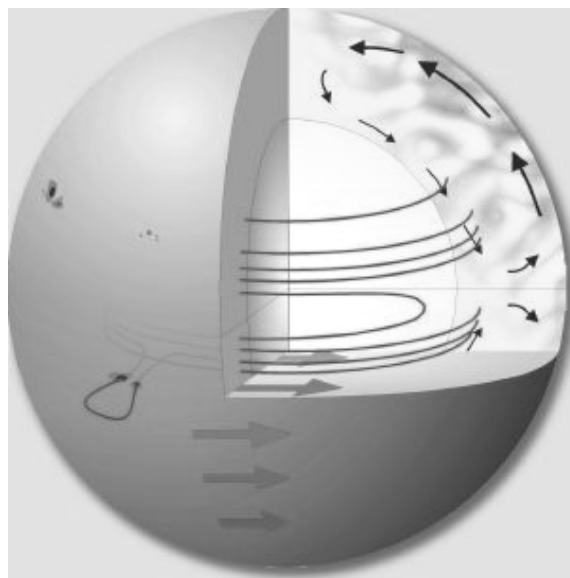


Рис. 3. Динамо-механизм генерации тороидального поля Солнца за счет дифференциального вращения.

В фотосфере плазма имеет температуру около  $6000^{\circ}$ , поэтому она лишь частично ионизована. На поверхности фотосферы кинетическая температура имеет минимум. Выше фотосферы расположена хромосфера, где температура опять растет с высотой. Далее она нарастает стремительно, и хромосфера на высоте 12–14 тыс. км переходит в солнечную корону [9] (см. рис. 4).

Во внутренней короне температура достигает максимума в несколько миллионов градусов и далее плавно падает. При такой температуре водород полностью ионизован, а другие элементы находятся в высоких стадиях ионизации. Например, железо наблюдается в девяти ( $FeX$ ) и тринадцатикратно ( $FeXIV$ ) ионизованном виде. Корона является мощным источником жесткого (ультрафиолетовое и рентгеновское) излучения. Часть его генерируется излучением высокоионизованных атомов, часть – при свободно-свободных переходах, когда электроны (с энергией сотни электронвольт) пролетают на

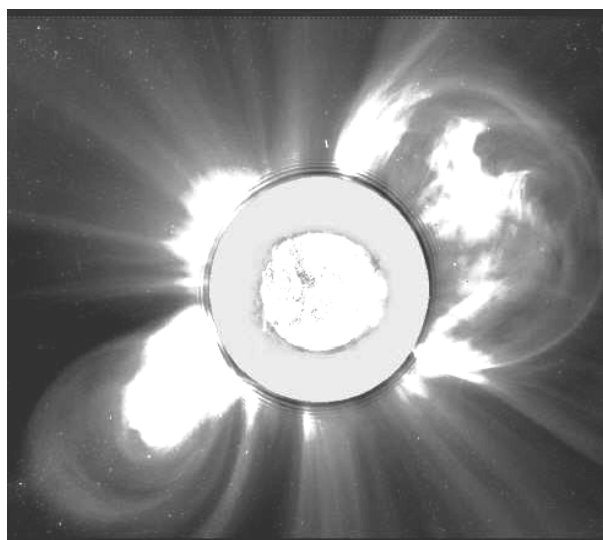


Рис. 4. Внешние слои Солнца – хромосфера и солнечная корона.

малых расстояниях от иона. Если же столкновительное взаимодействие электрона и иона происходит на больших расстояниях, то излучается «мягкий» квант – в радиодиапазоне. Радиоизлучение короны было открыто случайно во время второй мировой войны с помощью радиолокаторов, что положило начало новой ветви исследований – радиоастрономии.

