

НАБЛЮДЕНИЯ УНЧ-ВОЛН НА СОЛНЦЕ И В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ**А.С. Потапов, Т.Н. Полюшкина, В.А. Пуляев****OBSERVATION OF ULF WAVES ON THE SUN AND IN THE EARTH'S ORBIT SOLAR WIND****A.S. Potapov, T.N. Polyushkina, V.A. Pulyaev**

Выполнен поиск признаков, указывающих на возможную связь колебаний скорости плазмы, наблюдаемых в области корональных дыр на Солнце, с колебаниями магнитного поля, регистрируемыми в межпланетной среде. За основу взят материал наблюдения колебаний на Солнце в линии FeI 6569 Å в корональной дыре. Измерения проводились на горизонтальном солнечном телескопе АСТ Саянской солнечной обсерватории. Высокоскоростной поток солнечного ветра из корональной дыры достиг орбиты Земли примерно через 60 часов. Спектры солнечных колебаний сопоставлялись со спектрами ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний межпланетного магнитного поля (ММП) в точке либрации L1, измеренных магнитометром КА ACE во время подхода к Земле переднего фронта высокоскоростного потока, несущего с собой повышенную активность УНЧ-волн. Спектры солнечных колебаний имели острый пик на частотах около 3.4–3.6 мГц. Спектр УНЧ-колебаний в солнечном ветре гораздо более сложен, он складывается из разных источников. Тем не менее в спектре УНЧ-осцилляций ММП присутствовал пик, близкий по частоте соответствующему пику солнечных колебаний. Анализ спектров УНЧ-волн, наблюдавшихся в передней части 92 высокоскоростных потоков солнечного ветра, подтвердил наличие 3- и 5-минутных колебаний в общем волновом спектре. Подчеркивается, что полученные результаты не могут служить доказательством прямой связи колебаний на Солнце с УНЧ-волнами на земной орбите, но они подтверждают возможность такой связи. Требуется дополнительное исследование, включающее в себя расчеты траекторий волн в межпланетной среде.

A search for signs of possible connection between plasma velocity oscillations observed in the region of solar coronal holes and magnetic field oscillations recorded in the interplanetary medium has been done. As a basis, observations of solar oscillations in FeI 6569 Å spectral line in a coronal hole were used. Measurements were carried out at Horizontal Automated Solar Telescope of Sayan Solar Observatory. The high speed solar wind stream ejected from the coronal hole reached the Earth's orbit approximately in 60 hours. Spectra of solar oscillations were compared with those of ultralow frequency (ULF) oscillations of the interplanetary magnetic field (IMF) in the libration point L1. The oscillations were recorded with ACE magnetometer when the leading edge of high speed stream carrying an increased activity of ULF waves reached the Earth. The spectra of solar oscillations had the sharp peak at about 3.4–3.6 mHz. The spectrum of the solar wind ULF oscillations is much more composite, as it is formed by different sources. Nevertheless, ULF oscillations of the IMF had the peak close in frequency to that of solar oscillations. The analysis of spectra of ULF waves observed in the leading edges of 92 high speed streams confirmed the presence of 3- and 5-min oscillations in the total wave spectrum. As emphasized, the results can not be a proof of connection between solar oscillations and ULF waves at the Earth's orbit but they confirm its possibility. An additional research including calculations of trajectories of IMF waves are needed.

Введение

В геофизике под ультранизкочастотными (УНЧ) колебаниями понимаются обычно электромагнитные осцилляции в диапазоне частот от долей миллигерца до единиц герц, иногда – от 1 до 10 мГц. Волны и колебания в этом частотном диапазоне наблюдаются повсеместно, от поверхности Земли до фотосферы и хромосферы Солнца. Если говорить об осцилляциях магнитного поля Земли, в диапазон УНЧ попадают все типы геомагнитных пульсаций. Их низкочастотная часть (1–5 мГц) является отражением крупномасштабных МГД-волн, распространяющихся в околоземной плазме и имеющих длину волны, сравнимую с размерами магнитосферы. Как показывают современные исследования, эти волны играют существенную роль в ускорении захваченных в геомагнитном поле частиц, в частности, приводят к появлению потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе [Elkington et al., 1999; Liu et al., 1999]. В недавней работе [Потапов и др., 2012] была прослежена связь между потоками высокоэнергичных электронов в магнитосфере и УНЧ-колебаниями в солнечном ветре и на Земле по данным за 23-й цикл солнечной активности. Волны в межпланетной среде и геомагнитные пульсации оказались достаточно тесно коррелированными, по крайней мере, на временных масштабах порядка суток. Возникает вопрос: а не связаны

