

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 537.591

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ НА ОРБИТАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И.П. Безродных, Е.И. Морозова
(ИКИ РАН)

С.Г. Казанцев, В.Т. Семенов
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Обсуждается динамика крупномасштабных структур в солнечном ветре типа межпланетных ударных волн, образованных хромосферными солнечными вспышками. Межпланетные ударные волны рассматриваются как один из источников частиц космических лучей, способных изменить радиационную обстановку на орбитах космических аппаратов. Анализируется усиление в альвеновском диапазоне частот магнитной турбулентности перед фронтом межпланетной ударной волны, зарегистрированной на автоматической межпланетной станции «Венера-13». Предполагается, что причиной усиления магнитной турбулентности перед фронтом ударной волны, является поток космических лучей, ускоренных ударной волной. Отмечается, что усиление магнитной турбулентности в диапазоне альвеновских волн перед фронтом ударной волны неизбежно влечет за собой повышение эффективности ускорения космических лучей этой волной. Полученные экспериментальные данные об усилении турбулентности межпланетного магнитного поля перед фронтом ударной волны рассматриваются как подтверждение теоретических выводов о том, что ускорение космических лучей и генерация альвеновских волн перед фронтом межпланетных ударных волн – это два процесса, взаимно поддерживающих друг друга.

Из результатов анализа спектральных характеристик изменения скорости плазмы солнечного ветра, значений индексов геомагнитной активности, потоков частиц, захваченных геомагнитным полем, и частиц, выпадающих в ионосферу, сделан вывод о сильной зависимости процессов в магнитосфере Земли от величины скорости солнечного ветра.

Ключевые слова: межпланетные ударные волны, магнитная турбулентность, ускорение космических лучей, радиационные условия, космические аппараты.

Введение. Все планеты солнечной системы находятся внутри магнитосферы Солнца (гелиомагнитосферы), т. е. области занятой магнитным полем Солнца, напряженность которого на орбите Земли составляет величину в среднем около 6μ ($1\mu = 10^{-5} \text{ Гс} = 10^{-9} \text{ Тл}$), в то время как магнитное поле на полюсе Солнца составляет величину от 1 до 2 Гс. Магнитосфера Солнца наполнена потоками ионизирующих излучений различной природы. Эти потоки космической радиации представляют собой угрозу для электронной аппаратуры и оптических устройств космических аппаратов (КА). Потоки космической радиации способны изменить физические свойства оптических устройств, привести к сбоям в работе электронного оборудования КА и даже к его полному отказу. Источниками ионизирующих потоков в солнечной системе являются солнечные вспышки [1] и любая область космического пространства, где есть продольный [2, 3] или поперечный [4, 5] градиент скорости течения плазмы. В солнечной системе исходной энергией для ускорения частиц является кинетическая энергия плазмы солнечного ветра и энергия магнитного поля Солнца. Например солнечный ветер, «сталкиваясь» с гигантской магнитосферой Юпитера, тормо-

зится, и часть его кинетической энергии преобразуется в энергию ускоренных частиц. Отметим, что Юпитер – планета, которая немного не дотянула до статуса звезды. Эта планета является самым мощным источником релятивистских электронов в солнечной системе. Потоки электронов, ускоренных на границе магнитосферы Юпитера, наблюдаются во всей солнечной системе и, в том числе, в магнитосфере Земли [6].

Солнечная активность может проявлять себя как вспышечный процесс в хромосфере Солнца, связанный с аннигиляцией магнитного поля (взаимоуничтожения двух потоков магнитного поля направленных навстречу друг друга). Аннигиляция магнитного поля сопровождается трансформацией энергии магнитного поля в энергию электрического поля и затем в энергию заряженных частиц [7, 8].

Мощные солнечные вспышки сопровождаются: а) генерацией потоков солнечных космических лучей (СКЛ) [7 – 16], плотность энергии которых может в несколько тысяч раз превосходить плотность энергии галактических космических лучей (ГКЛ), например, от вспышки 16.07.1959 г. даже в стратосфере над Мурманском 17.07.1959 г. поток космических лучей возрос 2800 раз [12];

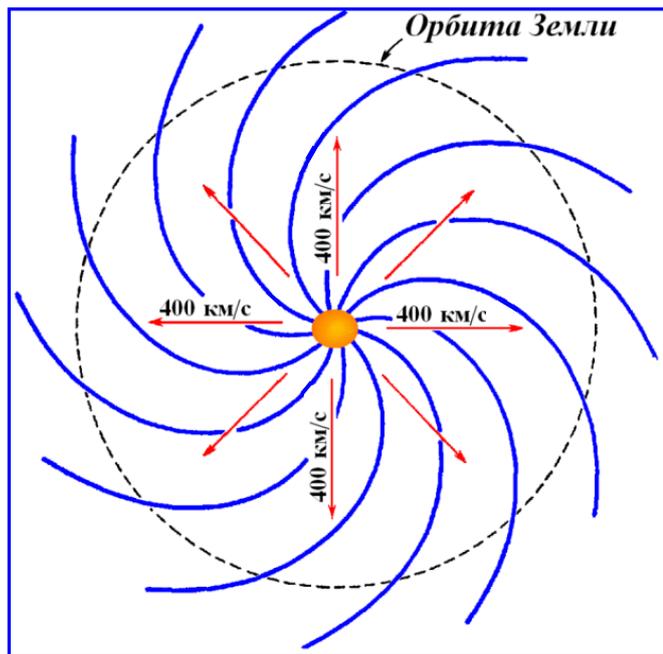


Рис. 1. Силовые линии спокойного межпланетного магнитного поля, возникающего в результате вытягивания силовых линий магнитного общего поля Солнца идеализированным спокойным солнечным ветром, распространяющимся радиально от Солнца, со средней скоростью около 400 км/с

б) выбросом миллионов тонн солнечной плазмы со сверхзвуковой скоростью в межпланетное пространство, что является причиной образования межпланетных ударных волн (МУВ) [17], на фронтах которых возможно ускорение заряженных частиц [18].

К событиям, связанным с ускорением космических лучей межпланетными ударными волнами до энергий порядка миллиарда электрон-вольт ($1 \text{ эв} \approx 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$), можно отнести такие известные события как: 17.07.1956 г., 12.11.1960 г., 04.08.1972 г. [10] и др.

Межпланетная среда. Межпланетная среда представляет собой плазму солнечного ветра, в которую «вморожено» крупномасштабное межпланетное магнитное поле (ММП), имеющее спиральную структуру. Из-за высокой проводимости плазма перемещается вместе с магнитным полем. Крупномасштабное магнитное поле делает возможным существование в межпланетной среде магнитозвуковых и альвеновских волн, влияющих на динамику межпланетной среды и космических лучей.