В силу большой высоты однородной атмосферы, корона является протяженным образованием. Она интенсивно теряет энергию на излучение и не может существовать без мощных внутренних источников энергии. Легко показать (как это было сделано в 1955 г. Е.А. Пономаревым [10]), что корона будет находиться в состоянии гидродинамического равновесия только при специальном распределении этих источников. Во всех других случаях через систему должен существовать поток вещества и энергии. Этот процесс служит физическим основанием для важного явления – солнечного ветра (СВ). Величину потока вещества можно оценить из следующих соображений. Если бы корона находилась в гидростатическом равновесии, то высоты однородной атмосферы для водорода и железа относились бы как 56/1, т. е. ионов железа в дальней короне наблюдаться не должно. Но это не так. Железо светится во всей короне, причем FeXIV наблюдается в более высоких слоях, чем FeX, хотя кинетическая температура там ниже. Силой, поддерживающей ионы во «взвешенном» состоянии, может быть импульс, передаваемый при столкновениях восходящим потоком протонов ионам железа. Из условия баланса этих сил легко найти поток протонов. Он оказался таким же, какой следовал из гидродинамической теории, подтвержденной впоследствии прямыми измерениями. Для 1955 г. это было значительным достижением, но в «динамическую корону» никто тогда не поверил. Чуть позже, американец Е. Паркер [11, 12] развил теорию радиального течения газа в гравитационном поле с заданным граничным условием в короне (величиной потока) и требованием присутствия течения на бесконечности. Уравнение состояния газа задавалось двумя политропами. Паркер показал, что при этих условиях на орбите Земли поток будет сверхзвуковым течением, каковым и является солнечный ветер.

Еще в 19 в. астрономы, исследовавшие кометы, предполагали существование солнечного ветра. Хвосты комет были правильно ими истолкованы как результат воздействия отталкивающей силы на выброшенное из головы кометы вещество. Солнечный ветер несет с собой магнитное поле, которое представляет собой в основном общее магнитное поле Солнца или поле локальных образований, «выдуваемое» солнечным ветром с солнечной поверхности (см. рис. 5).

Рассмотрим нестационарные процессы на поверхности Солнца. К ним относятся солнечные вспышки и корональные выбросы массы (КВМ) [13–16] (рис. 6). Солнечные вспышки представляют собой кратковременное, часто взрывообразное увеличение светимости небольшой области солнечной поверхности со сложной конфигурацией магнитного поля. После вспышки топология магнитного поля

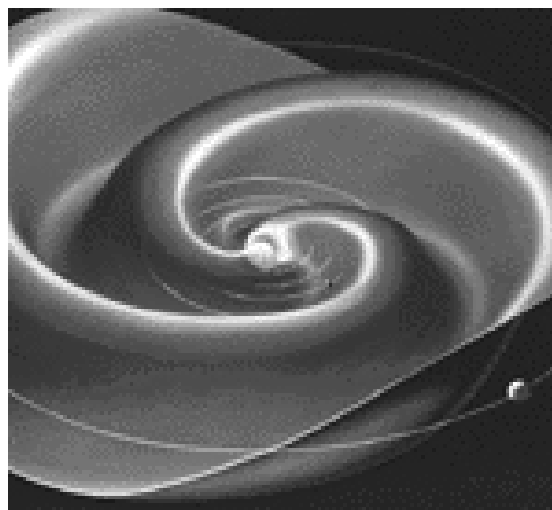


Рис. 5. Межпланетное магнитное поле, переносимое солнечным ветром.

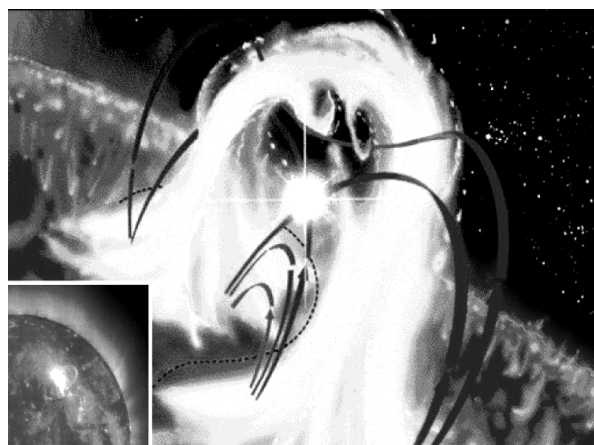


Рис. 6. Выброс плазменного волокна с поверхности Солнца (КВМ), сопровождаемый магнитным пересоединением и вспышкой солнечного излучения.

