

## МГД ПРИРОДА ИОНОСФЕРНЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ.

### MHD NATURE OF IONOSPHERE WAVE PACKETS GENERATED BY SOLAR TERMINATOR

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

Институт солнечно-земной физики СО РАН

We analyzed the dynamic and spectral characteristics of the medium-scale travelling ionospheric disturbances (MS TID) in the form of travelling wave packets (MS TWP). We used total electron content (TEC) measurements from the global network of GPS receivers (up to 1500 stations) in 1998-2007 and the dense Japanese network GPS/GEONET (1220 stations) in 2008-2009. Diurnal, seasonal, spectral and spatial-temporal MS TWP characteristics are determined by the solar terminator (ST) dynamics and do not depend on the solar or geomagnetic activity. In the time field, TWPs are narrow-band TEC oscillations of duration of about 1-2 hours with oscillation periods of 10-20 minutes. In winter, TWPs in the northern hemisphere are observed 3-4 hours after the morning ST passage, when the TEC time derivative achieves his maximum. In summer, TWPs are recorded 1.5-2 hours before the evening ST occurrence at the point of observations, but at the moment of the evening ST passage in the magneto-conjugate area. The TWP spatial structure is of a high degree of anisotropy and coherence at the distance of more than 10 wavelengths; the TWP wavelength is about 100-300 km. Both the high Q-factor of oscillatory system and synchronization of TWP occurrence with solar terminator passage at the point of observations and in the magneto-conjugate area testify the MHD nature of ST-excited TWP generation. The obtained results are the first experimental evidence for the hypothesis for the ST-generated ion sound waves (Huba et al., GRL, 2000, 27, 19, 3181).

С использованием измерений полного электронного содержания (ПЭС) по данным глобальной сети GPS, авторы [1] обнаружили новый класс среднemasштабных 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/](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. 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 часа и общей длительностью до 6 часов с периодом колебаний в диапазоне 10-30 мин.

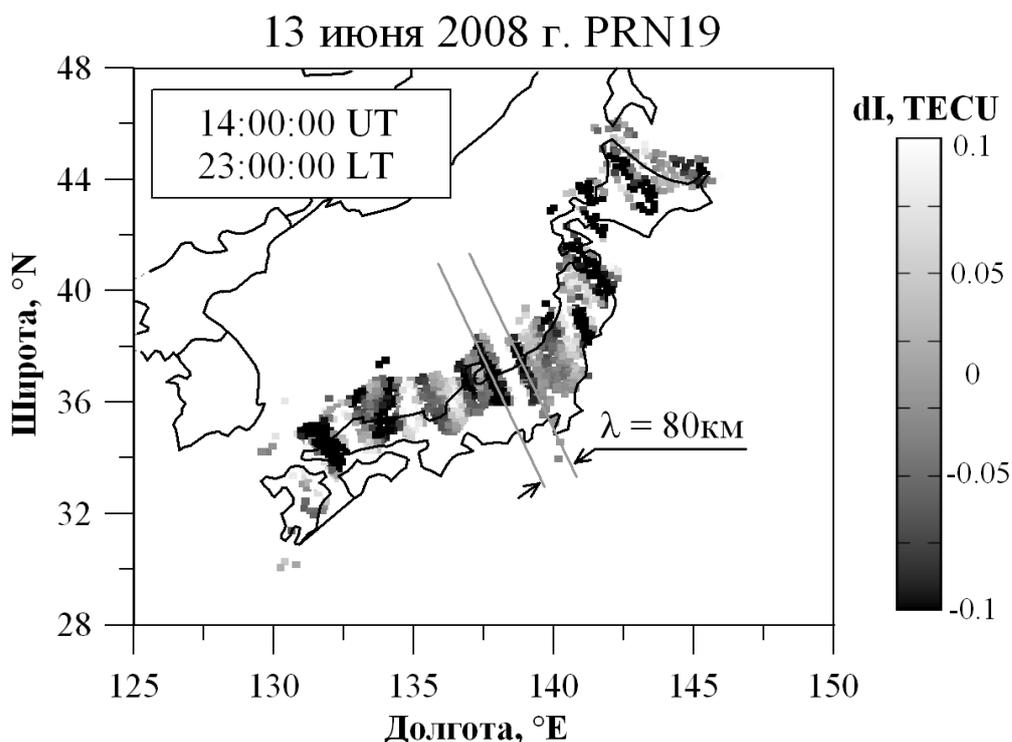
Известно множество источников СМ ПИВ, которые образуют случайное интерференционное поле волнового возмущения нейтральной среды. Результатом является случайное распределение интенсивности СМ возмущения электронной концентрации в ионосфере с хаотическим изменением направления кажущегося перемещения [5]. 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 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.



