УДК 523.9, 523.98

НАБЛЮДЕНИЯ УНЧ-ВОЛН НА СОЛНЦЕ И В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

OBSERVATION OF ULF WAVES ON THE SUN AND AT THE EARTH'S ORBIT SOLAR WIND

А.С. Петров, Т.Н. Акимова, В.А. Василенко

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

A.S. Petrov, T.N. Akimova, V.A. Vasilenko

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Если авторы из разных организаций, то

А.В. Иванов[1], И.П. Петров[2]

[1]*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия, Ivanov@mail.ru*

[2]*Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, Ярославская обл., Россия, petrov@yandex.ru*

A.V. Ivanov[1], I.P. Petrov[2]

[1]*Schmidt United Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia*

[2]*Borok Geophysical Observatory of IPE RAS, Borok, Russia*

Сокращенное название: Наблюдения УНЧ-волн

Автор для переписки: Петров Алексей Степанович, e-mail petrovas@mail.ru

Аннотация. 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. Требуются дополнительные исследования, включающие в себя расчеты траекторий волн в межпланетной среде.

Abstract. 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 various sources. Nevertheless, ULF oscillations of 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.

Ключевые слова: УНЧ-волны, солнечный ветер.

Keywords: IMF waves, solar wind.

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.

1. Используемые 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 °C. 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 Hα это расстояние составляет ±0.5 Å, для FeI 6569 Å ±0.05 Å.

…

5. 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 48º N 5º E. Измерения велись в линии FeI 6569 Å 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.

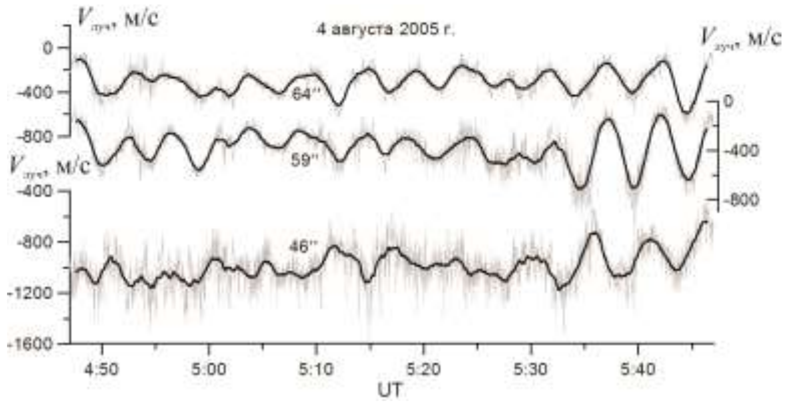

Рис. 1. Пример осциллограмм трех временных последовательностей значений лучевой скорости, измеренных в линии FeI 6569 Å

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.

Таблица 2. Средние отношения [O]/[N_2] и [O_2]/[O] в период 2014–2017 гг. (Иркутск)

Год	$F10.7$	$[O]/[N_2]$							
		зима		весна		лето		осень	
		возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.
2014	146	0.331	0.343	0.240	0.280	0.179	0.191	0.313	0.327
σ, 2014		0.085	0.060	0.054	0.064	0.035	0.035	0.049	0.082
2015	118	0.276	0.414	0.216	0.229	0.164	0.171	0.218	0.244
σ, 2015		0.059	0.074	0.051	0.057	0.030	0.028	0.062	0.078
2016	89	0.289	0.314	0.196	0.217	0.136	0.152	0.181	0.240
σ, 2016		0.074	0.084	0.056	0.058	0.022	0.028	0.059	0.049
2017	77	0.229	0.277	0.160	0.170	0.124	0.140	0.165	0.250
σ, 2017		0.068	0.063	0.042	0.032	0.023	0.040	0.071	0.076
		$[O_2]/[O]$							
2014	146	0.345	0.321	0.559	0.465	0.706	0.592	0.401	0.363
σ, 2014		0.134	0.109	0.160	0.147	0.222	0.191	0.071	0.059
2015	118	0.396	0.338	0.528	0.470	0.765	0.652	0.490	0.289
σ, 2015		0.108	0.090	0.170	0.173	0.248	0.203	0.074	0.083
2016	89	0.412	0.355	0.686	0.670	0.809	0.795	0.494	0.376
σ, 2016		0.134	0.130	0.127	0.140	0.284	0.294	0.056	0.044
2017	77	0.468	0.349	0.712	0.571	0.860	0.819	0.520	0.389
σ, 2017		0.189	0.160	0.156	0.204	0.297	0.335	0.195	0.203