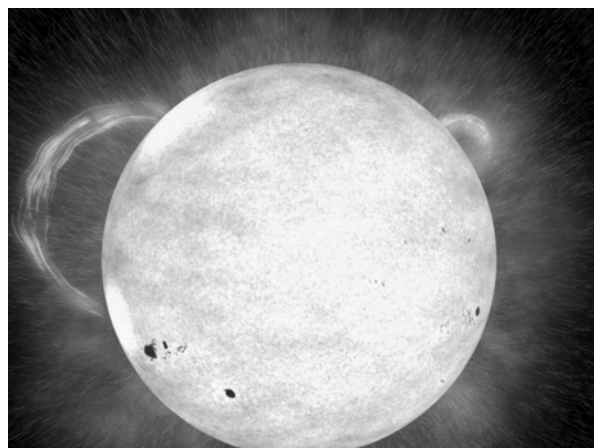


Рис. 7. Активные области на поверхности Солнца, сохраняющиеся в течение нескольких оборотов.

резко упрощается. Хотя сам процесс интенсивного энерговыделения происходит в сравнительно небольшом объеме, вспышка, по-видимому, явление не локальное. Примером таких явлений могут служить процессы торошения льда или сейсмические процессы на границе тектонических плит. КВМ-процессы открыты лишь недавно и еще не достаточно изучены. Это может быть или тепловой

«взрыв», или внезапное увеличение амперовой силы, что в обоих случаях предполагает быстрое увеличение электрического тока в большом объеме. Похожая проблема существует и в физике магнитосферы.

Временной масштаб вспышечных и КВМ-процессов – минуты или часы, в то время как большинство нестационарных явлений на Солнце имеют большую длительность. Фундаментальными временными масштабами здесь являются период собственных (механических) колебаний Солнца – 160 минут [17–19] и 22-летний период реперолюсовки его магнитного поля (11-летний цикл пятнообразовательной деятельности). Характерные времена других нестационарных процессов заключены между ними. Наиболее интересным является существование площадок длительной активности. Это участки солнечной поверхности, на которых в течение нескольких оборотов Солнца сохраняется повышенная активность (см. рис. 7). Большой вклад в исследование этих процессов внес В.Г. Банин [20].

Перечисленные выше инновации концептуального характера не могли быть достигнуты без привлечения принципиально новых исследовательских методик. К ним, прежде всего, относится методика измерения магнитных полей на основе эффекта Зеемана – расщепления магниточувствительных спектральных линий во внешних магнитных полях. Большой вклад в область солнечной магнитометрии сделан исследователями из ИСЗФ: В.Е. Степановым, В.М. Григорьевым, В.И. Скоморовским [21–22]. Особые перспективы открылись после выноса регистрирующей аппаратуры за пределы атмосферы. Это позволило получать качественные снимки короны и Солнца в УФ-и рентгеновских лучах (см. рис. 8). Именно тогда удалось обнаружить новое явление – корональный выброс массы. Новые методы обработки информации позволили сконструировать сверхзкополосные когерентные фильтры и открыть дорогу сейсмическим методам в гелиофизику. От гелиосейсмологии можно ожидать впечатляющих результатов уже в ближайшее время [23, 24] (рис. 9).

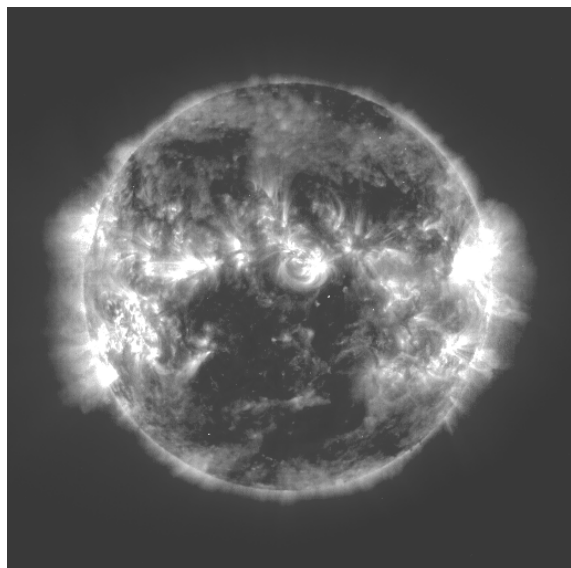


Рис. 8. Изображение солнечной поверхности в ультрафиолетовых лучах.

