

УДК 550.2, 551.510.535

## ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ МГД-ПРИРОДЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ. СЕЗОННЫЕ И ШИРОТНЫЕ ВАРИАЦИИ ИХ ПАРАМЕТРОВ

И.К. Едемский, С.В. Воейков, Ю.В. Ясюкевич

### MHD-NATURE SOLAR TERMINATOR WAVE DISTURBANCES. SEASONAL AND LATITUDINAL VARIATIONS OF THEIR PARAMETERS

I.K. Edemskiy, S.V. Voeykov, Yu.V. Yasyukevich

В данной работе представлены сезонные особенности регистрации волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором, полученные по данным наиболее плотной на сегодня сети GPS-приемников GEONET, расположенной в Японии. Сезонное изменение времени начала регистрации ВП находится в согласии с гипотезой о магнитогиродинамической (МГД) природе ВП, предложенной ранее. Важным подтверждением этой гипотезы является наблюдение изменения начала регистрации ВП с изменением широты. В северном регионе Японии (38–45° N) время между началом регистрации ВП и приходом СТ больше, чем в южном (30–35° N), что соответствует разнице между временами прихода СТ в локальную и магнитосопряженную точки в данных регионах. На представленных в работе динамических спектрах различимы две области повышения спектральной мощности, что является указанием на генерацию ВП различными локальными источниками.

This paper presents seasonal registration features of wave packets (WP), generated by solar terminator (ST). Results achieved using data of most dense GPS-site network GEONET, which is located in Japan. Seasonal variation of WPs registration start is in agreement with magnetohydrodynamic (MHD) hypothesis of WP nature, which was suggested before. Important evidence of this hypothesis is observed variation of WP registration time with latitude. In the North region of Japan (38–45°N) time period between WP registration start and the ST appearance over the observation point is longer than in South region (30–35°N). That fact is in correspondence with time period between ST appearance in magnetoconjugate and in observation points for those regions. Dynamic spectra of total electron content variations demonstrate two areas of spectral power growth. That is indication of WP generation by different local sources.

Ранее с использованием данных измерений полного электронного содержания были обнаружены волновые пакеты (ВП), установлен факт их генерации солнечным терминатором (СТ), а также найдены указания в пользу их магнитогиродинамической природы. В работе приведены распределения количества ВП для весны, лета и осени 2008 г.

В работе [Afraimovich, 2008] впервые по данным GPS для нескольких суток в осенне-зимний период было получено доказательство существования волновой структуры, порожденной солнечным терминатором (СТ). Было получено, что среднemasштабные волновые возмущения, генерируемые солнечным терминатором, проявляются в виде волновых пакетов (ВП). Впоследствии было выявлено, что ВП регистрируются не только в момент прохождения СТ в области наблюдения, но и при его прохождении в магнитосопряженной области [Afraimovich et al., 2009]. Для объяснения данных наблюдений была предложена модель медленного магнитного звука (ММЗ) [Leonovich, 2010], дававшая неплохое согласие и предполагавшая магнитогиродинамический механизм образования ВП в момент прохождения СТ в магнитосопряженной области.

Тем не менее, остался ряд существенных вопросов, требовавших рассмотрения. Так, представляет интерес значительное время регистрации ВП: в летнее время в Японии ВП регистрируются в течение 6–8 ч вблизи времени прохождения СТ, тогда как модель предполагает, что длительность ВП составляет примерно несколько часов. Также по-прежнему неясно, все ли ВП имеют МГД-природу или какая-то их часть связана с генерацией солнечным терминатором акустико-гравитационной волны, как это обычно предполагается в литературе. Кроме того,

представляют интерес особенности морфологии ВП в зависимости от сезона и региона регистрации.

Значительную длительность наблюдения ВП можно объяснить, предположив, что общая длительность наблюдения складывается из двух частей. На рис. 1, а представлена геометрия положения линии вечернего терминатора летом и зимой. В летнее время СТ появляется сначала в Южном полушарии. При его появлении в некоторой области Б на магнитной силовой линии, проходящей через эту область, начинается генерация волнового возмущения. Это возмущение распространяется вдоль магнитной силовой линии в Северное полушарие и детектируется в сопряженной точке А в виде ВП. Спустя время  $\Delta T$  терминатор приходит в точку А, вызывая появление возмущения на данной линии вторично. Эти возмущения также будут регистрироваться в виде волновых пакетов в точке А. Таким образом, суммарно волновые пакеты в точке А будут наблюдаться достаточно длительное время.

