

7. МГД ПРИРОДА ИОНОСФЕРНЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ

Афраймович Э.Л., С.В. Воейков, И.К. Едемский, Ю.В. Ясюкевич
Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. *С использованием измерений полного электронного содержания (ПЭС) по данным глобальной сети приемников GPS (до 1500 станций) за длительный интервал времени с 1998 по 2007 г.г. и плотной японской сети GPS/GEONET (1220 станций) за 2008-2009 г.г. представлена морфология среднеширотных среднемасштабных перемещающихся волновых пакетов (СМ ПВП). Показано, что суточные и сезонные, спектральные и пространственно-временные характеристики СМ ПВП определяются динамикой солнечного терминатора (СТ) и практически не зависят от уровня солнечной и геомагнитной активности. Во временной области ПВП представляют собой узкополосные колебания ПЭС длительностью порядка 1-2 часа с периодом колебаний в диапазоне 10-30 мин. Зимой в северном полушарии ПВП наблюдаются преимущественно спустя 3 часа после прохождения утреннего солнечного терминатора (СТ), когда производная ПЭС достигает максимума. В равноденствие ПВП появляются сразу после прохождения СТ. Летом ПВП регистрируются за 1.5-2 часа до появления вечернего СТ в пункте наблюдения, но в момент времени прохождения СТ в магнитосопряженной области. Пространственная структура ПВП характеризуется высокой степенью анизотропии и когерентности на расстоянии свыше 10 длин волн, длина волны ПВП порядка 100-300 км. Высокая добротность колебательной системы и синхронизация с появлением СТ в пункте наблюдения и в магнитосопряженной области свидетельствуют о МГД природе генерации ПВП, генерируемых солнечным терминатором. Наши результаты являются первым экспериментальным подтверждением гипотезы генерации СТ ионно-звуковых волн, предложенной Huba (GRL, 2000, 27, 19, 3181).*

С использованием измерений полного электронного содержания (ПЭС) по данным глобальной сети GPS, авторы [1] обнаружили новый класс среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМ ПИВ) – перемещающиеся волновые пакеты (ПВП), проявляющиеся в форме узкополосных колебаний ПЭС. Период колебаний ПВП составил 10-20 мин, длина волны – порядка 150 км, длительность

пакета – около 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 часа и регистрируются на 2-3 часа 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 в основном все экспериментальные данные 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, такая как 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/). 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 терминатора 13 июня 2008 г., 14:00 UT (23:00 LT); спутник PRN19.

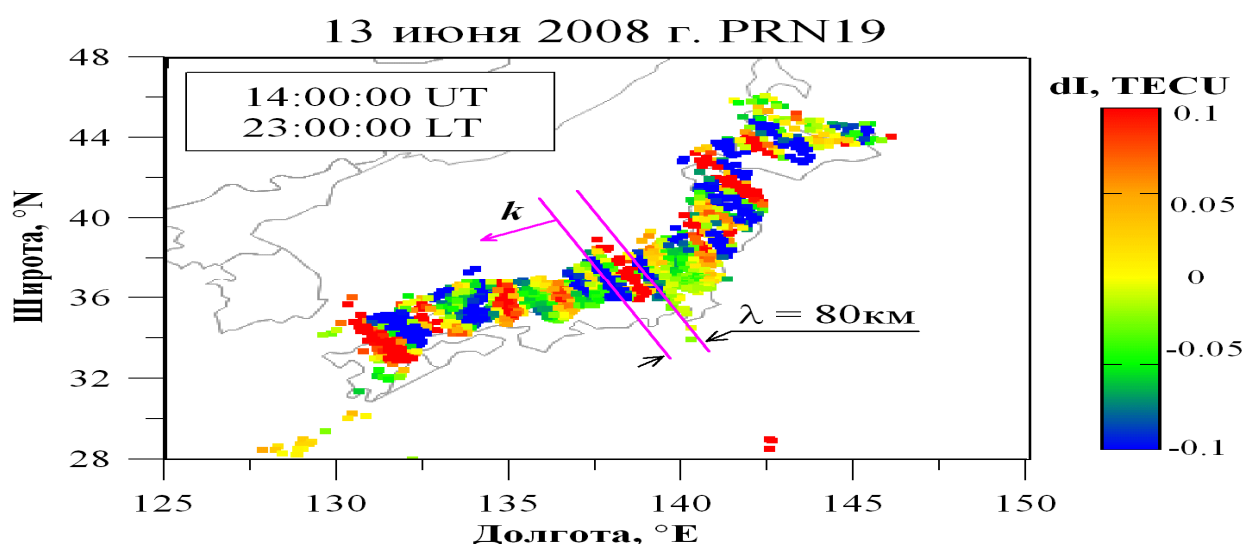


Рис. 1. Волновые пакеты в ночное время после прохождения солнечного терминатора 13 июня 2008 г., 14:00 UT; спутник PRN19. Линиями отмечено положение максимумов волн пакета. Вдоль Японии укладывается не менее 10 волн с длиной порядка 100 км.