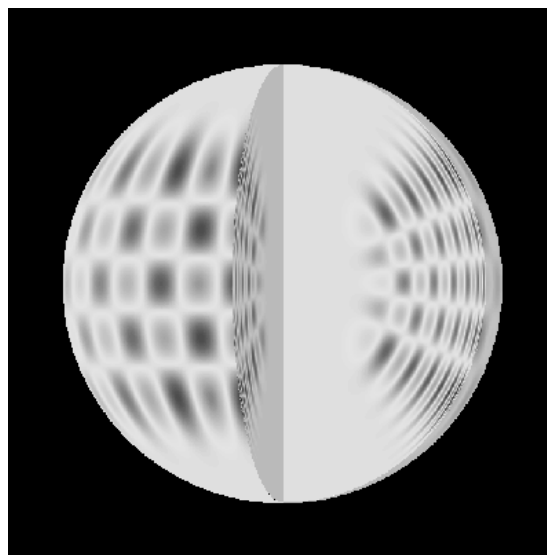


Рис. 9. Схематическое изображение одной из собственных мод объемных (гелиосейсмических) колебаний Солнца.

Вернемся к солнечному ветру. Существование радиальной компоненты магнитного поля в солнечном ветре приводит к тому, что из-за сил инерции плазмы солнечного ветра радиальные силовые линии свертываются в спираль Архимеда (см. рис. 5). Чем больше скорость солнечного ветра, тем больше шаг спирали и тем меньше отношение компонент  $B_y/B_x$ . Что касается  $B_z$ -компоненты, нормальной к плоскости эклиптики, то она более или менее случайно флуктуирует вблизи нулевого среднего значения. Среднее значение  $B_z^2$  зависит от магнитного числа Маха солнечного ветра.

При взаимодействии СВ с планетами возникает головная ударная волна (ГУВ), внутри которой образуется полость с деформированным магнитным полем – магнитосфера [25] (рис. 10), к описанию которой мы и перейдем.

Налетая на препятствие в виде магнитного поля Земли, солнечный ветер образует ГУВ, на которой скачком радикально меняются параметры течения. Течение полностью термализуется, и температура за

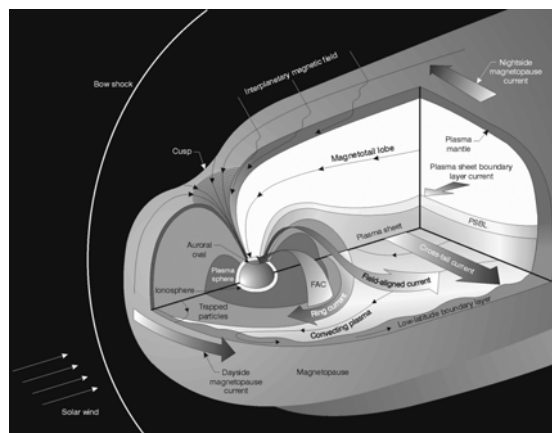


Рис. 10. Образование магнитосферы Земли. Собственное дипольное геомагнитное поле деформируется потоком солнечного ветра, вытягиваясь в геомагнитный хвост. Перед лобовой границей магнитосферы образуется отходящая головная ударная волна (ГУВ).

фронтом в «лобовой точке» повышается на порядок, а плотность увеличивается в 4 раза. Нормальная компонента магнитного поля  $B_n$  при пересечении фронта не меняется, тангенциальная же  $B_t$  увеличивается примерно в 4 раза. Фронт ГУВ представляет собой токовый слой, направление тока в котором зависит от знака  $B_t$ . Поскольку магнитное поле солнечного ветра движется относительно фронта ГУВ, то в системе координат фронта возникает электрическое поле, направленное также вдоль фронта, т. е. за фронтом появляется электрическая мощность, пропорциональная  $B_t^2$  и не зависящая от знака поля. Иначе говоря, фронт ГУВ выступает как трансформатор кинетической энергии СВ в газокинетическую и электромагнитную. Вопрос состоит в том, как электромагнитная энергия втекающая в магнитосферу, реализуется в ходе магнитосферных процессов.