Разность  $\Delta T$  времени прихода СТ в точку наблюдения и магнитосопряженную область для меридиана Япония–Австралия для лета и зимы представлена на рис. 1, б. Положительное значение  $\Delta T$  означает, что терминатор сначала приходит в локальную точку, а затем – в магнитосопряженную. По мере удаления точки наблюдения от магнитного экватора  $\Delta T$  монотонно возрастает. Если наблюдаемые эффекты, связываемые с солнечным терминатором, продемонстрируют аналогичное широтное поведение, это станет дополнительным и достаточно сильным аргументом в пользу гипотезы о МГД-механизме генерации СТ волновых пакетов. Для проверки вышеизложенных предположений мы выбрали два региона в Японии, условно названных «Юг» (30–35° N; 130–140° E) и

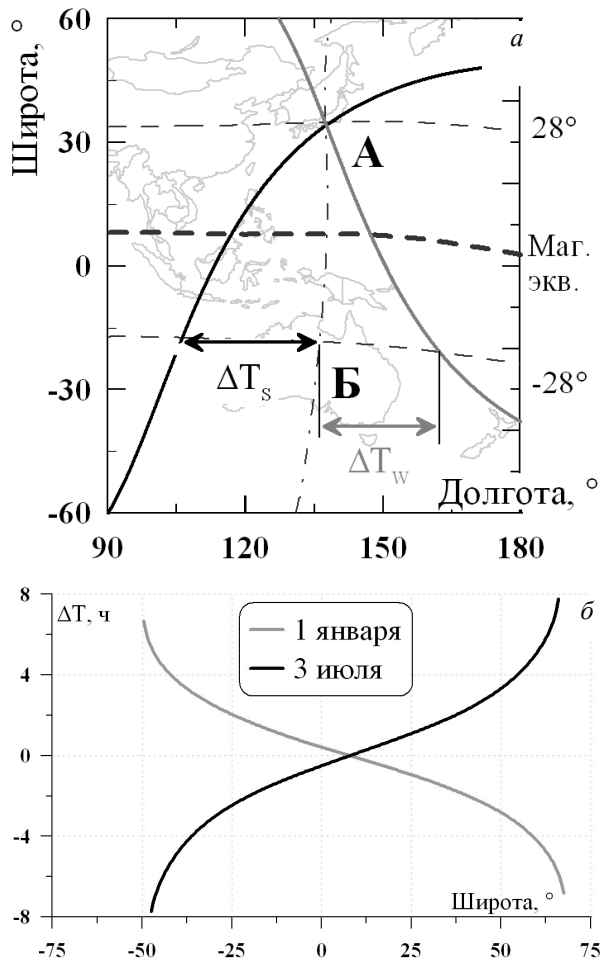


Рис. 1. Положение вечернего СТ летом (черная кривая) и зимой (серая кривая) (а). Штриховыми линиями отмечены магнитный экватор и область, отстоящая от него на  $28^\circ$  магнитной широты. Штрихпунктирная линия отмечает положение магнитного меридиана вблизи. Изменение с широтой разности  $\Delta T$  между временем прихода вечернего терминатора в локальную и магнитосопряженную точку, рассчитанное для долготы  $140^\circ$  E (б).

и «Север» ( $38\text{--}45^\circ$  N;  $138\text{--}145^\circ$  E) и содержащих 465 и 286 станций GPS соответственно. Все станции принадлежат региональной Японской сети GEONET, данные которой доступны в сети Интернет ([ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS\\_products/](ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS_products/)) в стандартном формате RINEX. Стандартная технология GPS предоставляет возможность детектирования волновых возмущений по данным фазовых измерений ПЭС  $I(t)$  вдоль луча приемник–ИСЗ [Hofmann-Wellenhof B. et al., 1992; Afraimovich et al., 2003].