На рис. 1 показана упрощенная модель силовых линий межпланетного магнитного поля в плоскости солнечного экватора при идеально спокойном солнечном ветре. Идеально спокойный солнечный ветер – это абстракция, реально он обычно всегда

возмущен в той или другой степени. Наблюдаемый диапазон изменения скоростей плазмы солнечного ветра на орбите Земли от 250 км/с при низкой солнечной активности и до нескольких тысяч километров в секунду при высокой солнечной активности. Солнечный ветер представляет собой поток плазмы,двигающейся почти радиально (рис. 1) от Солнца со скоростью превышающей скорость звука и альвеновскую скорость в несколько раз. Причиной существования солнечного ветра является отсутствие вблизи поверхности Солнца термодинамического и механического равновесия плазмы из-за ее перегрева. Для описания движения плазмы солнечного ветра в межпланетной среде можно использовать уравнение электродинамики:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{rot}[\nu H] + \eta \nabla^2 H,$$

где $\eta = (4\pi\sigma)^{-1}$ – коэффициент диффузии магнитного поля в среде; μ – магнитная проницаемость ($\mu = 1$ поскольку среда не намагничена); σ – электропроводность среды. В межпланетной среде из-за высокой электропроводности плазмы ($1/\sigma \sim 0$) можно считать, что $\eta \sim 0$, и представить исходное уравнение в виде:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{rot}[\nu H].$$

Из данного уравнения следует, что магнитное поле меняется так, как будто магнитные силовые линии жестко связаны с плазмой солнечного ветра, по терминологии Альвена поле «вморожено» в плазму солнечного ветра. Движение плазмы вдоль силовых линий не оказывает никакого действия на поле, но движение плазмы поперек силовых линий поля увлекает за собой магнитное поле и перемещается вместе с ним как одно целое.

Некоторые усредненные количественные характеристики плазмы солнечного ветра и ММП на орбите Земли [19]:

- плотность частиц плазмы одного знака $n \approx 7 \text{ см}^{-3}$;
- средняя направленная скорость плазмы $u \approx 400 \text{ км/с}$;
- температура протонов плазмы $T_p \approx 9 \cdot 10^4 \text{ К}$;
- температура электронов плазмы $T_e \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ К}$;
- поток частиц солнечного ветра $nu \approx 2,8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
- плотность энергии протонов $nm_p u^2/2 \approx 0,94 \cdot 10^{-8} \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-3}$;
- плотность тепловой энергии $3nkT_p/2 \approx 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-3}$;
- альвеновская скорость $V_A = (B^2 / 4\pi nm_p)^{1/2} \approx 41 \text{ км/с}$;
- напряженность межпланетного магнитного поля $B \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гс}$;

- отношение кинетического давления протонов к магнитному давлению $\beta_p = 8\pi nkT_p / B^2 \approx 0,87$;
- электронная плазменная частота $\omega_0 = (4\pi ne^2 / m_e)^{1/2} \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$;
- циклотронная частота электронов $\omega_{ce} = (eB / m_e c) \approx 0,9 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$;
- циклотронная частота протонов $\omega_{cp} = (eB / m_p c) \approx 0,5 \text{ с}^{-1}$;
- верхняя гибридная частота $\omega_{h1} = (\omega_0^2 + \omega_{ce}^2)^{1/2} \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$;
- нижняя гибридная частота $\omega_{h2} = (\omega_{cp}\omega_{ce})^{1/2} \approx 21 \text{ с}^{-1}$;
- тепловая скорость электронов $V_e = (2kT_e / m_e)^{1/2} \approx 2,1 \cdot 10^8 \text{ см/с}$;
- тепловая скорость протонов $V_p = (2kT_p / m_p)^{1/2} \approx 3,9 \cdot 10^6 \text{ см/с}$;
- ларморовский радиус электронов $r_e = V_e / \omega_{ce} \approx 2,3 \cdot 10^5 \text{ см}$;
- ларморовский радиус протонов $r_p = V_p / \omega_{cp} \approx 7,8 \cdot 10^6 \text{ см}$;
- дебаевский радиус $r_d = (kT_e / 4\pi ne^2)^{1/2} \approx 10^3 \text{ см}$.

Магнитогидродинамические волны. Поскольку проводимость плазмы солнечного ветра достаточно велика, то можно считать ММП «вмороженным» в плазму. Если возникнет возмущение в плазме солнечного ветра, например, некоторый первоначальный объем плазмы, сместится поперек силовых линий поля, то он потянет за собой и «вмороженное» в этот объем магнитное поле. Изменение конфигурации магнитного поля сгенерирует систему индукционных токов, которая взаимодействуя с существующим магнитным полем, передаст начальное движение плазмы соседним участкам. Объем плазмы, который начал движение первым, остановится, но придут в движение соседние участки плазмы. Таким образом, возникнет волна, которая будет распространяться вдоль силовой линии магнитного поля.

К этому выводу можно прийти исходя из других рассуждений. Силовые линии магнитного поля можно рассматривать как некие натянутые струны, где максвелловы натяжения силовых линий поля заменят упругость среды, а масса плазмы, «намороженная» на силовую линию, придаст инерцию силовой линии магнитного поля. Таким образом, мы получаем почти полный аналог обычной струны.

Следовательно, аналогично с теорией колебания натянутой струны, можно ожидать, что при воздействии на силовую линию поля возникнет поперечная (альвеновская) волна, распространяющаяся вдоль поля со скоростью $V_A = (B^2 / 4\pi\rho)^{1/2}$, где $\rho = nm_p$.

Такие возмущения магнитного поля, представляющие собой поперечные колебания силовых линий поля, распространяющиеся вдоль магнитного поля, относятся к типу магнитогидродинамических (МГД) волн. К волнам МГД,

кроме альвеновских волн, относятся также магнитозвуковые и звуковые волны в плазме с магнитным полем.

Магнитозвуковая волна отличается от альвеновской волны тем, что является продольной волной (в гидродинамическом смысле) и распространяется поперек магнитного поля. Звуковая волна, также как магнитозвуковая волна, является продольной волной, но распространяется вдоль магнитного поля. Заметим, что альвеновские волны в отличие от магнитозвуковых волн не связаны с изменением плотности среды и представляют собой частный случай низкочастотной электромагнитной волны, распространяющейся в магнитном поле.