Амплитуда вариаций ПЭС $dI(t)$ не превышает 0.1 TECU (10^{16} 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 часа и общей длительностью до 6 часов с периодом колебаний в диапазоне 10-30 мин.

Известно множество источников СМ ПИВ, 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): $dT = t_{obs} - t_{st}$, где t_{obs} – момент времени в точке, данные которой мы рассматриваем, а t_{st} – время прихода терминатора на выбранной высоте $h = 100$ км над данной точкой. Отличительная черта данного подхода, впервые использованного в [6], заключается в исключении из рассмотрения конкретных абсолютных координат точек измерения.

Динамический спектр вариаций ПЭС в системе ЛВТ для всех станций GEONET для лета (35 суток), осени (20 суток) и зимы (16 суток) представлен на Рис. 2 (а, б, 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 часа. Оказалось, что зимой в северном полушарии ПВП наблюдаются преимущественно спустя 3-4 часа после прохождения утреннего СТ (Рис. 2в). В равноденствие ПВП появляются после прохождения СТ без заметного запаздывания или опережения (Рис. 2б).

Наиболее важным открытием оказалось то, что летом в Японии ПВП начинают регистрироваться за 1.5-2 часа до появления СТ над точкой регистрации, но в момент прохождения вечернего СТ над магнитосопряженной точкой, расположенной в Австралии (Рис. 2а). Следует обратить внимание на асимметрию полученной сезонной

зависимости (Рис. 2). Летом еще до заката появляются волновые пакеты (Рис.2а), но они не регистрируются в самой магнитосопряженной области, где в данный момент зима (пример на рис.2в). Это означает, что поток плазмы перемещается только в одну сторону - из зимней области сразу после заката в летнюю магнитосопряженную