Данные ПЭС, полученные на станциях указанных регионов, фильтровались в диапазоне 2–30 мин и использовались для расчета динамических спектров вариаций ПЭС над этими двумя регионами. Связь генерации волновых пакетов с прохождением СТ удобно наблюдать в системе локального времени терминатора (ЛВТ):  $dT = t_{\max} - t_{\text{ст}}$ , где  $t_{\max}$  – момент регистрации максимума пакета в выбранной точке,  $t_{\text{ст}}$  – время прихода терминатора на выбранной высоте  $h = 300$  км над данной точкой [Afraimovich et al., 2010]. Удобство данного подхода заключается в исключении из рассмотрения конкретных абсолютных координат точек измерения.

На рис. 2 представлены динамические спектры вариаций ПЭС в системе локального времени вечернего СТ, полученные усреднением 597 612 и 1 036 117 одиночных спектров по данным регионов «Север» (рис. 2, а) и «Юг» (рис. 2, б) за 2–4 июля 2008 г. Линиями отмечено время прохождения терминатора в магнитосопряженной области. Хорошо различимы области усиления спектральной мощности вариаций ПЭС в диапазоне частот, соответствующем волновым пакетам. Видно, что в обоих случаях начало регистрации данных вариаций практически совпадает с моментом прохождения СТ в магнитосопряженной области. Регистрация волновых пакетов в северном регионе начинается примерно за три часа до прохождения СТ над точкой регистрации, в южном – примерно за два часа.

Помимо спектральных характеристик вариаций ПЭС интерес представляют количественные характеристики волновых пакетов. Технология глобального поиска волновых пакетов, разработанная в ИСЗФ СО РАН, позволяет отбирать (из значительного числа экспериментальных данных и в автоматическом режиме) возмущения ПЭС, подходящие под классификацию ВП [Afraimovich et al., 2003]. Сначала выбираются вариации ПЭС, значение СКО которых превышает заданное пороговое значение  $\varepsilon = 0.05$  TECU. Затем для каждого фильтрованного ряда проверяется степень «узкополосности» колебаний ПЭС: отношение суммарной спектральной амплитуды в заданной полосе частот  $\delta F$  в окрестности максимальной амплитуды  $S_{\max}$  к суммарной спектральной амплитуде за пределами полосы  $\delta F$  должно превышать заданный порог  $R_{\min} = 2$ . При выполнении данных условий вариация ПЭС относится к классу волновых пакетов.

Для исследования сезонных изменений количества волновых пакетов в регионах использовались данные за 87 сут 2008 г: 18 сут весны, 41 – лета, 28 – осени. В таблице представлено среднее число ВП  $\langle N \rangle = N_{\text{pack}} / (N_{\text{days}} N_{\text{sites}})$ , зарегистрированных в различные сезоны в каждом из регионов. Здесь  $N_{\text{pack}}$  – число зарегистрированных ВП;  $N_{\text{days}}$  – количество дней, в течение которых производилась измерения;  $N_{\text{sites}}$  – число станций в соответствующем регионе. Таким образом,  $\langle N \rangle$  характеризует среднее число пакетов, приходящихся на одну станцию в одни сутки.

Из таблицы видно, что в среднем за весь анализи-

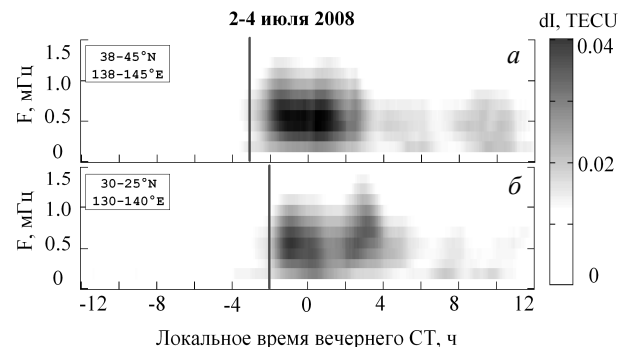


Рис. 2. Динамические спектры вариаций ПЭС в регионах «Север» (а) и «Юг» (б) в системе локального времени вечернего СТ. Линиями отмечено время прохождения СТ в магнитосопряженной области.