Возникновение волн в плазме с магнитным полем обычно связывают с различными типами неустойчивости. Если существует хотя бы один тип малых возмущений, которые раз возникнув усиливаются, то плазма относительно такого типа возмущения считается не устойчивой. Например кинетическая неустойчивость плазмы, в результате которой изменяется функция распределения скоростей частиц плазмы. При наличии электрического поля небольшая часть электронов (наиболее быстрых, для которых длина свободного пробега достаточно велика) будут приобретать энергию большую, чем они теряют из-за сопротивления. В результате этого электроны будут ускоряться до тех пор, пока не выйдут из области ускорения или пока не начнут действовать другие более эффективные механизмы торможения. Другим видом кинетической неустойчивости является пучковая неустойчивость, возникающая при движении пучка быстрых частиц плазмы. Заряженные частицы (электроны), движущиеся в плазме со скоростями больше скорости теплового движения частиц плазмы, возбуждают продольные плазменные волны. Если таких частиц много и они хаотически распределены в плазме, то волны, излучаемые отдельными частицами, не когерентны, и их энергии излучения просто складываются. Такой тип излучения называется тепловым. Нетепловой тип генерации волн возникает тогда, когда функция распределения скоростей частиц плазмы отличается от максвелловой, например, если имеется пучок быстрых заряженных частиц и средняя скорость пучка частиц много больше дисперсии скоростей в плазме и в пучке.

Турбулентность плазмы солнечного ветра. Наличие магнитного поля в межпланетной среде оказывает некоторое стабилизирующее действие и тормозит развитие возмущений, и тем самым уве-

личивает устойчивость движения плазмы солнечного ветра. Действительно, всякое хаотическое движение плазмы, приводящее к искривлению и запутыванию силовых линий магнитного поля, будет встречать противодействие со стороны поля из-за упругости силовых линий. И это противодействие будет тем больше, чем больше энергия магнитного поля по сравнению с кинетической энергией движения плазмы. Обычно хаотическое движение плазмы охватывает целый спектр пространственных масштабов. Такое движение называется турбулентным. Для турбулентности характерно движение энергии от больших пространственных масштабов к меньшим масштабам. Самые мелкие пульсации плазмы затухают из-за вязкости. Таким образом, первоначальная энергия возмущения, каких бы больших масштабов она не была, в конечном итоге переходит в тепло.

Межпланетное магнитное поле увеличивает устойчивость движения плазмы солнечного ветра и тем самым препятствует возникновению турбулентности и затрудняет перенос энергии в уже существующей турбулентности от движения больших масштабов к движению меньшим масштабам, так как этот перенос энергии всегда осуществляется за счет неустойчивости, а магнитное поле препятствует развитию неустойчивости. Но поскольку энергия магнитного поля в межпланетной среде, в основном, меньше кинетической энергии плазмы, то межпланетное магнитное поле способно лишь несколько замедлить процесс развития неустойчивости и, тем самым, лишь немного замедлить процесс диссипации энергии крупномасштабных движений в солнечном ветре.

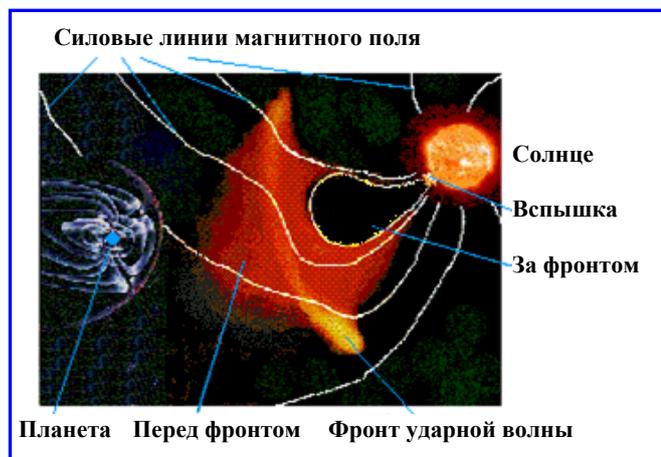


Рис. 2. Схема движения ударной волны от солнечной вспышки

Магнитогидродинамические разрывы в солнечном ветре. При движении плазмы могут возникать разрывы непрерывности в термодинамических параметрах и параметрах движения. Разрыв разделяет две среды с различными параметрами. В обычной газодинамике (в отсутствии магнитного поля) все виды разрывов можно свести к двум группам, не связанным между собой: тангенциальные разрывы и ударные волны. Тангенциальные разрывы в отсутствие магнитного поля являются неустойчивыми и характеризуются тем, что через них не проходит поток вещества, они движутся вместе со средой. В тангенциальных разрывах передается только касательная составляющая импульса от одной среды к другой. В ударных волнах всегда есть поток вещества через разрыв, и по этой причине, они всегда движутся относительно среды. В ударных волнах передается только нормальная составляющая импульса по отношению к плоскости разрыва. По этой причине не возможен переход ударных волн в тангенциальные разрывы и наоборот.

В межпланетной среде из-за существования ММП, кроме тангенциальных разрывов и перпендикулярных ударных волн может существовать новый тип крупномасштабного возмущения состояния среды – это наклонные ударные волны. В отличие от тангенциальных разрывов и перпендикулярных ударных волн в наклонных ударных волнах из-за глобального магнитного поля, имеет место одновременная передача как нормальной, так и тангенциальной составляющей импульса от одной среды к другой. Наклонная ударная волна ведет себя одновременно как тангенциальный разрыв и как обычная ударная волна.

Ударные волны в межпланетной среде. Наиболее мощными источниками возмущений солнечного ветра являются высокоскоростные потоки, вытекающие из активных областей и корональных дыр на Солнце [20], а также хромосферные вспышки, приводящие к выбросу в межпланетную среду ускоренной плазмы и генерации ударных волн [21 – 24]. Вблизи орбиты Земли наблюдаются оба источника магнитогидродинамических возмущений солнечного ветра.

Используя терминологию Паркера Е.Н. [17], можно сказать, что межпланетная ударная волна подобно метле, выметает из солнечной системы газы, истекающие из планет и комет, мелкие частицы метеорной пыли и даже частицы галактических космических лучей (Форбуш-эффект). Межпланетные ударные волны оказывают влияние на динамику внешних областей радиационных поясов Земли, вызывают геомагнитные бури и полярные

сияния, порождают процессы ускорения частиц в межпланетной среде и магнитосферах планет.

Скорости межпланетных ударных волн за период наблюдения с 1947 по 2009 гг., в основном, находились в диапазоне от 600 до 2000 км/с. Но были события, такие как 4 августа 1972 г., когда скорость ударной волны достигала рекордной величины и была более 2000 км/с [24].