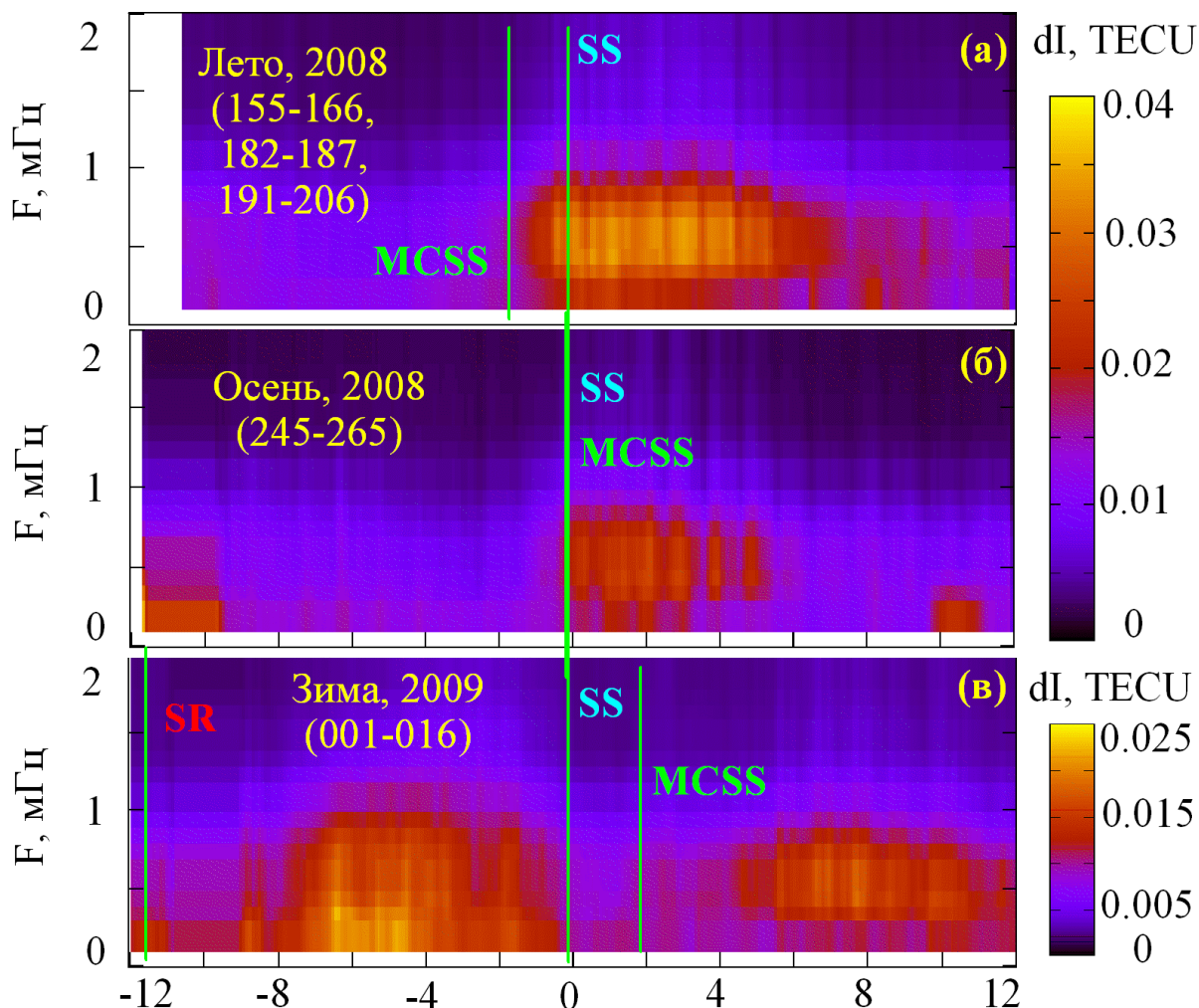


Рис. 2. Локальное время вечернего терминатора dT , час суток, 20 суток осени и 16 суток зимы (а, б, в). $dT=0$ соответствует моменту заката Солнца на высоте 100 км. Летом ПВП регистрируются за 1.5 часа до появления вечернего СТ в пункте наблюдения, но в момент времени прохождения СТ в магнитосопряженной области.

область, где еще день.

Традиционно СМ ПИВ, в том числе и обусловленные терминатором, связывают с модуляцией электронной плотности 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 часа 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 Es повышается при прохождении терминатора в магнитосопряженной области. Авторы объясняют это явление распространением вдоль магнитной силовой линии Альфеновских 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 часов. 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 предположить, что они переносятся какими-то

магнитосферными МГД-волнами. Периоды наблюдаемых колебаний далеки от минимальных периодов собственных альфвеновских волн на этих широтах (~ 10 сек), но вполне соответствуют периодам первых гармоник стоячих волн медленного магнитного звука (ММЗ), распространяющихся вдоль силовых линий ($\sim 10^3$ - 10^4 сек) [14]. В работе [14] сделан вывод, что ионосфера не может играть какой-либо роли ни в генерации, ни в 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 РФФИ N 10-05-00113 и Президентским грантом МК-3094.2010.5.

ЛИТЕРАТУРА

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. 65. 1245 - 1262.
2. Afraimovich E.L. First GPS-TEC evidence of wave structure excited by solar terminator moving // Earth, Planets and Space. 2008. 60. 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. 49. 433-438.
5. Афраймович 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., Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. The first GPS-TEC imaging of the space structure of MS wave packets excited by the solar terminator // Annales Geophys. 2009. 27. 1521 - 1525.
7. Francis S.H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances // J. Geophys. Res. 1974. 79. 5245-5259.

8. В.И. Дробжев, М.З. Калиев, Ю.Г. Литвинов, Б.Д. Чакенов, А.Ф. Яковец. Среднеширотные особенности короткопериодных возмущений в ионосфере во время прохождения солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. 31. 423-426.
9. T. Ogawa, N. Balan, Y. Otsuka, K. Shiokawa, C. Ihara, T. Shimomai, and A. Saito. Observations and modeling of airglow and tec fluctuations induced by travelling ionospheric disturbances // Earth Planets Space. 2002. 54. 45-56.
10. Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and P. Wilkinson. Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions // Geophys. Res. Lett. 2004. 31. L15803, doi:10.1029/2004GL020262.
11. Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. Наука. М. 1984. 189 С.
12. V.P. Abramchuk, V.N. Oraevsky, Yu.Ya. Ruzhin. Sporadic E layer in the twilight period during winter and its relations to sunrise. in the conjugate area // Acta Geod. Geoph. Mont. Hung. 1987. 22 (1-2). 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. 27. 3181-3184.
14. Leonovich A.S., Kozlov D.A., Pilipenko V.A. Magnetosonic resonance in a dipole-like magnetosphere // Annales Geophys. 2006. 24. 2277-2289.