

УДК 550.388.2

## МГД-ПРИРОДА СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ

Э.Л. Афраймович<sup>†</sup>, С.В. Воейков, И.К. Едемский, Ю.В. Ясюкевич

## MAGNETOHYDRODYNAMIC NATURE OF MEDIUM-SCALE IONOSPHERIC WAVE PACKETS GENERATED BY SOLAR TERMINATOR

E.L. Afraimovich<sup>†</sup>, S.V. Voeykov, I.K. Edemskiy, Yu.V. Yasyukevich

В работе представлена морфология среднemasштабных перемещающихся волновых пакетов (СМ ПВП), генерируемых солнечным терминатором (СТ) с использованием измерений полного электронного содержания по данным плотной японской сети GPS/GEONET (1220 станций) за 2008–2009 гг. Во временной области ПВП представляют собой цепочки узкополосных колебаний ПЭС длительностью порядка 1–2 ч и общей длительностью до 6 часов с периодом колебаний в диапазоне 10–30 мин. Пространственная структура ПВП характеризуется высокой степенью анизотропии и когерентности на расстоянии свыше 10 длин волн (длина волны 100–300 км). Высокая добротность колебательной системы и синхронизация регистрации ПВП с появлением СТ в магнитосопряженной области свидетельствуют в пользу гипотезы о магнитогиродинамической природе генерации ПВП солнечным терминатором.

Using total electron content measurements from the dense GPS/GEONET (over 1220 sites) global network for 2008–2009, we present morphology of medium-scale traveling wave packets (MS TWP) generated by the solar terminator (ST). In the time domain, TWPs are narrow-band TEC oscillation chains, whose duration is about 1–2 hours and total duration is about 6 hours and the oscillation period of about 10–30 min. TWP spatial structure is characterized by a high degree of anisotropy and coherence at the distance over 10 wavelengths (a wavelength is 100–300 km). The high quality factor of oscillatory system and synchronization of MS TWP occurrence with the solar terminator passage in the magneto-conjugate area say for the hypothesis about magneto-hydrodynamic nature of ST-generated MS TWP.

При использовании измерений ПЭС по данным глобальной сети GPS авторы [1] обнаружили новый класс среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМ ПВП) – перемещающиеся волновые пакеты (ПВП), проявляющиеся в форме узкополосных колебаний ПЭС. Период колебаний ПВП составил 10–20 мин, длина волны – ~150 км, длительность пакета – ~40 мин, пространственный масштаб – не более 500 км. В [2] впервые установлено, что ПВП вызваны движением солнечного терминатора (СТ). Согласно этой работе, ПВП имеют длительность порядка 1–2 ч и регистрируются на 2–3 ч позже времени появления СТ на высоте 100 км.

Начиная с пионерских теоретических работ В.М. Сомсикова [3, 4], были проведены многочисленные эксперименты по наблюдению «терминаторных» волн самыми различными средствами ионосферного зондирования. Однако все экспериментальные данные, в основном, были получены на одиночных станциях с использованием косвенных методов спектрального анализа и только для временных вариаций ионосферных параметров. Это затрудняет достоверную идентификацию терминаторных волн, так как в общем случае волновые возмущения могут генерироваться самыми разнообразными источниками [5].

Для изучения пространственной структуры и динамики ПВП с характерной длиной волны 100 км [1, 5] необходима достаточно плотная сеть приемников GPS, например японская сеть GEONET, насчитывающая более 1200 приемников и покрывающая все японские острова, вытянутые более чем на 2000 км ([ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS\\_products/](ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS_products/)). Первое изображение структуры ПВП по данным этой сети было получено в работе [6]. Описание методов получения информации при обработке данных GPS содержится в монографии [5].

На рис. 1 показаны типичные волновые пакеты в ночное время после прохождения солнечного тер-

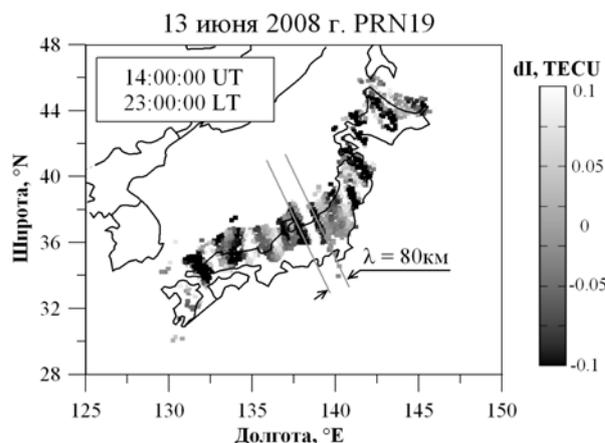


Рис. 1.