Среднее число ВП  $\langle N \rangle$  для разных сезонов в двух регионах Японии

	Весна	Лето	Осень	Все сезоны
Южный регион	3.1	3.6	1.3	2.8
Северный регион	1.8	4.7	1.2	3

руемый период времени (колонка «Все сезоны») на одну станцию за одни сутки пришлось примерно по три пакета, как в южном, так и в северном регионе. Сезонное изменение числа волновых пакетов сходно для обоих регионов. Наибольшее их количество наблюдается летом, наименьшее – осенью. В весеннее время в южном регионе было зарегистрировано в 1.7 раза больше ВП, чем в северном, а летом в северном регионе их было в 1.3 раза больше, чем в южном.

Распределение количества ВП в системе времени вечернего терминатора представлено на рис. 3. В летний период регистрация ВП в обоих регионах начинается до прихода СТ: в южном примерно за два часа, в северном – примерно за три часа. Летом наибольшее число ВП на севере Японии наблюдается за час до СТ, на юге – вместе с приходом терминатора. В летнем распределении  $P(\text{ЛВТ})$  в южном регионе присутствует второй максимум – через три часа после СТ. Весной число наблюдаемых ВП на севере Японии достигает максимума через полчаса после СТ, на юге – примерно через час после СТ. Осенью распределение  $P(\text{ЛВТ})$  для обоих регионов имеет два максимума с интервалом между ними ~4 ч. В южном регионе они регистрируются примерно на 1 ч раньше, чем в северном. Примечательно, что на севере более выражен первый максимум, на юге – второй.

Наблюдаемое по представленным распределениям и динамическим спектрам изменение начала регистрации волновых пакетов с изменением широты является важным подтверждением гипотезы о МГД-механизме их генерации. В представленных динамических спектрах можно различить две области генерации ВП – связанную с СТ в магнитосопреженной и в локальной точках. Это же можно видеть в распределениях количества ВП: распределения для всех сезонов имеют по несколько пиков, что также может указывать на различные механизмы регистрируемых ВП. Кроме того, по-видимому, для различных широт наличие тех или иных механизмов может варьироваться. Этим, например, может объясняться незначительное количество ВП, зарегистрированных в южном регионе в момент прохождения

СТ в осенний период. Тем не менее, представленные результаты согласуются с полученными в данном направлении ранее. Дальнейшие исследования наблюдаемых особенностей представляются целесообразными.

Мы выражаем благодарность сотрудникам Geographical Survey Institute of Japan за предоставленные данные сети GEONET. Работа поддержана грантом РФФИ 10-05-00113, грантом Президента РФ МК-3094.2010.05, а также Министерством образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.740.11.0078 и 16.518.11.7097).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Voyeikov S.V. Traveling wave packets of total electron content disturbances as deduced from global GPS network data // *J. Atm. Solar-Terr. Physics*. 2003. V. 65, N 11/13. P. 1245–1262.

Afraimovich E.L. First GPS-TEC evidence of wave structure excited by solar terminator moving // *Earth, Planets and Space*. 2008. V.60. P. 895–900.

Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., et al. The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L15106. doi:10.1029/2009GL039803.36.

Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., et al. MHD Nature of Ionospheric Wave Packets Generated by the Solar Terminator // *Geomag. Aeron.* 2010. V. 50, N 1. P. 79–95.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. New York: Springer-Verlag Wien, 1992. 327 p.

Leonovich A.S., Kozlov D.A., Edemskiy I.K. Standing slow magnetosonic waves in a dipole-like plasmasphere // *Planetary and Space Sci.* 2010. V. 58. P. 1425–1433.

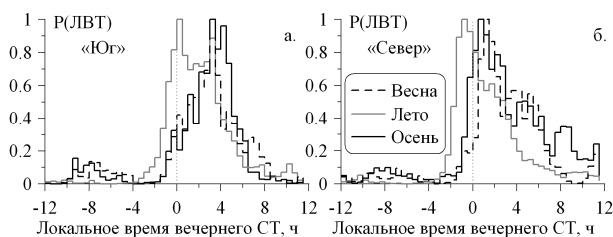


Рис. 3. Распределения количества волновых пакетов в регионах «Север» и «Юг» для различных сезонов в системе вечернего СТ.