Следует сказать несколько слов о состоянии магнитосферных исследований. Практика эксплуатации технических устройств в околоземном космическом пространстве и наземных радиотехнических средств требует знания, какие процессы, когда и где будут протекать в магнитосфере или ионосфере Земли. Оказалось, что обеспечить получение такой информации можно с помощью эмпирических моделей, построенных по принципу черного ящика. При достаточно репрезентативной обучающей выборке и правильно заложенных причинно-следственных связях такие модели дают вполне приемлемые результаты. Одним из основателей этого направления является профессор В.М. Мишин [26]. Работы В.М. Мишина и возглавляемой им группы положили начало новой методике исследования магнитосферных процессов, называемой техникой инверсии магнитограмм (ТИМ), которая позволяет вычислять эквивалентные токи, протекающие в ионосфере, на основе данных сети магнитных станций и параметров солнечного ветра (см. рис. 11).

Вернемся к описанию магнитосферы и магнитосферных процессов, следуя работе [27]. На рис.10 показан общий вид магнитосферы Земли. За фронтом ГУВ находится область течения термализованной плазмы – так называемый переходный слой. Далее идет магнитопауза – ламинарный токовый слой, отделяющий собственно магнитосферу от переходного слоя. Магнитное поле магнитосферы представляет собой суперпозицию дипольного поля, поля поверхностных токов и поля объемных токов, сформированных соответствующим распределением газового давления. Внутренняя часть магнитосферы, вращающаяся вместе с Землей, называется плазмосферой и отличается повышенной плотностью ( $10-100 \text{ см}^{-3}$ ) и пониженной температурой плазмы (300–30 эВ). Внешняя магнитосфера неподвижна в солнечной системе координат, имеет плотность около  $1 \text{ см}^{-3}$  и температуру порядка 5 кэВ. На самом деле эти числа сильно варьируют от места к месту и во времени.

Магнитопауза имеет потенциал, пропорциональный потенциалу ГУВ. Таким образом, магнитосферная плазма находится в электрическом поле, направлен-

ном поперек оси магнитосферы, что приводит к появлению электрического дрейфа в направлении полдень–полночь. Помимо этого поля в магнитосфере есть еще электрическое поле конвекции, обращенное в нуль на магнитопаузе и не зависящее явно от параметров солнечного ветра. Наконец, к этим полям добавляется поле коротации, появляющееся в ионосфере из-за ее движения в неподвижном относительно Солнца магнитном поле внешней магнитосферы и попадающее в нее из-за эквипотенциальности силовых линий. В скрещенных электрическом и магнитном полях плазма совершает сложные движения. Картина упрощается, если рассматривать движение плазменных трубок – плазму, заключенной в объем магнитных силовых трубок, образованных магнитными силовыми линиями. Если магнитные силовые линии эквипотенциальны, плазма переходит из одной силовой трубки в другую в неизменном количестве. Двигаясь в направлении к Земле в поле со все меньшим объемом силовых трубок, плазменные трубки сжимаются и газовое давление в них повышается. Рост давления ограничивает другой процесс. Концы трубок погружены в атмосферу, поэтому заряженные частицы с малыми питч-углами (углом между вектором скорости частицы и магнитным полем) достигают атмосферы и поглощаются там из-за столкновений и перезарядки. Таким образом, в некотором диапазоне питч-углов частицы исчезают в течение одного баунс-периода (времени их пробега между ионосферами вдоль магнитной силовой линии), образуя в пространстве скоростей почти пустой, не заполненный частицами конус (конус потерь). Однако из-за существования питч-угловой диффузии конус потерь все-таки не пуст. Если время его заполнения меньше баунс-периода, говорят о сильной питч-угловой диффузии. Относительная величина конуса потерь быстро растет при приближении к Земле. Поэтому газовое давление в плазменной трубке, дрейфующей к Земле, сначала растет, а потом быстро падает по закону:

$$p = p_0(L_\infty/L)^{20/3} \exp[-5/3 R_0 \int dL/V_R \tau],$$

где  $L=R/R_0$  – параметр Мак-Илвейна ( $R$ – экваториальный радиус силовой линии,  $R_0$  – радиус Земли),  $L_\infty$  - значение параметра  $L$  на границе задания течения,  $V_R$  – радиальная компонента скорости конвекции,  $\tau$  – время опустошения трубки.