В событии 4 августа 1972 г. наблюдалось система из двух ударных волн. Первая ударная волна двигалась со скоростью 600 км/с, вторая ударная волна, догоняя первую, двигалась со скоростью около 4000 км/с [24]. Система сближающихся ударных волн образовала в межпланетном пространстве магнитную ловушку. Возникшая в межпланетном пространстве магнитная ловушка содержала высокоэнергичную плазму и частицы, ускоренные еще в солнечной вспышке. В результате сближения ударных волн произошло сжатие плазмы в магнитной ловушке и ускорение в ней частиц до энергий порядка миллиарда электрон вольт [24]. Доза радиации от потоков этих заряженных частиц внутри КА «Прогноз» [10, 15] за период с 4 по 12 августа 1972 г. составила величину около 123 рад, а снаружи КА – около 1000 рад. Результаты измерения дозы радиации, приведенные в работе [10], указывают, что межпланетные ударные волны могут существенно изменить радиационные условия на орбитах КА.

Как правило, взаимодействие ударной волны с магнитосферой Земли сопровождается мощными геомагнитными бурями и усилением процессов ускорения заряженных частиц и процессов сброса частиц из радиационных поясов Земли в ионосферу. При этом воздействие потоков высокоэнергичных частиц космических лучей на верхнюю атмосферу способно изменить состояние атмосферы Земли [25].

Межпланетное магнитное поле практически всегда находится в состоянии возмущения, особенно вблизи ударных волн [26]. Детальное исследование магнитной турбулентности вблизи ударных волн впервые было выполнено с помощью автоматических межпланетных станций (АМС) «Венера-13» и «Венера-14» [27 – 30]. В результате этих исследований было установлено, что магнитное поле спокойного солнечного ветра структурировано с характерным масштабом около 0,04 а.е. (на рис. 4 это около 4 ч). Для оценки этого среднего пространственного масштаба неоднородности ММП использовались данные двух АМС «Венера», полученные за период около 300 ч [27].

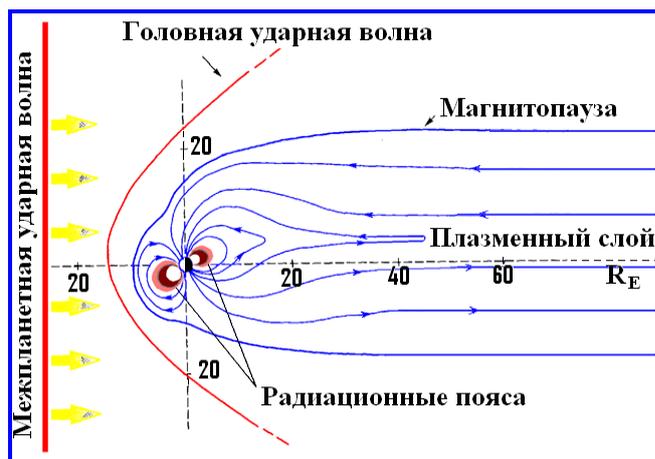


Рис. 3. Схема приближения ударной волны от солнечной вспышки к магнитосфере Земли

Наблюдаемые квазипериодические изменения мощности флуктуаций ММП связаны с коротящими (вращающимися вместе с Солнцем) стационарными магнитогидродинамическими разрывами, разделяющими отдельные силовые трубки ММП. Таким образом, оказалось, что неоднородности в межпланетной среде расположены не равномерно, а группируются вблизи «стенок» (стационарных МГД разрывов), вытянутых по спирали от Солнца на периферию и участвующих в ротации.

В системе отсчета квазиперпендикулярных межпланетных ударных волн должно наблюдаться непрерывное натекание на фронт ударной волны полупрозрачных (для заряженных частиц) «стенок» с повышенной мощностью флуктуаций ММП, что приведет к ускорению частиц, захваченных между очередной «стеночкой» и фронтом волны [18]. Для выявления динамики низкочастотной МГД турбулентности вблизи фронта ударной волны в солнечном ветре мы использовали данные прямых измерений ММП на АМС «Венера-13». Для оценки спектральных характеристик нами был выбран метод спектрально-временного анализа.

Спектрально-временной анализ (СВАН) и его применение для оценки плотности спектра мощности флуктуаций ММП вблизи фронтов межпланетных ударных волн. Программное обеспечение для СВАН, описание которого дано в работе [6], было разработано в 1981 году в ИКФИА СО РАН и в дальнейшем успешно применялось в работах [26 – 30] для исследования динамики флуктуаций магнитного поля вблизи межпланетных ударных волн. Суть метода СВАН состоит в том, что из исходного временного ряда данных с помощью преобразования Фурье получают его

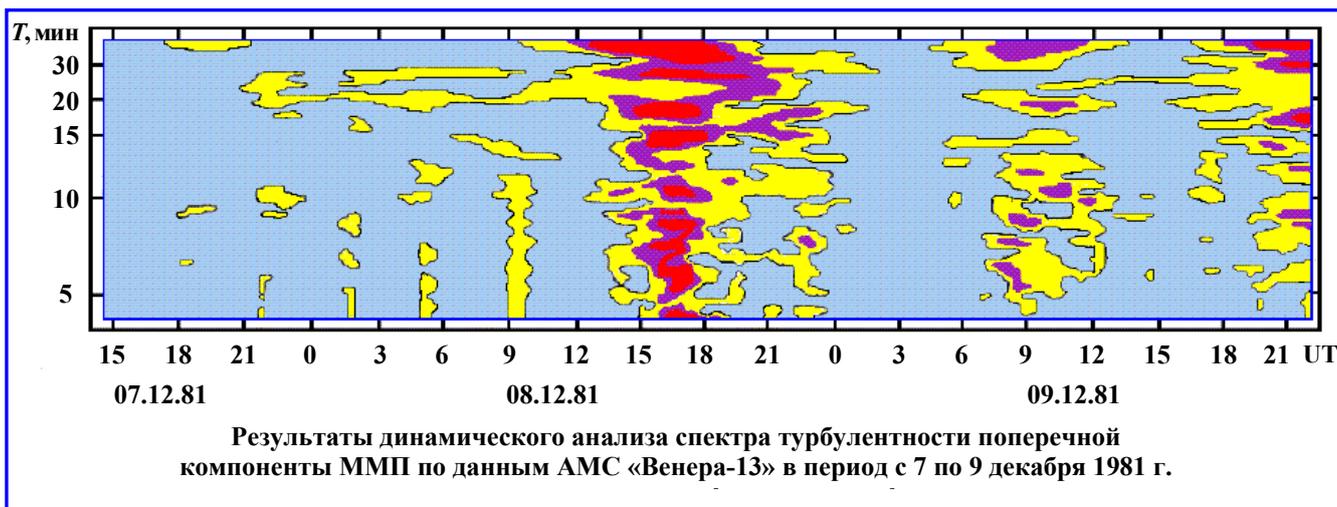


Рис. 4. Фронт ударной волны наблюдался на АМС «Венера-13» 08.12.1981 г. в 13 ч 42 мин

