

1 УДК 523.9, 523.98

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

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

6
7 **А.С. Петров, Т.Н. Акимова, В.А. Василенко**

8 *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

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

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

11

12 Если авторы из разных организаций, то

13 **А.В. Иванов¹, И.П. Петров²**

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

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

18

19 **A.V. Ivanov¹, I.P. Petrov²**

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

21 ²*Borok Geophysical Observatory of IPE RAS, Borok, Russia*

22

23 Сокращенное название: Наблюдения УНЧ-волн

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

25

26 **Аннотация.** Выполнен поиск признаков, указывающих на возможную связь
27 колебаний скорости плазмы, наблюдаемых в области корональных дыр на
28 Солнце, с колебаниями магнитного поля, регистрируемыми в межпланетной
29 среде. За основу взят материал наблюдения колебаний на Солнце в линии FeI
30 6569 Å в корональной дыре. Измерения проводились на горизонтальном
31 солнечном телескопе АСТ Саянской солнечной обсерватории.
32 Высокоскоростной поток солнечного ветра из корональной дыры достиг
33 орбиты Земли примерно через 60 часов. Спектры солнечных колебаний
34 сопоставлялись со спектрами ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний
35 межпланетного магнитного поля (ММП) в точке либрации L1, измеренных
36 магнитометром КА ACE во время подхода к Земле переднего фронта
37 высокоскоростного потока, несущего с собой повышенную активность УНЧ-
38 волн. Спектры солнечных колебаний имели острый пик на частотах около 3.4–
39 3.6 мГц. Спектр УНЧ-колебаний в солнечном ветре гораздо более сложен, он
40 складывается из разных источников. Тем не менее в спектре УНЧ-осцилляций

41 ММП присутствовал пик, близкий по частоте соответствующему пику солнечных
42 колебаний. Анализ спектров УНЧ-волн, наблюдавшихся в передней части 92
43 высокоскоростных потоков солнечного ветра, подтвердил наличие 3- и 5-
44 минутных колебаний в общем волновом спектре. Подчеркивается, что
45 полученные результаты не могут служить доказательством прямой связи
46 колебаний на Солнце с УНЧ-волнами на земной орбите, но они подтверждают
47 возможность такой связи. Требуются дополнительные исследования,
48 включающие в себя расчеты траекторий волн в межпланетной среде.

49

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

70

71 **Ключевые слова:** УНЧ-волны, солнечный ветер.

72 **Keywords:** IMF waves, solar wind.

73

74

75 **ВВЕДЕНИЕ**

76 В геофизике под ультранизкочастотными (УНЧ) колебаниями понимаются
77 обычно электромагнитные осцилляции в диапазоне частот от долей миллигерца
78 до единиц герц, иногда – от 1 до 10 мГц. Волны и колебания в этом частотном
79 диапазоне наблюдаются повсеместно, от поверхности Земли до фотосферы и
80 хромосферы Солнца. Если говорить об осцилляциях магнитного поля Земли, в
81 диапазон УНЧ попадают все типы геомагнитных пульсаций. Их низкочастотная
82 часть (1–5 мГц) является отражением крупномасштабных МГД-волн,
83 распространяющихся в околоземной плазме и имеющих длину волны, сравнимую
84 с размерами магнитосферы. Как показывают современные исследования, эти
85 волны играют существенную роль в ускорении захваченных в геомагнитном поле
86 частиц, в частности, приводят к появлению потоков релятивистских электронов
87 во внешнем радиационном поясе [Elkington et al., 1999; Liu et al., 1999]. В
88 недавней работе [Потапов и др., 2012] была прослежена связь между потоками
89 высокоэнергичных электронов в магнитосфере и УНЧ-колебаниями в солнечном
90 ветре и на Земле по данным за 23-й цикл солнечной активности. Волны в
91 межпланетной среде и геомагнитные пульсации оказались достаточно тесно
92 коррелированными, по крайней мере, на временных масштабах порядка суток.
93 Возникает вопрос: а не связаны ли наблюдаемые на Солнце 3–5-минутные
94 колебания [Kobanov, Makarchik, 2004] с УНЧ-волнами, регистрируемыми в
95 солнечном ветре вблизи земной орбиты? Вопрос этот не праздный. Известны
96 работы [Еселевич и др., 2009], в которых по характеристикам выносимых из
97 фотосферы Солнца магнитных полей строится прогноз магнитных возмущений на
98 Земле. Роль наиболее геоэффективного параметра при этом играет направленная
99 на юг компонента межпланетного магнитного поля (ММП). УНЧ-волны, если
100 они действительно выносятся с поверхности Солнца и переносятся солнечным
101 ветром до орбиты Земли, могут модулировать величину южной компоненты
102 ММП, влияя на режим геомагнитных возмущений. Однако можно ожидать, что
103 основной их эффект проявится в воздействии на динамику захваченной в
104 геомагнитном поле радиации, в первую очередь энергичных электронов.