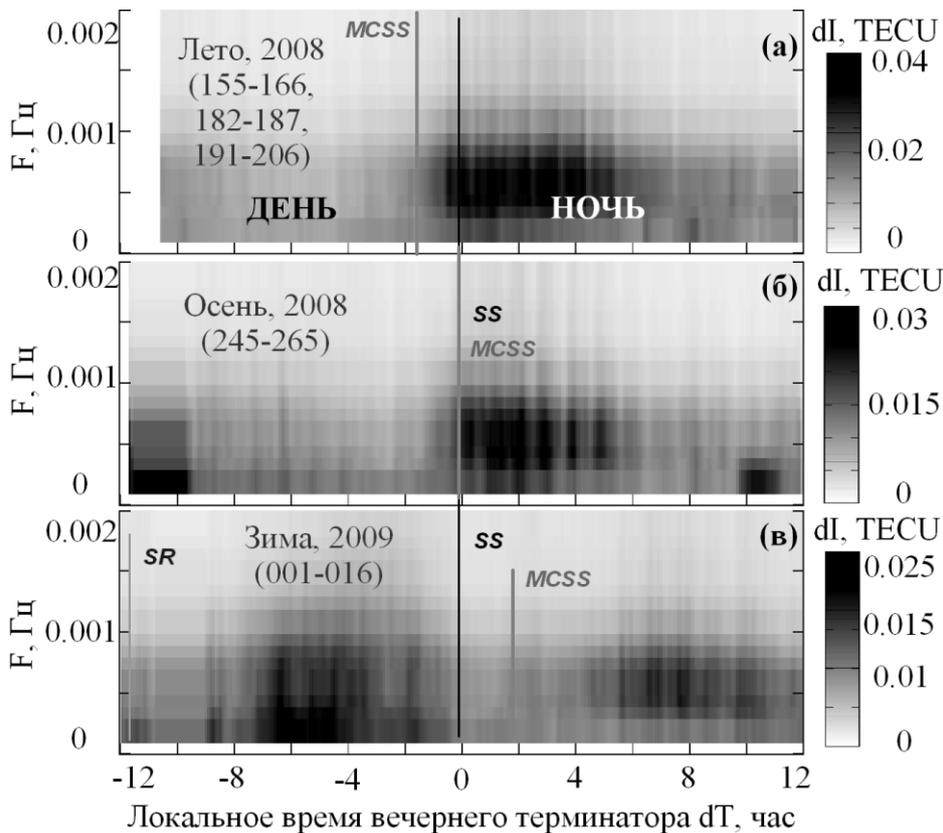
**Рисунок 1.** Волновые пакеты в ночное время после прохождения солнечного терминатора 13 июня 2008 г., 14:00 UT; спутник PRN19. Линиями отмечено положение максимумов волн пакета. Вдоль Японии укладывается не менее 10 волн с длиной порядка 100 км.

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 альфеновских волн на этих широтах (~10 сек), но вполне соответствуют периодам первых гармоник стоячих волн медленного магнитного звука (ММЗ), распространяющихся вдоль силовых линий (~10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup> 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.