Совокупность дрейфующих трубок создает рельеф газового давления (см. рис. 12). Поскольку градиент давления плазмы пропорционален плотности электрического тока

$$\nabla p = [\mathbf{j}, \mathbf{B}] / c,$$

это означает существование в магнитосфере соответствующей системы объемных токов. Там, где изолинии магнитного давления идут под углом к изолиниям плазменного давления, возникают токи вдоль силовых линий:

$$\mathbf{j}_\square = B \int \mathbf{b}[\nabla p, \nabla p_B] / p_B dl$$

– продольные токи. Здесь  $p$  – газовое давление,  $p_B$  – магнитное давление,  $\mathbf{j}$  – плотность тока,  $B$  – напряженность магнитного поля ( $b=B/B$ ). Интеграл берется

Nov 22, 1995 (1340-1730UT)

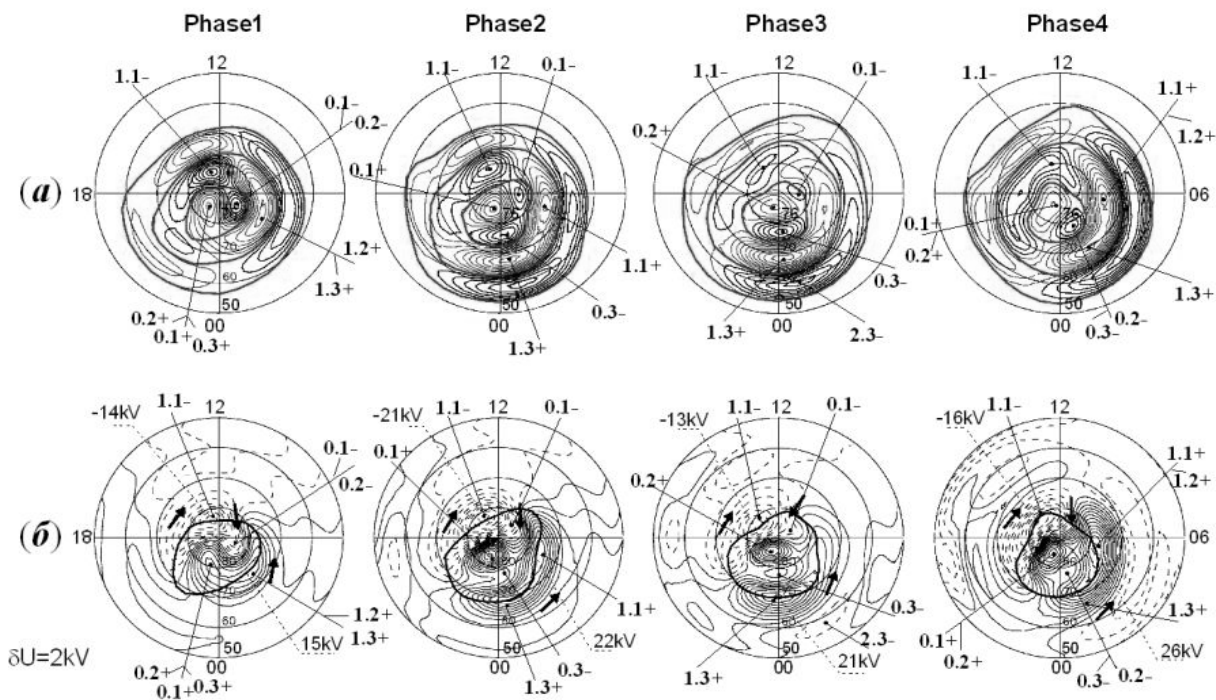


Рис. 11. Развитие суббури в эквивалентных токах (а) и в изолиниях потенциала электрического поля (б), полученное методом инверсии магнитограмм.