105

106 **1. Используемые данные**

107 Наблюдательные данные, получаемые на горизонтальном солнечном
108 телескопе АСТ Саянской солнечной обсерватории, представляют собой
109 временные серии спектрограмм. Используемая высота спектральной щели
110 составляла примерно 64 угл. сек, ширина – 1 угл. сек. Длительность экспозиции

111 варьировалась от 0.5 до 10 с (в нашем случае – 1 с). Использовалась
112 фотоэлектрическая система гидирования, обеспечивающая точность сопровождения
113 в 1 угл. сек. Регистрация велась с помощью CCD-камеры Princeton Instruments
114 (256×1024), охлажденной до –15 °С. Наведение телескопа на объект осуществлялось
115 таким образом, что входная щель спектрографа пересекала интересующую область
116 (в нашем случае – корональную дыру) в направлении восток–запад; 256 пикселей
117 CCD-матрицы соответствовали 64 угл. сек. Для получения данных о скорости
118 вдоль луча зрения использовались измерения доплеровского сдвига линии,
119 который находился при помощи измерения смещения центра масс крыльев линии
120 на определенном расстоянии от ядра. Для линии Na это расстояние составляет ± 0.5
121 Å, для FeI 6569 Å ± 0.05 Å.

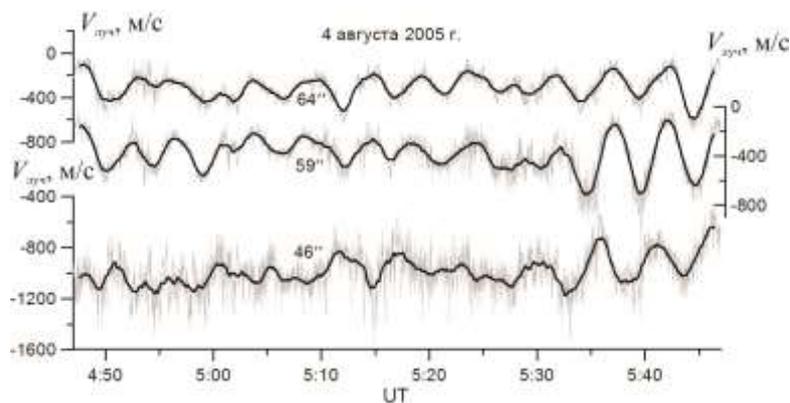
122 ...

123 5. Результаты

124 В качестве конкретного события для анализа было выбрано наблюдение 5-
125 минутных колебаний на Солнце в корональной дыре 4 августа 2005 г. Координаты
126 наблюдаемой на Солнце области были 48° N 5° E. Измерения велись в линии FeI
127 6569 Å с 04:47 до 05:47 UT 04.08.2005 г. с временным разрешением 1 с. Вдоль
128 спектральной щели было получено 127 рядов вариаций лучевой скорости. На рис.
129 1 в виде осциллограмм приведен пример трех временных последовательностей
130 значений лучевой скорости. Утолщенные линии соответствуют сглаженному
131 ходу, полученному путем вычисления скользящего среднего по 75 точкам. На рис.
132 2 показаны спектры 26 отдельных произвольно выбранных временных рядов
133 (тонкие серые линии) и спектр, полученный усреднением спектров всех 127 рядов.
134 Виден отчетливый максимум спектральной плотности в области 3.3–3.6 мГц, что
135 соответствует периоду колебаний 280–305 с, или 4.6–5.1 мин. Попытаемся
136 проследить, не будут ли наблюдаться эти колебания в солнечном ветре на орбите
137 Земли.

138 Корональные дыры являются источниками высокоскоростных потоков
139 солнечного ветра. Поэтому можно предположить, что наблюдавшиеся колебания
140 попадали вместе с солнечной плазмой в межпланетное пространство и
141 распространялись там в виде МГД-волн. Мы не можем, конечно, указать момент
142 времени и точку в пространстве, когда и где эти наблюдавшиеся на Солнце
143 осцилляции должны наблюдаться в окрестности земной магнитосферы, если они
144 будут вынесены с поверхности Солнца в солнечный ветер. Однако грубые оценки
145 можно сделать. Если принять скорость солнечного ветра постоянной на всем

146 протяжении от Солнца до орбиты Земли и равной 700 км/с, то плазма из
147 корональной дыры должна достигнуть земной орбиты за 2 сут и 11.5 ч. Но
148 известно [Engebretson et al., 1998; Потапов и др., 2012], что УНЧ-волны в
149 структуре высокоскоростного потока опережают пик скорости СВ, поэтому их
150 следует ждать раньше.



151

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

154

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

172 Таблица 2. Средние отношения $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ в период 2014–2017 гг.
173 (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

174

175

...

176

ОБСУЖДЕНИЕ

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

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, Norpe, 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 [Potarov 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

195 в десятки миллигерц внутри магнитосферы и наблюдении их в виде геомагнитных
196 пульсаций Pc3 на земной поверхности [Guglielmi, 1974].