ли наблюдаемые на Солнце 3–5-минутные колебания [Kobanov, Makarchik, 2004] с УНЧ-волнами, регистрируемыми в солнечном ветре вблизи земной орбиты? Вопрос этот не праздный. Известны работы [Еселевич и др., 2009], в которых по характеристикам выносимых из фотосферы Солнца магнитных полей строится прогноз магнитных возмущений на Земле. Роль наиболее геоэффективного параметра при этом играет направленная на юг компонента межпланетного магнитного поля (ММП). УНЧ-волны, если они действительно выносятся с поверхности Солнца и переносятся солнечным ветром до орбиты Земли, могут модулировать величину южной компоненты ММП, влияя на режим геомагнитных возмущений. Однако можно ожидать, что основной их эффект проявится в воздействии на динамику захваченной в геомагнитном поле радиации, в первую очередь энергичных электронов.

Целью данной работы является поиск признаков, указывающих на возможную связь колебаний скорости плазмы, наблюдаемых в области корональных дыр на Солнце, с колебаниями магнитного поля, регистрируемыми в межпланетной среде и в магнитосфере. Насколько нам известно, это первая попытка связать наблюдения 3–5-минутных колебаний на Солнце с наблюдениями УНЧ-волн в солнечном ветре и геомагнитных пульсаций на Земле.

Сразу следует заметить, что идентификация колебаний, зарегистрированных с помощью наземных оптических средств наблюдения на Солнце, с колебаниями, измеряемыми спутниковыми магнитометрами в окрестностях земной орбиты и тем более на земной поверхности, является очень трудной задачей. Действительно, измерения солнечных колебаний в миллигерцовом диапазоне выполняются спорадически, они отрывочны. Предсказать, в какой области Солнца произойдет корональный выброс массы, с которым могут быть вынесены УНЧ-колебания, пока не представляется возможным. Наиболее перспективны в этом отношении корональные дыры, геоэффективные высокоскоростные потоки из которых можно предсказывать с определенной уверенностью. Однако и в этом случае указать на поверхности Солнца конкретные область и время, откуда и когда УНЧ-волны будут донесены солнечным ветром до магнитосферы Земли, практически невозможно. Поэтому мы ограничимся сопоставлением общих характеристик волн, измеренных в области корональной дыры, с межпланетными УНЧ-волнами в головной части высокоскоростного потока солнечного ветра, пришедшего из этой корональной дыры к орбите Земли. Помимо этого, мы приведем некоторые статистические данные по спектрам наблюдаемых на орбите Земли УНЧ-колебаний.

Использованные данные

Наблюдательные данные, получаемые на горизонтальном солнечном телескопе АСТ Саянской солнечной обсерватории, представляют собой временные серии спектрограмм. Используемая высота спектральной щели составляла примерно 64 угл. сек, ширина – 1 угл. сек. Длительность экспозиции варьировалась от 0.5 до 10 с (в нашем случае – 1 с). Использовалась фотоэлектрическая система гидирования, обеспечивающая точность сопровождения в 1 угл. сек. Регистрация велась с помощью CCD-камеры Princeton Instruments (256×1024), охлажденной до –15 °С. Наведение телескопа на объект осуществлялось таким образом, что входная щель спектрографа пересекала интересующую область (в нашем случае – корональную дыру) в направлении восток–запад; 256 пикселей CCD-матрицы соответствовали 64 угл. сек. Для получения данных о скорости вдоль луча зрения использовались измерения доплеровского сдвига линии, который находился при помощи измерения смещения центра масс крыльев линии на определенном расстоянии от ядра. Для линии H α это расстояние составляет $\pm 0.5 \text{ \AA}$, для FeI 6569 \AA $\pm 0.05 \text{ \AA}$.