минатора 13 июня 2008 г., 14:00 UT (23:00 LT); спутник PRN19. Амплитуда вариаций ПЭС  $dI(t)$  не превышает 0.1 TECU ( $10^{16} \text{ м}^{-2}$ ). Линиями отмечено положение максимумов волн пакета. Анализ данных за летний и осенний периоды 2008 г. (35 и 20 дней соответственно) и для 16 дней января 2009 г. показал, что пространственная структура ПВП характеризуется высокой степенью анизотропии и когерентности на расстоянии свыше 10 длин волн (длина волны 100–200 км). Во временной области ПВП представляют собой цепочки узкополосных колебаний ПЭС длительностью порядка 1–2 ч и общей длительностью до 6 ч с периодом колебаний в диапазоне 10–30 мин.

Известно множество источников СМ ПВП, которые образуют случайное интерференционное поле волнового возмущения нейтральной среды. Результатом является случайное распределение интенсивности СМ-возмущения электронной концентрации в ионосфере с хаотическим изменением направления

кажущегося перемещения [5]. Такая ситуация реализуется за несколько часов до прохождения утреннего и вечернего СТ. Когда приходит СТ, на несколько часов возникает четкая регулярная структура волнового возмущения, перекрывающая случайное интерференционное поле.

Для того чтобы проверить гипотезу о связи генерации ПВП с появлением СТ, мы вводим систему локального времени терминатора (ЛВТ):  $dT = t_{\text{obs}} - t_{\text{st}}$ , где  $t_{\text{obs}}$  – момент времени в точке, данные которой мы рассматриваем, а  $t_{\text{st}}$  – время прихода терминатора на выбранной высоте  $h=100$  км над данной точкой. Отличительной чертой данного подхода, впервые использованного в [6], является исключение из рассмотрения конкретных абсолютных координат точек измерения.

Динамический спектр вариаций ПЭС в системе ЛВТ для всех станций GEONET для лета (35 сут), осени (20 сут) и зимы (16 сут) представлен на рис. 2, а–в. Динамические спектры получены усреднением  $m=3687173$  (а), 2059177 (б) и 1656426 (в) одиночных амплитудных спектров, каждый из которых получен дискретным преобразованием Фурье рядов вариаций ПЭС  $dI(t)$  длительностью 2.3 ч. Оказалось, что зимой в Северном полушарии ПВП наблюдаются преимущественно спустя 3–4 ч после прохождения утреннего СТ (рис. 2, в). В равноденствие ПВП появляются после прохождения СТ без заметного запаздывания или опережения (рис. 2, б).

Наиболее важным открытием оказалось то, что летом в Японии ПВП начинают регистрироваться за 1.5–2 ч до появления СТ над точкой регистрации, но в момент прохождения вечернего СТ над магнитосопряженной точкой, расположенной в Австралии (рис. 2, а). Следует обратить внимание на асимметрию полученной сезонной зависимости (рис. 2). Летом еще до заката появляются волновые пакеты (рис. 2, а), но они не регистрируются в самой магнитосопряженной области, где в данный момент зима (рис. 2, в). Это означает, что поток плазмы перемещается только в одну сторону – из зимней области сразу после заката в летнюю магнитосопряженную область, где еще день.

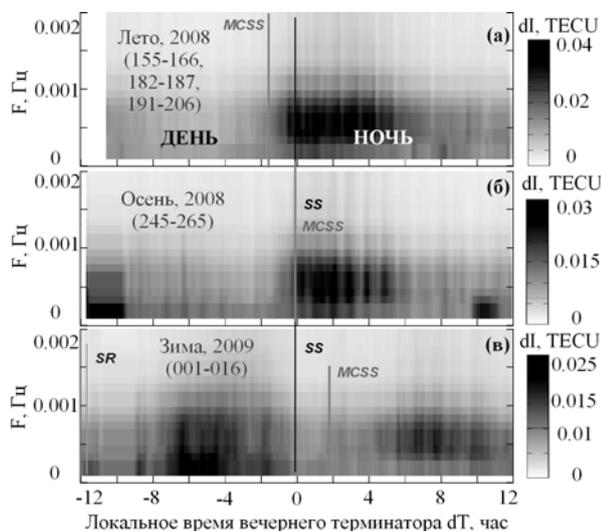


Рис. 2.

Традиционно СМ ПИВ, в том числе и обусловленные терминатором, связывают с модуляцией электронной плотности акустико-гравитационных волн (АГВ), генерируемыми в нижней атмосфере при прохождении терминатора над пунктом наблюдения. Однако эта гипотеза не согласуется с вышеописанными характеристиками терминаторных волн (высокая пространственная когерентность, сильная анизотропия, устойчивые направления азимута волнового вектора). Известно, что АГВ и обусловленные ими ПИВ могут распространяться без значительного затухания и изменения своей формы или потери когерентности не далее чем на 3–5 длин волн [7]; СМ ПВП могут распространяться не дальше 500 км [8]. В результате наблюдается случайное интерференционное поле волновых возмущений от различных источников АГВ.

Наиболее сильный аргумент против модели АГВ волновых пакетов, по крайней мере для ночных наблюдений летом, – регистрация ПВП за 1.5 ч до прохождения терминатора над пунктом наблюдения. Сезонная зависимость и связь с процессами в магнитосопряженной точке указывают на электродинамическое происхождение волновых пакетов. На такую связь указывают также данные одновременных оптических наблюдений периодических структур в ионосфере в Японии и Австралии [9, 10].