**Рисунок 2.** Динамический спектр вариаций ПЭС для всех станций GEONET для 35 летних 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 магнитоспращенной области.

Локальное время вечернего терминатора  $dT$ , час

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] 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., 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. Среднширотные 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.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЙЯНИЯ РАДИОСИГНАЛА GPS НА ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ, ВЫТЯНУТЫХ ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ EXPERIMENTAL STUDY OF GPS RADIO SIGNAL SCATTERING BY IONOSPHERIC IRREGULARITIES ELONGATED ON MAGNETIC FIELD**

**Ишин А.Б.<sup>1</sup>, Живетьев И.В.<sup>2</sup>, Демьянов В.В.<sup>3</sup>**

1 – Институт солнечно-земной физики СО РАН, [ishin@iszf.irk.ru](mailto:ishin@iszf.irk.ru)

2 – Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

3 – Иркутский государственный университет путей сообщения

Present paper is devoted to analysis of orientation ionospheric irregularities comparative magnetic field. On the basis of dense Japanese regional network GPS (GEONET) data, we analyzed the dependence of L2 phase slips against the angle between line-of-sight “GPS site – satellite” and magnetic field line over Japan during February 12, 2000. For the first time, it was shown that transionospheric signal scattering occurs for the line-of-sight of both aligned to magnetic field line, and across it or at large angles to magnetic field line. The percentage of GPS receivers, which registered L2 phase slips, for line-of-sights aligned to magnetic field line approach 6-7 %. For some satellites this value can approach 30 %.

### **Введение**

До недавнего времени считалось, что основные процессы генерации ионосферных неоднородностей проходят в экваториальной и авроральной областях, где создаются условия для развития нестабильностей ионосферной плазмы. В экваториальной области – это сложная динамика экваториальной аномалии, а в авроральных областях – высыпания частиц. Основные усилия и большое количество приборов для исследования ионосферы создавалось как раз в этих областях. С появлением современных средств, включая плотные сети наземных приемников GPS, стало доступно более детальное изучение неоднородностей ионосферной плазмы на средних широтах.

За последнее время появилось множество статей посвященных исследованию фазовых флуктуаций и сбоев сопровождения фазы несущей частоты в системе GPS [1- 9] во время геомагнитных возмущений.

В статье [10] сообщается о регистрации многочисленных сбоев сопровождения сигналов на вспомогательной частоте L2 системы GPS, вызванных рассеянием сигнала на ионосферных неоднородностях. Авторы считают, что это показательный пример проявления так называемых ионосферных пузырей («SUPER BUBBLES»). У плазменного пузыря есть характерная структура – он развивается вдоль линии магнитного поля Земли, удлиняясь в меридиональном направлении, но оставаясь достаточно узким в зональном. Однако статья [10] не содержит данных, доказывающих факт вытянутости наблюдаемых неоднородностей вдоль магнитного поля. Настоящая статья посвящена исследованию, целью которого было выявление зависимости количества сбоев в системе GPS от взаимного расположения луча спутник-приемник и магнитного поля.

### **Данные и методы обработки**

В работе использовались данные региональной японской сети GPS GEONET, состоящей из более, чем 1200 станций. Приемники японской сети не измеряют амплитуду принятого сигнала, потому выявить зависимость амплитуды принятого сигнала от угла между лучом спутник-приемник и магнитным полем в явном виде нельзя. Однако, понятно, что при падении уровня принимаемого сигнала ниже определенного значения, приемник перестанет обнаруживать сигнал на фоне шумов. Таким образом, имея статистику срывов сопровождения фазы несущей частоты на плотной сети станций, при большом количестве измерений, можно сделать вывод о наличии зависимости количества сбоев (а следовательно и рассеяния трансionoсферного радиосигнала) от взаимного расположения луча спутник-приемник и направления магнитного поля.

На рисунке 1 представлены подионосферные точки для тех лучей спутник-приемник, на которых наблюдались сбои сопровождения фазы на вспомогательной частоте L2. Для примера