…

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, Hoppe, 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, являются одним из основных механизмов их ускорения. Они к тому же вносят прямой вклад в магнитную возмущенность, не связанную с пересоединением на магнитопаузе [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 околоземной ударной волны колебаний с частотой в десятки миллигерц внутрь магнитосферы и наблюдении их в виде геомагнитных пульсаций Pc3 на земной поверхности [Guglielmi, 1974].

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

Бернгардт О.И., Куркин В.И., Кушнарев Д.С. и др. Декаметровые радары ИСЗФ СО РАН. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 2, с. 79–92. https://doi.org/10.12737/szf-62202006 / Berngardt O., Kurkin V., Kushnarev D., et al. ISTP SB RAS decameter radars. *Sol.-Terr. Phys*. 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 63–73. https://doi.org/10.12737/stp-62202006.

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. https://doi.org/10.1134/S0010952509020026.

Кобанов Н.И., Скляр А.А. Периодические процессы и движения плазмы в солнечных корональных дырах. *Астрон. журнал*. 2007, т. 84, № 9, с. 857–864. https://doi.org/10.1134/S1063772907090077.

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. https://doi.org/10.1134/S0010952512020086.

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, vol. 26, pp. 3273–3276.

Engebretson 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, vol. 103, pp. 26271–26283.

Guglielmi A. Diagnostics of the magnetosphere and interplanetary medium by means of pulsations. *Space Sci. Rev*. 1974, vol. 16, iss. 3, pp. 331–345.

Kobanov N.I., Makarchik D.V. Propagating waves in the sunspot umbra chromospheres. *Astron. Astrophys*. 2004, vol. 424, pp. 671–675. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20035960.

REFERENCES

Berngardt O., Kurkin V., Kushnarev D., et al. ISTP SB RAS decameter radars. *Sol.-Terr. Phys*. 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 63–73. https://doi.org/10.12737/stp-62202006.

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, vol. 26, pp. 3273–3276.

Engebretson M., Glassmeier K.H., Stellmacher M., Hughes W.J., Lühr H. 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, vol. 103, pp. 26271–26283.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V., Eselevich M.V., Kashapova L.K. Forecasting the velocity of quasi-stationary solar wind and the intensity of geomagnetic disturbances produced by it. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2009, vol. 47, iss. 2, pp. 114–133. (In Russian). https://doi.org/10.1134/S0010952509020026

Guglielmi A. Diagnostics of the magnetosphere and interplanetary medium by means of pulsations. *Space Sci. Rev.* 1974, vol. 16, iss. 3, pp. 331–345.

Kobanov N.I., Makarchik D.V. Propagating waves in the sunspot umbra chromospheres. *Astron. Astrophys*. 2004, vol. 424, pp. 671–675. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20035960.

Kobanov N.I., Sklyar A.A. Forecasting the velocity of quasi-stationary solar wind and the intensity of geomagnetic disturbances produced by it. *Astronomicheskii zhurnal* [Astronomy Rep.]. 2007, vol. 51, iss. 9, pp. 773–779. (In Russian). https://doi.org/10.1134/S1063772907090077.

Potapov A.S., Tsegmed B., Ryzhakova L.V. Relationship between the fluxes of relativistic electrons at geosynchronous orbit and the level of ULF activity on the Earth's surface and in the solar wind during the 23rd solar activity cycle. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2012, vol. 50, iss. 2, pp. 124–140. (In Russian). https://doi.org/10.1134/S0010952512020086.

Подписи к рисункам к статье Петров А.С., Акимова Т.Н., Василенко В.А.
«Наблюдения УНЧ-волн на Солнце и в солнечном ветре на орбите Земли»

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

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).

Рис. 3. Высокоскоростной поток солнечного ветра от корональной дыры, обтекавший Землю 5–7 августа 2005 г. Утолщенная черная линия — среднечасовые значения скорости СВ; серая линия — скользящее среднее амплитуды УНЧ-колебаний по пяти часовым значениям амплитуды.