Высокая добротность колебательной системы и синхронизация с появлением СТ в магнитосопряженной области свидетельствуют о МГД-природе генерации ПВП солнечным терминатором. Ионосферные процессы в магнитосопряженных областях исследуются давно [11]. Однако подобные исследования не касались волновых процессов, исключая работу [12], в которой было установлено, что вероятность появления среднеширотного слоя  $E_s$  повышается при прохождении терминатора в магнитосопряженной области. Авторы объясняют это явление распространением вдоль магнитной силовой линии альфвеновских волн, однако не приводят экспериментальных данных, подтверждающих их регистрацию.

Наша работа является первым экспериментальным доказательством справедливости модели ионно-акустических волн с характерным периодом 10–20 мин, генерируемых при движении СТ [13]. Авторы [13] установили, что после восхода или заката такие волны могут существовать в течение 1–3 ч. Они являются результатом быстрого нагрева или охлаждения нижней ионосферы. На восходе нагрев продуцирует сильный, направленный вверх поток плазмы вдоль магнитной силовой линии. Этот поток приводит к сжатию и нагреву плазмы в вершине магнитной силовой линии и, как следствие, к генерации ионно-акустических волн. На закате такие волны продуцируются резким охлаждением плазмы.

Фактически мы обнаружили новое явление и экспериментально доказали возможность детектирования современными средствами ионосферной диагностики генерируемых СТ ионно-звуковых волн с периодами колебаний порядка 20 мин. Появление этих колебаний связано с прохождением СТ в магнитосопряженной области, поэтому естественно предпо-

ложить, что они переносятся какими-то магнитосферными МГД-волнами. Периоды наблюдаемых колебаний далеки от минимальных периодов собственных альфвеновских волн на этих широтах (~10 с), но вполне соответствуют периодам первых гармоник стоячих волн медленного магнитного звука (ММЗ), распространяющихся вдоль силовых линий (~10<sup>3</sup>–10<sup>4</sup> с) [14]. В работе [14] сделан вывод, что ионосфера не может играть какой-либо роли в генерации, и поглощении ММЗ-волн, на том основании, что все электромагнитные компоненты и поперечные компоненты колебаний плазмы на уровне ионосферы обращаются в нуль. Однако, как следует из той же работы, продольная компонента скорости колебаний плазмы на уровне ионосферы в нуль не обращается, и именно она ответственна за модуляцию электронной плотности.

Наши результаты могут быть использованы для развития моделей СМ ПИВ, необходимых для различных приложений. Знание времени появления подобных структур и направление вытянутости фронта волнового возмущения важны для оптимизации функционирования спутниковых радиотехнических систем различного назначения.

Авторы выражают благодарность Г.А. Жеребцову, А.П. Потехину, А.С. Леоновичу, В.А. Мазуру, В.А. Медведеву за интерес к работе и плодотворные дискуссии. Мы благодарны также сотрудникам японской сети GEONET за данные GPS, использованные в настоящем исследовании. Работа поддержана грантом СО РАН N 56 и грантом РФФИ N 07-05-00127.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Voeykov S.V. Traveling wave packets of total electron content disturbances as deduced from global GPS network data // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2003. V. 65. P. 1245–1262.
2. 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.
3. Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука., 1983. 192 с.
4. Somsikov V.M. A spherical model of wave generation in atmosphere by solar terminator // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1987. V. 49. P. 433–438.
5. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск. ИСЗФ СО РАН. 2006. 480 с.
6. Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., et al. The first GPS-TEC imaging of the space structure of MS wave packets excited by the solar terminator // *Annales Geophys.* 2009. V. 27. P. 1521–1525.
7. Francis S.H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. P. 5245–5259.
8. Дробжев В.И., Калиев М.З., Литвинов Ю.Г., et al. Среднеширотные особенности короткопериодных возмущений в ионосфере во время прохождения солнечного терминатора // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1991. Т. 31. С. 423–426.
9. Ogawa T., Balan N., Otsuka Y., et al. Observations and modeling of airglow and tec fluctuations induced by travelling ionospheric disturbances // *Earth Planets Space.* 2002. V. 54. P. 45–56.
10. Otsuka Y., Shiokawa K., Ogawa T., Wilkinson P. Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. L15803, doi:10.1029/2004GL020262.
11. Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.
12. Abramchuk V.P., Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya. Sporadic E layer in the twilight period during winter and its relations to sunrise. in the conjugate area // *Acta Geod. Geoph. Mont. Hung.* 1987. V. 22 (1–2). P. 199–209.
13. Huba J.D., Joyce G., and Fedder J.A. Ion sound wave in the topside low latitude ionosphere // *Geophysical research letters* // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 3181–3184.
14. Leonovich A.S., Kozlov D.A., Pilipenko V.A. Magnetosonic resonance in a dipole-like magnetosphere // *Annales Geophys.* 2006. V. 24. P. 2277–2289.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*