С солнечными данными мы сопоставляли измерения межпланетного магнитного поля (ММП) вблизи орбиты Земли магнитометрами космических аппаратов (КА) ACE и WIND, которые находились вблизи точки либрации L1 на расстоянии около 1.5 млн км от Земли вверх по потоку солнечного ветра (СВ). Использовались 16-секундные данные трех компонент ММП магнитометра КА ACE и 3-секундные данные магнитометра КА WIND. Нас интересовали УНЧ-колебания ММП, поэтому данные фильтровались с помощью полосового (1.5–6 мГц)

фильтра Марме, чтобы отсеять иррегулярные низкочастотные вариации. Для оценки амплитуды A УНЧ-волн использовались часовые среднеквадратичные значения σ_i отфильтрованных данных по каждой из компонент $i=x, y, z$. Из этих значений формировалась величина $A = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$, которая и служила оценкой амплитуды.

Результаты

В качестве конкретного события для анализа было выбрано наблюдение 5-минутных колебаний на Солнце в корональной дыре 4 августа 2005 г. Координаты наблюдаемой на Солнце области были 48° N 5° E. Измерения велись в линии FeI 6569 \AA с 04:47 до 05:47 UT 04.08.2005 г. с временным разрешением 1 с. Вдоль спектральной щели было получено 127 рядов вариаций лучевой скорости. На рис. 1 в виде осциллограмм приведен пример трех временных последовательностей значений лучевой скорости. Утолщенные линии соответствуют сглаженному ходу, полученному путем вычисления скользящего среднего по 75 точкам. На рис. 2 показаны спектры 26 отдельных произвольно выбранных временных рядов (тонкие серые линии) и спектр, полученный усреднением спектров всех 127 рядов. Виден отчетливый максимум спектральной плотности в области 3.3–3.6 мГц, что соответствует периоду колебаний 280–305 с, или 4.6–5.1 мин. Попытаемся проследить, не будут ли наблюдаться эти колебания в солнечном ветре на орбите Земли.

Корональные дыры являются источниками высокоскоростных потоков солнечного ветра. Поэтому можно предположить, что наблюдавшиеся колебания попадали вместе с солнечной плазмой в межпланетное пространство и распространялись там в виде МГД-волн. Мы не можем, конечно, указать момент времени и точку в пространстве, когда и где эти наблюдавшиеся на Солнце осцилляции должны наблюдаться в окрестности земной магнитосферы, если они будут вынесены с поверхности Солнца в солнечный ветер. Однако грубые оценки можно сделать. Если принять скорость солнечного ветра постоянной на всем протяжении от Солнца до орбиты Земли и равной 700 км/с, то плазма из корональной дыры должна достигнуть земной орбиты за 2 сут и 11.5 ч. Но известно [Engebretson et al., 1998; Потапов и др., 2012], что УНЧ-волны в структуре высокоскоростного потока опережают пик скорости СВ, поэтому их следует ждать раньше.

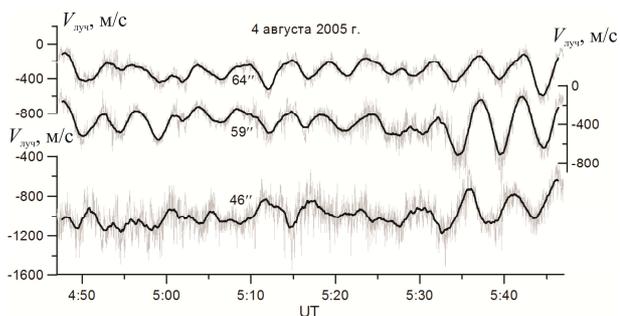


Рис. 1. Пример осциллограмм трех временных последовательностей значений лучевой скорости, измеренных в линии FeI 6569 \AA .

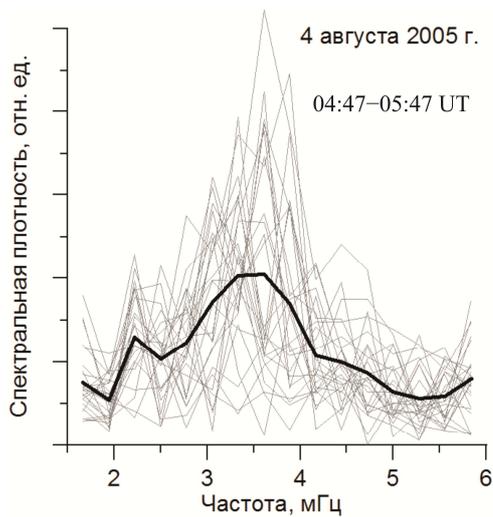


Рис. 2. Спектры 26 отдельных произвольно выбранных временных рядов (тонкие серые линии) солнечных колебаний и спектр усредненный по 127 рядам, полученным по наблюдениям вдоль всей щели спектрографа (черная линия).