спектральное представление. Полученный спектр фильтруют (в частотной области) набором узкополосных цифровых фильтров гауссовой формы. В нашей программной реализации количество фильтров $N = 60$. Все N спектров, полученные после фильтрации с помощью обратного преобразования Фурье, преобразовывались в N временных рядов. Каждый временной ряд N_i содержал колебания на частоте F_i , соответствующей частоте пропуска N_i фильтра. Далее с помощью преобразования Гильберта для каждого из N_i временного ряда получали N_i огибающие амплитуд колебаний. Огибающие амплитуд временных рядов позволяли определить, как меняется динамика амплитуды вариаций на разных частотах со временем. Амплитуды вариаций возводились в квадрат и делились на соответствующие им полосы частот, таким образом, производилась оценка изменения во времени плотности спектра мощности флуктуаций. Программа многократно тестировалась, и ее корректная работа не вызывает сомнения. Пример использования СВАН для определения изменения со временем спектральной плотности мощности флуктуаций ММП на разных частотах, показан на рис. 4. Для удобства вместо частоты по вертикальной шкале отложены им соответствующие периоды вариаций.

Усиление МГД турбулентности перед фронтами ударных волн. Известно из газодинамики, что ударные волны могут модифицировать среду перед фронтом волны. Действительно часть энергии, которая расходуется на сжатие среды в области ударного слоя волны, идет на ионизацию газа в этом слое. При этом область сжатого газа ударной волны излучает как черное тело. Вычислив температуру в области ударного слоя волны и используя

формулу Стефана-Больцмана, можно оценить поток электромагнитного излучения перед фронтом волны. Сильная газодинамическая ударная волна способна своим электромагнитным излучением прогревать (модифицировать) среду перед ударным фронтом и двигаться по среде с уже измененными свойствами.

Ударные волны, генерирующие электромагнитное излучение в космических условиях, могут наблюдаться, например, при мощных солнечных вспышках и при вспышках сверхновых.

Но из-за наличия магнитного поля в межзвездном и в межпланетном пространстве наиболее важную роль в диссипации энергии ударных волн и в модификации среды перед фронтами ударных волн играет не электромагнитное излучение, а потоки заряженных частиц космических лучей, ускоренных на фронтах этих волн [18].

На рис. 4 видно, что максимальная мощность флуктуаций ММП наблюдается в области сжатого солнечного ветра, в ударном слое межпланетной ударной волны (красный цвет), где мощность флуктуаций ММП примерно в 100 раз превосходит мощность флуктуаций в спокойном солнечном ветре (синий цвет).

Спектральная плотность мощности флуктуаций в ударном слое в области сжатой плазмы солнечного ветра на частоте 10^{-3} Гц достигала величины $10^4 \gamma^2/\text{Гц}$. За ударным слоем в области разряженной плазмы наблюдается резкое падение мощности флуктуаций ММП до уровня спокойного солнечного ветра. В спокойном солнечном ветре на тех же частотах мощность флуктуаций ММП имела величины порядка $10^2 \gamma^2/\text{Гц}$. Перед фронтом ударной волны хорошо видна периодическая структура типа «стиральная доска». На рис. 4 также видно,

чем ближе ударный фронт подходит к очередной «стеночке» (МГД разрыву, разделяющему отдельные силовые трубки ММП [6]), тем больше в этой «стеночке» усиливается мощность флуктуаций ММП в диапазоне альвеновских частот. Причина усиления мощности флуктуаций ММП в диапазоне альвеновских частот перед фронтами ударных волн, вероятно, связана с тем, что вблизи фронтов ударных волн практически всегда наблюдается увеличение потока космических лучей в диапазоне энергий нескольких МэВ. Событие 8 декабря 1981 г. не является исключением, вероятно, потому что усиление турбулентности магнитного поля в диапазоне частот альвеновских волн от 10^{-2} до 10^{-3} Гц перед фронтом ударной волны связано с повышенными потоками частиц космических лучей, ускоренных ударной волной.

Изменение состояния среды за фронтом ударной волны. Поскольку характерные размеры крупномасштабных возмущений в плазме солнечного ветра много больше длины свободного пробега частиц плазмы, то солнечный ветер можно считать сплошной средой, и к нему применим математический аппарат, разработанный для физики сплошных сред [31, 32]. Электропроводимость солнечного ветра близка к проводимости металлов. Эта электропроводящая среда движется в межпланетном магнитном поле, плотность энергии которого может быть сравнима с плотностью энергии плазмы солнечного ветра. Следовательно, для строгих математических расчетов необходимо использовать уравнения магнитной гидродинамики [33], но мы получим только некоторую приближенную оценку. Важным параметром сплошной среды является скорость звука $u_{зв}$, равная корню квадратному из произведения показателя адиабаты $\gamma = 5/3$ на отношение давления P к плотности газа ρ . Звуковая волна – это возмущение малой амплитуды, распространяющаяся в сплошной среде, ударная волна – это возмущение большой амплитуды, распространяющаяся в сплошной среде, и то и другое являются возмущением среды, но свойства их различны.

Межпланетная ударная волна это крупномасштабное возмущение, состоящее как бы из двух волн: передний фронт перед ударным слоем представляет волну сжатия, за ударным слоем располагается волна разряжения. Волна сжатия движется со скоростью больше скорости звука в спокойном солнечном ветре и меньше скорости звука в ударном слое. Волна разряжения движется со скоростью равной или меньше скорости звука в спокойном солнечном ветре [31]. Поскольку волна сжатия

плазмы всегда движется быстрее волны разряжения, то ударный слой, расположенный между ними, постоянно увеличивается.

В нашем случае мы собираемся рассмотреть только поведение температуры в ударном слое. Для этого достаточно рассматривать плазму солнечного ветра как идеальный газ, тогда справедливо утверждение, что произведение давления на объем равно произведению газовой постоянной на температуру: $pV = RT$ (уравнение состояния идеального газа для одного моля газа). Соответственно средняя энергия одной молекулы газа будет равна $\langle E \rangle = (i/2)kT = (i/2)RT/N$, где $k = R/N$ постоянная Больцмана; N – число частиц в одном моле газа; i – сумма поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы ($i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вращ}} + 2n_{\text{колеб}}$). В нашем случае для одноатомного газа $i = n_{\text{пост}} = 3$. Представим уравнение идеального газа в виде $pV = (2/i)N \langle E \rangle = (2/i)U$, где U – внутренняя энергия газа. Для удобства введем новую переменную равную отношению теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме $\gamma = C_p / C_v = (i+2)/i$, поскольку известно, что $C_p = ((i+2)/2)R$ и $C_v = (i/2)R$, то $pV = (\gamma - 1)U$.