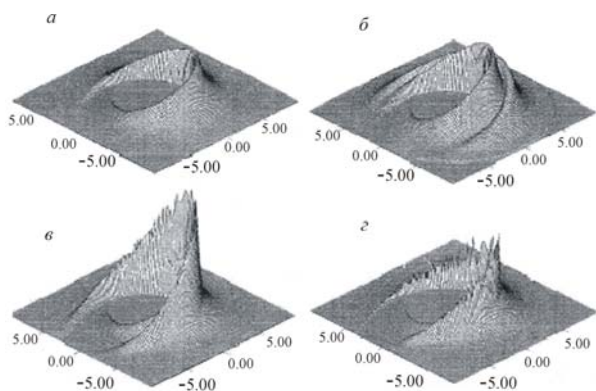


Рис.12. Эволюция рельефа плазменного давления во время модельной суббури: график а – спокойные условия, б – подготовительная фаза, в – суббуревой «взрыв», г – фаза восстановления.

вдоль силовой линии от геомагнитного экватора до ионосферы. Продольные токи уходят в ионосферу, питая систему ионосферных токов. Переход электромагнитной энергии в газодинамическую и обратно определяется формулой

$$(\mathbf{Ej}) = (\mathbf{v}\nabla p).$$

Таким образом, если  $(\mathbf{v}\nabla p) > 0$ , то в этом месте в магнитосфере работает МГД - компрессор, а если  $(\mathbf{v}\nabla p) < 0$ , то МГД - генератор.

Все, о чем говорилось выше, относилось к стационарным условиям, когда давление на  $L_{\infty}$  предполагалось не зависящим от времени. Если же это не так, и возмущение давления на границе имеет, например, вид импульсной функции времени, то возмущение будет двигаться к Земле со скоростью кон-

векции. Стремительный рост газового давления и его градиента означает соответствующий импульсный рост высыпаний частиц и ионосферных токов. Все это воспринимается на поверхности Земли как суббуревой взрыв (break up) (см. рис. 12).

Заметим, кроме того, что модельная область высыпаний электронов образует в проекции на Землю известный овал диффузных полярных сияний, а теоретическая трехмерная токовая система воспроизводит эмпирическую (модель Биркеланда – Бострема) даже в деталях, о чем свидетельствует также соответствие картины продольных токов в известной схеме Иджимы и Потемры (см. [28]). Рассмотрим теперь, как обстоит дело с действующими силами, их работой и необходимой для этого мощностью. Мы уже отмечали выше, что поверхностный ток во фронте ГУВ может быть дивергентным. Тогда появляется составляющая плотности тока  $j_n$  внутрь полости, образованной фронтом ГУВ. Если ток замыкается через тело магнитосферы, то это эквивалентно потоку вектора Пойтинга внутрь магнитосферы:

$$S = Uj - (c/4\pi)\text{rot}UB.$$

Второе слагаемое в правой части можно не учитывать – оно бездивергентно и не дает вклада в мощность, выделяемую в магнитосфере. Оценки, выполненные по этой формуле, дают дивергентную часть потока мощности порядка  $10^{18}$  эрг/с – характерную для небольших магнитосферных возмущений. Таким образом, принятый нами механизм снабжения магнитосферных процессов энергией за счет трансформации кинетической энергии солнечного ветра в электромагнитную на фронте ГУВ оказывается достаточным.

Следует к этому сделать одно добавление. Хотя

мощность МГД-преобразователя энергии на фронте ГУВ не зависит от знака ММП, реальный отклик магнитосферы при разном знаке  $B_z$ -компоненты ММП совершенно различен. Ответ заключается в том, что изменение знака  $B_z$  и, как следствие, знака электрического поля поперек магнитосферы привели бы к реверсу конвекции и к полному прекращению всякой авроральной активности. На деле этого не происходит, потому что существуют еще две компоненты магнитосферного электрического поля, которые не зависят от знака ММП, так что в этом случае авроральная активность сильно снижается, но не прекращается. Таким образом, асимметрия в ответе магнитосферы на ММП различной полярности кроется в асимметрии магнитосферы по отношению к конвекции. Мы здесь не касаемся вопроса генерации плазменных неоднородностей в хвосте магнитосферы, ответственных за формирование суббуревого взрыва. Этот вопрос еще нуждается в уточнении.