По данным веб-сайта <http://www.swpc.noaa.gov> высокоскоростной поток СВ от этой корональной дыры обтекал Землю 5–7 августа 2005 г., о чем свидетельствуют измерения скорости СВ на КА ACE. На рис. 3 утолщенной черной линией показаны среднечасовые значения скорости СВ. Скорость плазмы превысила значение 400 км/с во второй половине суток 5 августа, достигла 500 км/с на рубеже 5 и 6 августа, затем несколько снизилась, потом достигла максимального для данного потока значения несколько выше 700 км/с в начале суток 7 августа. Черным треугольником на шкале времени показан момент ожидаемого прибытия к орбите Земли солнечной плазмы, если она была вынесена в момент наблюдения колебаний и транспортировалась высокоскоростным потоком с постоянной скоростью 700 км/с. Как видим, этот момент оказался близок к моменту наблюдения максимального значения скорости СВ в потоке. Серой линией показано скользящее среднее амплитуды УНЧ-волн по пяти часовым значениям A . Видно, что высокоскоростной поток принес с собой интенсификацию УНЧ-колебаний в солнечном ветре. Основной максимум амплитуды УНЧ-волн опережает пик скорости СВ примерно на 15 ч. Второе, менее значительное повышение амплитуды УНЧ-колебаний совпало по времени с основным максимумом скорости СВ.

Спектр УНЧ-колебаний в солнечном ветре достаточно сложен. Ясно, что он складывается из разных источников. Наша задача – попытаться отыскать вклад солнечных колебаний. Даже грубый анализ картины распределения характеристик колебаний вдоль спектральной щели показывает, что эти характеристики неоднородны. В некоторых точках колебания узкополосны и имеют большую амплитуду, а в других – более иррегулярны и слабы. В солнечном ветре эти точки соответствуют струям межпланетной плазмы. Можно ожидать, что в одних струях колебания солнечного происхождения будут вносить заметный вклад в общий спектр, в других – будут теряться на фоне колебаний от прочих источников. Возь-

мем для примера колебания ММП по данным магнитометра КА WIND, измеренные 6 августа 2005 г. в 08:00–12:00 UT (этот интервал времени обозначен горизонтальным отрезком на рис. 3). На рис. 4 показаны осциллограммы Z-компоненты ММП, построенные по данным измерений в точке либрации L1. Как отмечалось выше, для устранения долгопериодных вариаций ММП данные были отфильтрованы с помощью фильтра Марме с частотой обрезания 1.5 мГц. Хорошо видно, что осцилляции в солнечном ветре на орбите Земли более хаотичны по сравнению с колебаниями на поверхности Солнца. Тем не менее отчетливо заметны волны с периодом в несколько минут. Спектры колебаний для каждого часа наблюдений показаны на рис. 5 тонкими серыми линиями, а штриховой линией изображен усредненный спектр, сглаженный скользящим средним по девяти точкам. Видно, что максимум спектральной плотности в этом 4-часовом интервале лежит в области 3.0–3.5 мГц, что соответствует периодам 290–330 с, или 4.8–5.5 мин, что очень близко к периодам солнечных колебаний, наблюдавшихся 4 августа 2005 г. в области корональной дыры. Этот вывод подтверждается рис. 6, на котором приведены для сравнения усредненные профили спектральной плотности колебаний на Солнце и в солнечном ветре.