В нашем случае отсутствует какой-либо теплообмен, и вся затраченная работа по сжатию плазмы в ударном слое переходит во внутреннюю энергию плазмы, поэтому можем записать $p dv = -dU$. За ударным слоем межпланетной ударной волны работа по расширению плазмы будет осуществляться за счет внутренней энергии плазмы. Заметим, что если $U = pV/(\gamma - 1)$, то $dU = (pdv + vdp)/(\gamma - 1)$. Тогда $p dv = -(pdv + vdp)/(\gamma - 1)$ или $\gamma p dv = -v dp$, или $\gamma(dv/v) + dp/p = 0$. Интегрируя, получим уравнение Пуассона для адиабатического процесса $pV^\gamma = \text{const}$, где γ – показатель адиабаты. Иначе это уравнение можно записать $Tv^\gamma = \text{const}$ или $T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const}$. Из вышесказанного следует, что в ударном слое из-за сжатия плазмы будет наблюдаться резкое увеличение температуры. Процесс сжатия плазмы, ее нагрев в ударном слое и охлаждение за ударным слоем в волне разряжения необратим. В разряженной плазме за ударной волной температура ниже, чем в ударном слое, но выше, чем в спокойном солнечном ветре. Существенное отличие ударных волн от звуковых волн состоит в том, что ударные волны нагревает среду, по которой проходят.

Ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны. Различные возможности ускорения частиц вблизи фронтов межпланетных ударных волн были показаны многими исследователями, но мы остановимся на регулярном механизме ускорения Крымского Г.Ф. [1], как

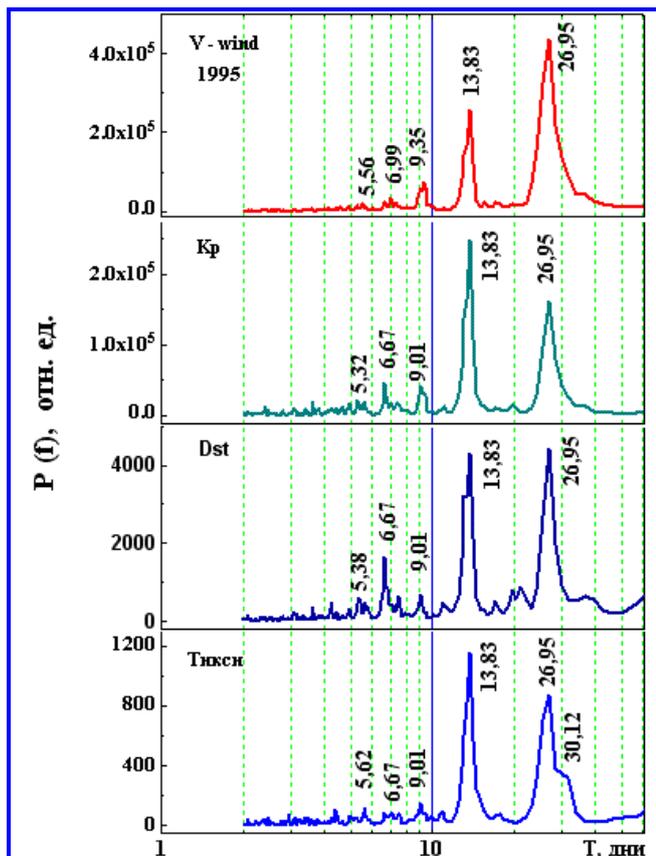


Рис. 5. Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и встречаемости риометрических поглощений по данным 1995 г.

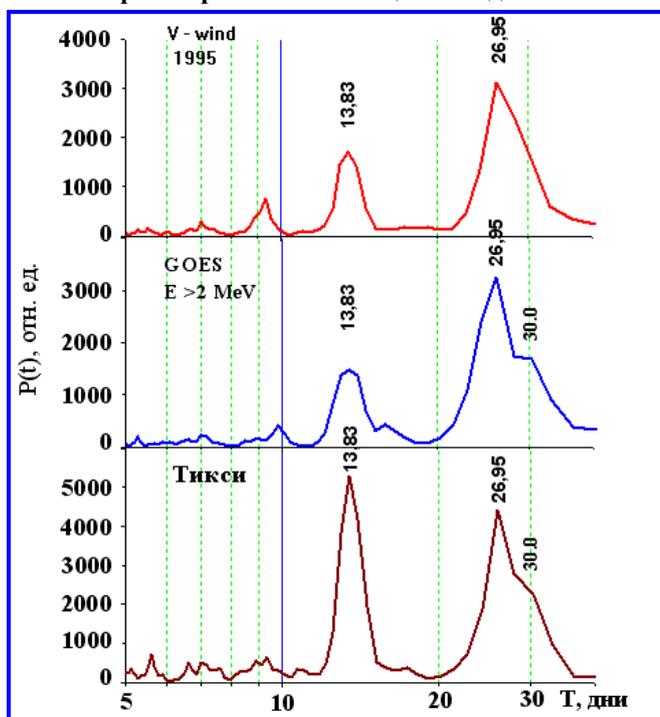


Рис. 6. Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, интенсивности потока электронов с $E > 2$ МэВ на геостационарной орбите и встречаемости риометрических поглощений по данным 1995 г.

наиболее эффективным. Рассмотрим идеализированную задачу об ускорении частиц ударной волной плоской геометрии, распространяющейся в среде, где существуют периодические структуры в магнитном поле («стеночки» на рис. 4) с повышенным уровнем мощности МГД турбулентности в диапазоне альвеновских частот. Частицы космических лучей, двигаясь от фронта ударной волны «вверх по потоку», отражаются от этих магнитных неоднородностей и возвращаются обратно к фронту, при этом получая очередную порцию дополнительной энергии. Отражаясь от фронта ударной волны, частицы вновь уходят «вверх по потоку», и так происходит до тех пор, пока они не наберут достаточную энергию для «убегания» из области ускорения. Для частиц космических лучей периодические структуры, показанные на рис. 4, представляют собой полупрозрачные «зеркала», в то время как фронт ударной волны можно считать для космических лучей почти не прозрачным «зеркалом». В системе отчета расположенной на фронте ударной волны эти полупрозрачные для частиц космических лучей «зеркала», непрерывно двигаются к фронту ударной волны.