197 Авторы благодарны Н.И. Кобанову, В.Г. Файнштейну, А.В. Гульельми и
198 Б.И. Клайну за полезные обсуждения, а также Ч.У. Смиту (C.W. Smith) за
199 открытый доступ к данным магнитометра КА ACE. Работа была выполнена при
200 частичной поддержке грантов РФФИ № 10-05-00661 и № 12-05-00007.

201

202 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

208 Еселевич В.Г., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. и др. Прогноз скорости
209 квазистационарного солнечного ветра и интенсивности вызываемых им
210 геомагнитных возмущений. *Космические исследования*. 2009, т. 47, № 2, с. 114–
211 133. <https://doi.org/10.1134/S0010952509020026>.

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

215 Потапов А.С., Цэгмэд Б., Рыжакова Л.В. Связь потоков релятивистских
216 электронов на геостационарной орбите с уровнем УНЧ-активности на
217 поверхности Земли и в солнечном ветре в 23-м цикле солнечной активности.
218 *Космические исследования*. 2012, т. 50, № 2, с. 130–146.
219 <https://doi.org/10.1134/S0010952512020086>.

220 Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A. Acceleration of relativistic electrons via drift
221 resonance interaction with toroidal mode Pc5 ULF oscillations. *Geophys. Res. Lett.*
222 1999, vol. 26, pp. 3273–3276. <https://doi.org/10.1029/1999GL003659>.

223 Engebretson M., Glassmeier K.H., Stellmacher M., et al. The dependence of high
224 latitude Pc5 wave power on solar wind velocity and on the phase of high speed solar
225 wind streams. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, pp. 26271–26283.
226 <https://doi.org/10.1029/97JA03143>.

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

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

232

233 REFERENCES

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

236 Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A. Acceleration of relativistic electrons via drift
237 resonance interaction with toroidal mode Pc5 ULF oscillations. *Geophys. Res. Lett.*
238 1999, vol. 26, pp. 3273–3276.

239 Engebretson M., Glassmeier K.H., Stellmacher M., Hughes W.J., Lühr H. The
240 dependence of high latitude Pc5 wave power on solar wind velocity and on the phase
241 of high speed solar wind streams. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, pp. 26271–26283.
242 <https://doi.org/10.1029/97JA03143>.

- 243 Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V., Eselevich M.V., Kashapova L.K.
244 Forecasting the velocity of quasi-stationary solar wind and the intensity of
245 geomagnetic disturbances produced by it. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.].
246 2009, vol. 47, iss. 2, pp. 114–133. (In Russian).
247 <https://doi.org/10.1134/S0010952509020026>
- 248 Guglielmi A. Diagnostics of the magnetosphere and interplanetary medium by means of
249 pulsations. *Space Sci. Rev.* 1974, vol. 16, iss. 3, pp. 331–345.
- 250 Kobanov N.I., Makarchik D.V. Propagating waves in the sunspot umbra
251 chromospheres. *Astron. Astrophys.* 2004, vol. 424, pp. 671–675.
252 <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20035960>.
- 253 Kobanov N.I., Sklyar A.A. Forecasting the velocity of quasi-stationary solar wind
254 and the intensity of geomagnetic disturbances produced by it. *Astronomicheskii*
255 *zhurnal* [Astronomy Rep.]. 2007, vol. 51, iss. 9, pp. 773–779. (In Russian).
256 <https://doi.org/10.1134/S1063772907090077>.
- 257 Potapov A.S., Tsegmed B., Ryzhakova L.V. Relationship between the fluxes of
258 relativistic electrons at geosynchronous orbit and the level of ULF activity on the
259 Earth's surface and in the solar wind during the 23rd solar activity cycle. *Kosmicheskie*
260 *issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2012, vol. 50, iss. 2, pp. 124–140. (In Russian).
261 <https://doi.org/10.1134/S0010952512020086>.
262
263
- 264 Подписи к рисункам к статье Петров А.С., Акимова Т.Н., Василенко В.А.
265 «Наблюдения УНЧ-волн на Солнце и в солнечном ветре на орбите Земли»
266
- 267 *Рис. 1.* Пример осциллограмм трех временных последовательностей значений
268 лучевой скорости, измеренных в линии FeI 6569 Å.
- 269 *Рис. 2.* Спектры 26 отдельных произвольно выбранных временных рядов (тонкие
270 серые линии) солнечных колебаний и спектр, усредненный по 127 рядам,
271 полученным по наблюдениям вдоль всей щели спектрографа (черная линия).
- 272 *Рис. 3.* Высокоскоростной поток солнечного ветра от корональной дыры,
273 обтекавший Землю 5–7 августа 2005 г. Утолщенная черная линия —
274 среднечасовые значения скорости СВ; серая линия — скользящее среднее
275 амплитуды УНЧ-колебаний по пяти часовым значениям амплитуды.