Конечно, спектр УНЧ-волн в солнечном ветре гораздо шире, чем спектр солнечных колебаний. В разные интервалы времени максимум частотного профиля амплитуды осцилляций ММП может смещаться

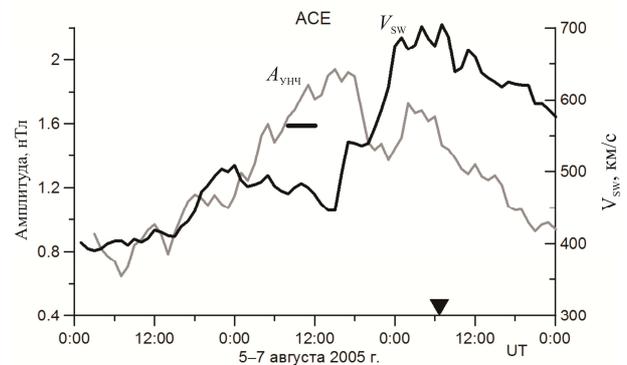


Рис. 3. Высокоскоростной поток солнечного ветра от корональной дыры, обтекавший Землю 5–7 августа 2005 г. Утолщенной черной линией показаны среднечасовые значения скорости СВ. Серой линией показано скользящее среднее амплитуды УНЧ-колебаний по пяти часовым значениям амплитуды.

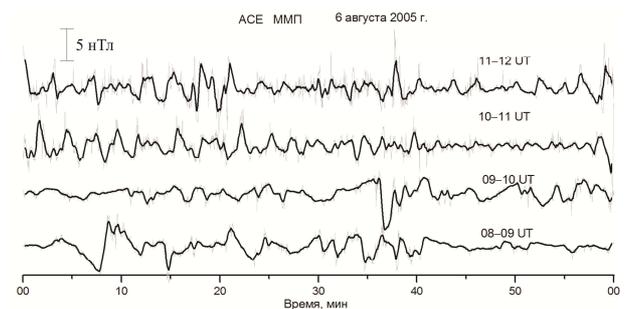


Рис. 4. Осциллограммы Z-компоненты ММП, построенные по данным измерений в точке либрации L1.

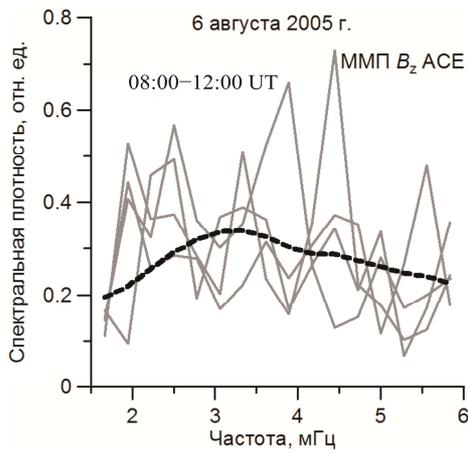


Рис. 5. Спектры колебаний для каждого часа наблюдений (тонкие серые линии). Черной штриховой линией изображен усредненный спектр, сглаженный скользящим средним по девяти точкам.

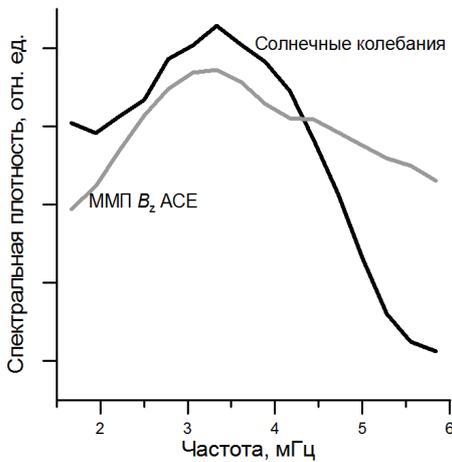


Рис. 6. Сравнение усредненных профилей спектральной плотности колебаний на Солнце (черная линия) и в солнечном ветре (серая линия).

на другие периоды. Для солнечных колебаний ситуация другая – их периоды в основном тяготеют к двум значениям, лежащим около 3 и 5 мин [Кобанов, Скляр, 2007]. Однако и для солнечного ветра указанные значения достаточно характерны.

Чтобы убедиться в этом, мы измерили спектры УНЧ-волн, наблюдавшихся в солнечном ветре во время подхода к Земле высокоскоростных потоков с повышенным уровнем УНЧ волновой активности за 1999–2006 гг.