Таким образом, перед фронтом ударной волны образуется область, в которой частицы космических лучей эффективно удерживаются, и ускоряются при каждом взаимодействии с магнитными неоднородностями, двигающимися по направлению к фронту ударной волны. Ускоренные частицы космических лучей усиливают турбулентность магнитного поля перед фронтом волны [18].

Усиление магнитной турбулентности в диапазоне альвеновских волн перед фронтом ударной волны неизбежно влечет за собой повышение эффективности ускорения космических лучей. Таким образом, можно утверждать, что ускорение космических лучей и генерация альвеновских волн перед фронтом межпланетной ударной волны – это два процесса, взаимно поддерживающих друг друга.

Связь частотных спектров флуктуаций параметров в межпланетной среде и в магнитосфере Земли. Спектральная плотность мощности флуктуаций (скорости солнечного ветра, геомагнитных индексов, потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите и потоков высвобождающихся частиц из внешнего радиационного пояса Земли) определялась с помощью программного обеспечения [6]. Для выявления периодических составляющих во временных рядах данных использовались два спектральных метода. Алгоритм первого метода использует преобразование исходного временного ряда методом Фурье с последующим вычислением

спектральной плотности вариаций. Алгоритм второго метода основан на теореме Винера-Хинчена, согласно которой вычисление спектральной плотности флуктуаций реализовано через преобразования Фурье автоковариационной функции временного ряда. Первый метод наиболее эффективен при поиске периодических составляющих, второй метод – при оценке спектральной плотности шума.

В алгоритмах первого и второго метода предусмотрена возможность, как быстрого преобразования Фурье (БПФ), так и медленного преобразования Фурье (МПФ). При использовании БПФ требуется, чтобы длина временного ряда была кратная двум ($N = 2^n$, где n – целое число), и это иногда вызывает некоторое неудобство. МПФ можно использовать для ряда любой длины, но он очень сильно проигрывает в скорости БПФ, и это существенный недостаток при работе с длинными временными рядами.

Приведенные на рис. 5 результаты спектрального анализа указывают на сильную зависимость от рекуррентных (повторяющихся) крупномасштабных возмущений скорости солнечного ветра геомагнитной активности и динамики потоков выпадающих частиц из внешнего радиационного пояса Земли [34].

Приведенные на рис. 6 результаты спектрального анализа указывают на сильную зависимость от рекуррентных крупномасштабных возмущений скорости солнечного ветра динамики потоков частиц, захваченных геомагнитным полем и динамики потоков частиц, выпадающих из области захвата в ионосферу Земли.

На рис. 7 представлены результаты спектрального анализа потока релятивистских электронов на геостационарной орбите за период с 1986 по 1995 гг., полученные с лучшим частотным разрешением, чем данные, показанные на рис 5 и 6. Из данных анализа, приведенных на рис. 7, следует, что интенсивность потока релятивистских электронов в период с 1986 по 1995 гг. изменялась с периодами около 14, 26 и 30 дней.

Вариации с периодом около 14 дней можно объяснить существованием преимущественно двух секторной структуры ММП в период с 1986 по 1995 гг. Учитывая дифференциальное вращение Солнца, вариации с периодами около 26 и 30 дней можно объяснить проявлением солнечной активности в этот период на двух разных гелиоширотах.

Выводы. Событие 8 декабря 1981 г. уникально тем, что перед фронтом межпланетной ударной волны длительное время наблюдался «спокойный» солнечный ветер. Это идеальные условия чтобы посмотреть, как ведет себя магнитная турбулентность перед ударным фронтом. В событии 8 декабря 1981 г. по данным прямого эксперимента на АМС «Венера-13»

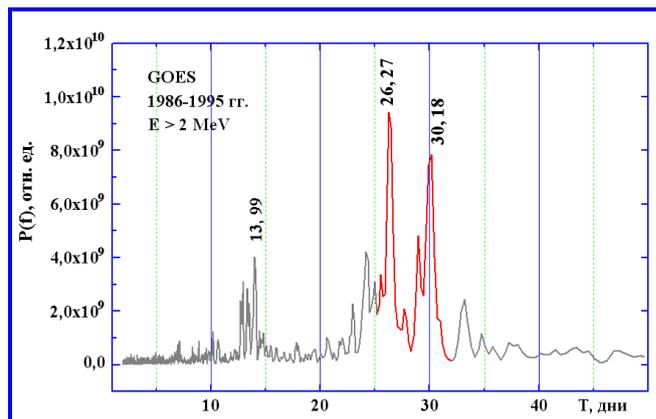


Рис. 7. Спектр мощности флуктуаций интенсивности потока релятивистских электронов с $E > 2$ МэВ на геостационарной орбите по данным за период с 1986 по 1995 гг.

наблюдалась четкая картина усиления мощности динамики магнитной турбулентности (в диапазоне альфеновских частот от 10^{-2} до 10^{-3} Гц) при приближении фронта межпланетной ударной волны. Существование этого экспериментального факта указывает на то, что не только магнитная турбулентность влияет на динамику космических лучей, но и потоки космических лучей, имея достаточно высокую плотность энергии, могут сами генерировать магнитную турбулентность.

Из данных измерений потоков космических лучей вблизи фронтов межпланетных ударных волн следует, что ударные волны могут являться эффективными источниками потоков космических лучей, способными существенно изменить радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве и, вероятно, повлиять на процессы в атмосфере Земли. Анализ спектральных характеристик изменения скорости солнечного ветра, изменения индексов геомагнитной активности и потоков частиц, захваченных геомагнитным полем, и частиц, выпадающих в ионосферу, указывает на сильную зависимость процессов в магнитосфере Земли от скорости солнечного ветра.

Литература

1. Ускорение заряженных частиц в процессах типа солнечных вспышек / С.И. Сыроватский // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1975. – Т. 39. – № 2. – С. 359 – 374.
2. Регулярный механизм ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны / Г.Ф. Крымский // Докл. АН СССР. – 1977. – Т. 234. – № 6. – С. 1306 – 1308.
3. Исследование временных характеристик процесса ускорения заряженных частиц на ударном фронте / Г.Ф. Крымский, В.К. Елшин, Ю.А. Ромашенко [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1978. – Т. 42. – № 5. – С. 1070 – 1074.
4. Ускорение заряженных частиц в сдвиговых течениях солнечной плазмы / Е.Г. Бережко // Письма в ЖЭТФ. – 1981. – Т. 33. – С. 416 – 419.

5. Потоки энергичных электронов вблизи магнитопаузы и на геостационарной орбите. Анализ экспериментальных результатов и механизм генерации / И.П. Безродных, Е.Г. Бережко, И.Я. Плотников [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1984. – Т. 48. – № 11. – С. 2165 – 2167.
6. Безродных И.П. Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику энергичных электронов в магнитосфере Земли // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Рукопись. – М.: ИЗМИРАН, 1984. – 197 с.
7. Аннигиляция поля и ускорение частиц в солнечных вспышках / С.Б. Пикельнер, В.Н. Цытович // Астрон. Журн. – 1975. – Т. 52. – С. 738.
8. Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И. Солнечные космические лучи / Л.И. Дорман, Л.И. Мирошниченко. – М.: Наука, 1968. – 468 с.
9. Космические лучи солнечного происхождения / Л.И. Дорман // Итоги науки и техники. Исследование космического пространства. – М.: ВИНТИ, 1978. – Т. 12. – С. 155.
10. Мирошниченко Л.И., Петров В.М. Динамика радиационных условий в космосе / Л.И. Мирошниченко, В.М. Петров. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.
11. Уникальная вспышка солнечных космических лучей в области энергий сотен МэВ / И.П. Безродных, К.А. Васильев, В.В. Клименко [и др.] // Космические исследования. – 1978. – Т. 15. – Вып. 6. – С. 952.
12. Исследование флуктуаций интенсивности космических лучей в стратосфере, вызываемых процессами на Солнце / А.Н. Чарахчян // УФН. – 1964. – Т. 133. – Вып. 3. – С. 3.
13. Мирошниченко Л.И. Спектр в источнике и энергетика солнечного протонного события 7 августа 1978 г. / Л.И. Мирошниченко // Геомагнетизм и аэрномия. – 1984. – Т. 24. – № 6. – С. 865 – 870.
14. Об оценках плотности энергии солнечных космических лучей у Земли / Л.И. Мирошниченко // Геомагнетизм и аэрномия. – 1984. – Т. 24. – № 6. – С. 871 – 874.
15. Распространение заряженных частиц, генерированных во вспышке 7.08.1972 / Е.И. Морозова, О.Б. Ликин, Н.Ф. Писаренко // Геомагнетизм и аэрномия. – 1977. – Т. 17. – Вып. 5. – С. 811 – 819.
16. Динамика потока энергичных солнечных частиц вблизи крупномасштабных возмущений солнечного ветра / В.Е. Тимофеев, В.В. Клименко, И.П. Безродных [и др.] // Космические исследования. – 1989. – Т. 27. – Вып. 2. – С. 272 – 279.
17. Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде / Е.Н. Паркер. – М.: Мир, 1965. – 362 с.
18. Бережко Е.Г. Генерация космических лучей ударными волнами / Е.Г. Бережко, В.К. Елшин, Г.Ф. Крымский [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1988. – 189 с.
19. Солнечный ветер и гелиосферное магнитное поле / И.С. Веселовский // Модель космоса. – М.: КДУ, 2007. – Т. 1. – С. 314 – 401.
20. Квазистационарные истечения частиц из активных областей на Солнце и корональные дыры / Э.Р. Мустель // Астрон. ж. – 1980. – Т. 57. – № 2. – С. 225 – 230.
21. Магнитогидродинамические волны в солнечном ветре / Р. Люст // Космическая газодинамика. – М.: Мир, 1972. – С. 288.
22. Румянцева А.А. Ударная волна с высвечиванием и взрывная фаза хромосферной вспышки / А.А. Румянцева // УИ Ленинградский Международный семинар по космофизике. – Л.: ФТИ, 1974. – С. 233 – 235.
23. Структура типичного нестационарного потока межпланетной плазмы по данным непосредственных измерений / К.Г. Иванов // УФН. – 1974. – Т. 114. – № 2. – С. 382 – 383.
24. Ускорение частиц до релятивистских энергий в межпланетной среде / Н.П. Чирков, А.Т. Филиппов // Изв. АН СССР. Сер. Физ. – 1977. – № 9. – С. 1776 – 1781.
25. Воздействие космических лучей на скрытую энергию атмосферы / В.Е. Тимофеев, В.Г. Григорьев, Е.И. Морозова [и др.] // Геомагнетизм и аэрномия. – 2003. – Т. 43. – № 5. – С. 683 – 687.
26. Динамика частотного спектра флуктуаций межпланетного магнитного поля и космических лучей / И.П. Безродных, В.А. Кузьмин, В.И. Козлов [и др.] // Геомагнетизм и аэрномия. – 1982. – Т. 22. – № 6. – С. 1016 – 1018.
27. Magnetic field turbulence near Interplanetary shock fronts / E.I. Morozova, N.F. Pissarenko, W. Reidler [at al.] // Preprint IWF 8406. – Austria: Space Research Institute, 1984. – 41 p.
28. The Magnetic field turbulence near Interplanetary shock fronts / E.I. Morozova, N.F. Pissarenko, Ye.G. Yeroshenko [at al.] // Twenty-Fifth Plenary Meeting Committee on Space Research. XXV COSPAR. – Austria, 1984. – P. 140 – 141.
29. Межпланетная ударная волна 1 февраля 1982 г.: магнитная структура и спектр мощности ММП / Е.И. Морозова, Л.В. Евдокимова, Е.Ю. Будник [и др.] // Космические исследования. – 1986. – Т. 24. – № 6. – С. 917 – 925.
30. Динамика спектра мощности ММП за фронтом ударной волны 1 – 2 февраля 1982 г. / Е.И. Морозова, Л.В. Евдокимова, Е.Ю. Будник [и др.] // Солнечный ветер и околоземные процессы. – М.: Наука, 1986. – С. 8 – 19.
31. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
32. Межпланетные ударные волны, генерируемые солнечными вспышками / А. Хундхаузен // Расширение короны и солнечный ветер. – М.: Мир, 1976. – С. 212.
33. Сыроватский С.И. Магнитная гидродинамика / С.И. Сыроватский // УФН. – 1957. – Т. 62. – Вып. 3. – С. 247 – 303.
34. Динамика спектра мощности частоты высывания в авроральной ионосфере в период фазы спада и минимума 22-го цикла солнечной активности / В.А. Кузьмин, В.Д. Соколов, И.П. Безродных // Геомагнетизм и аэрномия. – 2000. – Т. 40. – № 3. – С. 114 – 188.

Поступила в редакцию 15.12.2010

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. 366-38-38, 333-20-00.

Евгения Ивановна Морозова, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. 333-20-00.

Сергей Геннадьевич Казанцев, д-р техн. наук, зам. генерального директора – генерального конструктора, т. 366-12-01.

Владимир Тимофеевич Семенов, начальник лаборатории, т. 366-38-38.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.