Разработка предложенной здесь концепции магнитосферных процессов проведена группой сотрудников ИСЗФ в составе Е.А. Пономарева, В.Д. Урбановича, П.А. Седых и О.В. Магер. На ранних этапах работы в ней принимали участие А.А. Анистратенко и Э.И. Немцова.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арлазаров М.С. Циолковский. М.: Молодая гвардия, 1967. 256 с.
2. Магидович И.П., Магидович В.И. Очерки по истории географических открытий: в 5 т. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Просвещение, 1982–1986.
3. Жеребцов Г.А. От магнитометеорологических наблюдений до проблем солнечно-земной физики // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1986. Вып. 76. С. 3.
4. Будько Б., Зайцев А., Карпачев А., Филиппов Б. Космическая среда вокруг нас. Троицк: Изд-во ИЗИ-РАН, 2006. 232 с.
5. Солнце / под ред. Дж. Койпера, М.: Инстр. лит-ра, 1957.
6. Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977. 446 с.
7. Кичатинов Л.Л. Дифференциальное вращение звезд // УФН. 2005. № 175. С. 476–494.
8. Филиппов Б.П. Зримые магнитные поля Солнца // Природа. 1996. № 6. С. 3–12
9. Шкловский И.С. Физика солнечной короны. М.: Наука, 1962.
10. Всехсвятский С.К., Никольский Г.М., Иванчук В.И. и др. Солнечная корона и корпускулярное излучение в межпланетном пространстве. Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1965. 215 с.
11. Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир, 1965.
12. Коваленко В.А. Солнечный ветер. М.: Наука, 1989. 272 с.
13. Прист Э.Р. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 1985. 589 с.
14. Coronal Mass Ejections / Ed. by Crooker N., Joselyn J.A., Feinman J. // AGU Geophysical Monograph Ser. 1997. V. 99. 299 p.
15. Grechnev V.V., Zandanov V.G., Uralov A.M., et al. Observations of CME-related phenomena in a wide spectral range // Solar Phys. 2004. V. 225. 379 p.
16. Ложечкин А.В., Филиппов Б.П. Корональные выбросы и эруптивные протуберанцы // Астрон. журн. 2004. Т. 81. С. 167–175.
17. Severnyi A.B., Kotov V. A., Tsap T.T. Observations of solar pulsations // Nature. 1976. V. 259. P. 87.
18. Северный А.Б., Котов В.А., Цап Т.Т. Солнечные колебания и проблема внутреннего строения Солнца // Астрон. журн. 1979. Т. 56. С. 1137.
19. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986.
20. Банин В.Г., Язев С.А. Площадки длительной активности на нисходящей ветви солнечного цикла № 21 // Кинематика и физика небесных тел. 1989. Т. 5. С. 62–68.
21. Григорьев В.М., Кобанов Н.И. Солнечные магнитометры // Исслед. по аэронауке и физике Солнца. 1980. Вып. 52.
22. Григорьев В.М. Актуальные экспериментальные задачи солнечной физики // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 8. С. 3–7.
23. Kosovichev A.G. Helioseismic tomography // Dynamic Sun / Edited by B. N. Dwivedi. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. P. 78–102.
24. Ньюкирк Г., Фрейзер К. // Физика за рубежом. Астрономия и геофизика. М.: Мир, 1983. С. 204–234.
25. Акасофу С.-И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. I. М.: Мир, 1974. 384 с.
26. Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. Геомагнитные вариации и бури. Новосибирск: Наука, 1979. 242 с.
27. Пономарев Е.А. Механизмы магнитосферных суббурь. М.: Наука, 1985. 159 с.
28. Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. I. Изд-во Ленинградского ун-та, 1975. 218 с.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*