Использовались данные магнитометра (с разрешением 16 с) и плазменного анализатора КА АСЕ, находившегося в указанный период времени в окрестности точки либрации $L1$. Отбирались события, в которых среднесуточная скорость солнечного ветра превышала 550 км/с, а среднесуточная амплитуда УНЧ-колебаний в диапазоне 1.5–6 МГц была выше 2 нТл. За восемь лет таких событий насчитывалось 92. При отборе не делалось различия между высокоскоростными потоками, пришедшими от корональных дыр, и теми, которые были вызваны корональными выбросами массы. Для каждого события выделялся суточный интервал наиболее интенсивных колебаний. В нем вычислялся спектр колебаний путем быстрого фурье-преобразования временного

ряда 16-секундных значений B_z -компоненты ММП. Фиксировалось положение характерных спектральных пиков в интересующем нас диапазоне частот. Пример спектра колебаний для события 9–10 ноября 2000 г. показан на рис. 7. В данном случае имеются три пика: 2 МГц, 3.1 МГц и 5.3 МГц. Периоды колебаний, соответствующие двум из них, $T_2=1000/3.1=323$ с=5.4 мин и $T_3=1000/5.3=189$ с=3.1 мин, близки к 3- и 5-минутным периодам, характерным для солнечных колебаний. В целом из 92 событий в 78 случаях в спектре имелись колебания в диапазоне частот 3.33 ± 0.5 МГц (периоды от 4.4 до 5.9 мин), в 83 случаях — в диапазоне 5.55 ± 0.5 МГц (периоды от 2.8 до 3.3 мин). При этом во всех 92 событиях имелись либо близкие к 3-минутным, либо близкие к 5-минутным колебания, либо и те и другие.

Обсуждение

Не вызывает никаких сомнений тот факт, что МГД-волны играют большую роль в физических процессах, протекающих на Солнце, в солнечном ветре, в магнитосферах планет. Действительно, общепризнано, что именно волны являются основным фактором, разогревающим солнечную плазму в хромосфере [Веселовский, Кропоткин, 2010]. Без учета МГД-волн, в первую очередь альфвеновских, невозможно объяснить свойства солнечного ветра. Кроме того, перед фронтами околопланетных ударных волн имеют место своеобразные волновые ореолы (foreshocks, или «предударные области») [Russell, Норре, 1981], где отраженные от фронта частицы генерируют колебания в широком интервале частот в первую очередь УНЧ-диапазона. В магнитосферах УНЧ-колебания и волны участвуют в перераспределении заряженных частиц, являющихся одним из основных механизмов их ускорения. Они к тому же вносят прямой вклад в магнитную возмущенность, не связанную с пересоединением на магнитопause [Potapov et al., 2009]. Обычно природа колебаний в каждой из перечисленных областей различна, как различны источники волн. Однако в ряде случаев имеется явная связь между осцилляциями, наблюдающимися в разных средах. Так, еще в середине 70-х гг. прошлого столетия была обоснована гипотеза о проникновении возбуждаемых перед фронтом

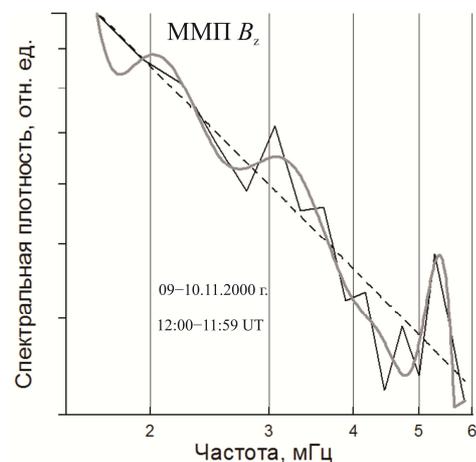


Рис. 7. Пример спектра колебаний ММП в высокоскоростном потоке солнечного ветра 9–10 ноября 2000 г.

околоземной ударной волны колебаний с частотой в десятки миллигерц внутрь магнитосферы и наблюдении их в виде геомагнитных пульсаций Pc3 на земной поверхности [Guglielmi, 1974]. Обнаруженная в работе [Потапов и др., 2012] высокая и устойчивая (на протяжении солнечного цикла) корреляция между амплитудой миллигерцовых волн в солнечном ветре и на Земле позволяет говорить о прямом проникновении этих колебаний в магнитосферу, которая при этом выступает в качестве пассивного или активного фильтра. В данной работе мы попытались найти признаки того, что наблюдаемые с помощью телескопов колебания солнечной атмосферы могут вносить свой вклад в спектр МГД-волн солнечного ветра на орбите Земли. Если это предположение будет доказано, то можно будет говорить о волновом воздействии Солнца на околоземное пространство в УНЧ-диапазоне. В отдельных случаях это может быть даже резонансное воздействие, если частота выносимых от Солнца колебаний будет совпадать с собственной частотой какого-либо из магнитосферных резонаторов.

Результаты нашего анализа дают определенные свидетельства в пользу высказанной гипотезы. Это, во-первых, наличие в спектре измеренных на орбите Земли УНЧ-колебаний в передней части пришедшего от корональной дыры высокоскоростного потока спектрального пика на той же частоте, на которой колебания наблюдались ранее, за двое суток до этого, в этой же корональной дыре, путем наблюдений на солнечном телескопе в линии FeI 6569 Å. Во-вторых, это выявленные по данным 92 высокоскоростных потоков от корональных дыр и от корональных выбросов массы спектральные пики, близкие по своей частоте к 3- и 5-минутным колебаниям, характерным для волн в атмосфере Солнца. В то же время полученные результаты нельзя считать доказательством прямой связи солнечных колебаний с волнами в солнечном ветре на орбите Земли. Спектр колебаний в точке либрации L1, где проводились измерения, оказался гораздо более сложным, чем спектр колебаний в солнечной атмосфере. Поэтому основной вывод работы может быть сформулирован следующим образом: показана возможность того, что колебания, возникающие на Солнце и наблюдаемые там в виде доплеровских смещений спектральных линий различных элементов, могут вносить вклад в спектр УНЧ-волн на орбите Земли. Чтобы сделать более определенные выводы, доказывающие или отклоняющие выдвинутую гипотезу,

нужны дополнительные исследования, включающие в себя, например, расчеты траекторий волн в межпланетной среде.

Авторы благодарны Н.И. Кобанову, В.Г. Файнштейну, А.В. Гульельми и Б.И. Клайну за полезные обсуждения, а также Ч.У. Смиту (C.W. Smith) за открытый доступ к данным магнитометра КА ACE. Работа была выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 10-05-00661 и 12-05-00007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Веселовский И.С., Кропоткин А.П. Физика межпланетного и околоземного пространства: Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2010. 116 с.

Еселевич В.Г., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. и др. Прогноз скорости квазистационарного солнечного ветра и интенсивности вызываемых им геомагнитных возмущений // Космические исследования. 2009. Т. 47, № 2. С. 114–133.

Кобанов Н.И., Скляр А.А. Периодические процессы и движения плазмы в солнечных корональных дырах // Астрон. журн. 2007. Т. 84, № 9. С. 857–864.

Потапов А.С., Цэгмэд Б., Рыжакова Л.В. Связь потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите с уровнем УНЧ-активности на поверхности Земли и в солнечном ветре в 23-м цикле солнечной активности // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 2. С. 130–146.

Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A. Acceleration of relativistic electrons via drift resonance interaction with toroidal mode Pc5 ULF oscillations // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. P. 3273–3276.

Engbreton M., Glassmeier K.H., Stellmacher M., et al. The dependence of high latitude Pc5 wave power on solar wind velocity and on the phase of high speed solar wind streams // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 26271–26283.

Guglielmi A. Diagnostics of the magnetosphere and interplanetary medium by means of pulsations // Space Sci. Rev. 1974. V. 16, N 3. P. 331–345.

Kobanov N.I., Makarchik D.V. Propagating waves in the sunspot umbra chromospheres // Astron. Astrophys. 2004. V. 424. P. 671–675.

Liu W.W., Rostoker G., Baker D.N. Internal acceleration of relativistic electrons by large amplitude ULF pulsations // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 17391–17408.

Potapov A.S., Tsegmed B., Polyushkina T.N. Contribution of global Pc5 oscillations to magnetic disturbance during geomagnetic storms // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49, N 8. P. 1182–1188.

Russell C.T., Hoppe M.M. Upstream waves and particles // Space Sci. Rev. 1981. V. 8, N 6. P. 615–617.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск