

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 550.388.2

## Перемещающиеся волновые пакеты, генерируемые солнечным терминатором в верхней атмосфере

Э.Л. Афраимович<sup>1</sup>, И.К. Едемский<sup>1</sup>, С.В. Воейков<sup>1</sup>,  
Ю.В. Ясюкевич<sup>1</sup>, И.В. Живетьев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

<sup>2</sup>Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН  
684034, Камчатская обл., Елизовский р-н, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

Поступила в редакцию 10.09.2008 г.

Впервые с использованием измерений полного электронного содержания (ПЭС) по данным глобальной сети приемников GPS за длительный интервал времени с 1998 по 2007 г. представлена морфология нового класса среднеширотных среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМ ПИВ) – перемещающихся волновых пакетов (ПВП). Полное число зарегистрированных ПВП превышает 275 тыс. Во временной области ПВП представляют собой узкополосные колебания ПЭС длительностью порядка 1 ч с периодом колебаний в диапазоне 10–20 мин. ПВП наблюдаются преимущественно спустя 3 ч после прохождения утреннего солнечного терминатора, когда производная ПЭС достигает максимума.

*Ключевые слова:* солнечный терминатор, полное электронное содержание, перемещающиеся волновые пакеты, GPS.

### Введение

Ранние исследования показали, что движение солнечного терминатора (СТ) вызывает генерацию акустико-гравитационных волн (АГВ), неустойчивость и флуктуации в ионосферной плазме [1–6]. Среди всех источников АГВ движущийся СТ занимает особое положение, так как пространственно-временные характеристики этого явления хорошо известны. Рассматривая СТ как стабильный и повторяющийся источник АГВ, можно получить информацию о состоянии атмосферы по отклику на такое воздействие.

Большое разнообразие атмосферных эффектов, связанных с СТ, послужило поводом для целого ряда исследований вариаций ионосферных параметров, полученных различными методами зондирования ионосферы [7–13]. Однако в основном все экспериментальные данные были получены на одиночных станциях с использованием косвенных методов спектрального анализа лишь для временных вариаций ионосферных параметров, влияние на которые могут оказывать самые различные факторы. Это затрудняет достоверную идентификацию АГВ, связанных с СТ, так как в общем случае АГВ

могут генерироваться разнообразными источниками как естественного, так и техногенного происхождения [14].

Нам известна только одна работа [11], в которой пространственно-временные характеристики (скорость и направление распространения) ионосферного возмущения сравнивались с аналогичными параметрами СТ. Но в этой работе измерения также проводились только на одной станции (радар некогерентного рассеяния Millstone Hill Radar) и лишь для нескольких дней. Основываясь на этих данных, нельзя восстановить пространственный образ «терминаторного» возмущения.

Резюмируя вышеизложенное, следует сказать, что низкое пространственно-временное разрешение и использование разнородных методов регистрации ионосферных возмущений в единичных пунктах не позволили получить достоверное подтверждение генерации АГВ в широком диапазоне периодов при прохождении СТ.

Впервые анализ пространственной структуры атмосферного возмущения, связанного с СТ, за период с 2001 по 2007 г. выполнен Forbes et al. [15]. Авторы обнаружили «терминаторную» волну в нейтральной составляющей термосферы на высоте ~400 км по данным акселерометра, установленного на борту спутника CHAMP. Так, при низкой солнечной активности и в течение лета в Северном полушарии фазовый фронт волнового возмущения на утреннем терминаторе простирается от –60° до

\* Эдуард Леонтьевич Афраимович (afra@iszf.irk.ru);  
Илья Константинович Едемский; Сергей Викторович Воейков;  
Юрий Владимирович Ясюкевич (yasukevich@iszf.irk.ru);  
Илья Валерьевич Живетьев (zhiv@ikir.kamchatka.ru).

почти 30° широты с углом наклона по отношению к терминатору порядка 30°. Амплитуда вариаций плотности нейтральных частиц составила около 3–5% по отношению к фону, а горизонтальная длина волны ~3000 км. Однако метод Forbes et al. [15] предполагает накопление данных за очень длительные интервалы времени – не менее 130 дней.

Полученная усредненная картина, без сомнения, может нести информацию об общих чертах крупномасштабной составляющей «терминаторной» волны и при этом достаточно сильно отличаться от реального явления, включающего в себя возмущения различных масштабов и изменяющегося в зависимости от сезона, геомагнитной обстановки и т.д.

Не так давно в изучении неоднородностей ионосферы был достигнут сравнительный прогресс благодаря новой технологии GPS-радиозондирования. Она позволяет получать данные о вариациях полного электронного содержания (ПЭС) с высоким пространственным и временным разрешением. В ИСЗФ СО РАН разработаны методы и технология глобального GPS-детектора ионосферных возмущений GLOBDET, позволяющие исследовать ионосферные неоднородности с амплитудой до  $10^{-3}$  от фонового значения ПЭС [16]. В сравнении с классическими методами радиозондирования ионосферы технология GLOBDET впервые предоставляет возможность мониторинга ионосферных возмущений практически в реальном времени и по всему земному шару.

С использованием измерений ПЭС по данным сети GPS Afraimovich et al. [17] обнаружили новый класс среднемасштабных ионосферных возмущений (СМ ПИВ) – перемещающиеся волновые пакеты (ПВП), проявляющиеся в форме узкополосных колебаний ПЭС. Afraimovich et al. [17] представили морфологию ПВП для 105 дней 1998–2001 гг. Согласно этой статье период колебаний ПВП составил 10–20 мин, длина волны – порядка 150 км, длительность пакета – около 40 мин, пространственный масштаб – не более 500 км. Узкополосные колебания ПЭС наблюдались в основном днем, при этом максимум распределения был смещен на утренние часы. Следует отметить, что Afraimovich et al. [17] не смогли определить механизма генерации ПВП.

С другой стороны, в работе [18] впервые по данным GPS для нескольких дней было получено доказательство существования волновой структуры, порожденной СТ, движущимся над США, Европой и Японией. Автор выделил два основных типа обнаруженных возмущений ПЭС: крупномасштабные (КМ) 60-минутные вариации с амплитудой  $\epsilon = 0,5–1$  TECU ( $10^{16}$  эл./м<sup>2</sup>) и 15-минутные СМ-вариации с амплитудой порядка 0,05–0,1 TECU. Первый тип возмущений предсказывался в теоретических работах, а также был зарегистрирован ранее с использованием различных методов радиозондирования ионосферы. Второй тип – СМ-возмущения в форме ПВП. Генерация ПВП происходит при максимальных значениях временной производной изменений ПЭС. Эти ПВП имеют длительность порядка

1–2 ч и регистрируются на 1,5–2,5 ч позже времени появления СТ на высоте 100 км. КМ- и СМ-возмущения ПЭС зафиксированы в пространстве вдоль фронта СТ на протяжении не менее 1600 км.

Цель настоящей статьи – исследование структуры волновых пакетов, связанных с СТ. Мы вновь рассмотрим ПВП, зарегистрированные в магнитоспокойный день 18 октября 2001 г., которые не были идентифицированы как эффект СТ в работе [17]. Далее мы представим общую морфологию ПВП при различном уровне геомагнитной активности за длительный период времени (1998–2007 гг.).

Методы вычисления и фильтрации рядов вертикального ПЭС  $I(t)$  по данным фазовых измерений были описаны в работах [16, 17]. Мы использовали данные измерений на глобальной сети двухчастотных приемников GPS в формате RINEX с временным шагом 30 с (<http://sopac.ucsd.edu/>). Чтобы проверить наши выводы о генерации волновых пакетов утренним терминатором для различных уровней геомагнитной активности и в разных регионах Земли, мы обработали также данные плотной сети приемников GPS в Японии GEONET ([ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS\\_products/](ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS_products/)), насчитывающей более 1200 станций.

## 1. Обработка данных GPS

Стандартная технология GPS предоставляет возможность детектирования волновых возмущений по данным фазовых измерений наклонного ПЭС  $I_s$  вдоль луча «приемник–ИСЗ». Методы вычисления  $I_s$  по данным фазовых измерений в GPS были описаны в работах [16, 17, 19]. Здесь мы приводим лишь окончательную формулу для фазовых измерений:

$$I_s(t) = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const} + nL], \quad (1)$$

где  $L_1 \lambda_1$  и  $L_2 \lambda_2$  – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере, м;  $L_1$  и  $L_2$  – число полных оборотов фазы;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длины волн для частот  $f_1$  и  $f_2$ ; const – некоторый неизвестный начальный фазовый путь, м;  $nL$  – ошибка в определении фазового пути, м.

Для нормировки амплитуды возмущений ПЭС используется преобразование «наклонного» ПЭС в эквивалентное «вертикальное» значение  $I(t)$  [20]:

$$I(t) = I_s(t) \cos \left[ \arcsin \left( \frac{r_z}{r_z + h_{\max}} \cos \theta_s \right) \right], \quad (2)$$

где  $r_z$  – радиус Земли;  $\theta_s$  – угол места луча «приемник–ИСЗ»;  $h_{\max} = 300$  км – высота максимума слоя F2 ионосферы.

С целью исключения вариаций регулярной ионосферы, а также трендов, внесенных движением спутника, сначала сглаживаем исходные ряды с временным окном 2 мин, затем удаляем линейный тренд с окном около 90 мин. Таким образом, получаем вариации ПЭС  $dI(t)$  в диапазоне периодов 2–90 мин, соответствующем диапазону периодов АГВ [14].

## 2. ПВП, наблюдавшиеся в магнитоспокойный день 18 октября 2001 г.

Рассмотрим первый пример. Геомагнитную обстановку 18 октября 2001 г. можно охарактеризовать как спокойную — значение индекса Кр варьировалось от 1,0 до 1,7 ([http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1/geophy\\_menu.html](http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1/geophy_menu.html)). На рис. 1, а показана геометрия GPS-измерений во время движения утреннего СТ над территорией США.

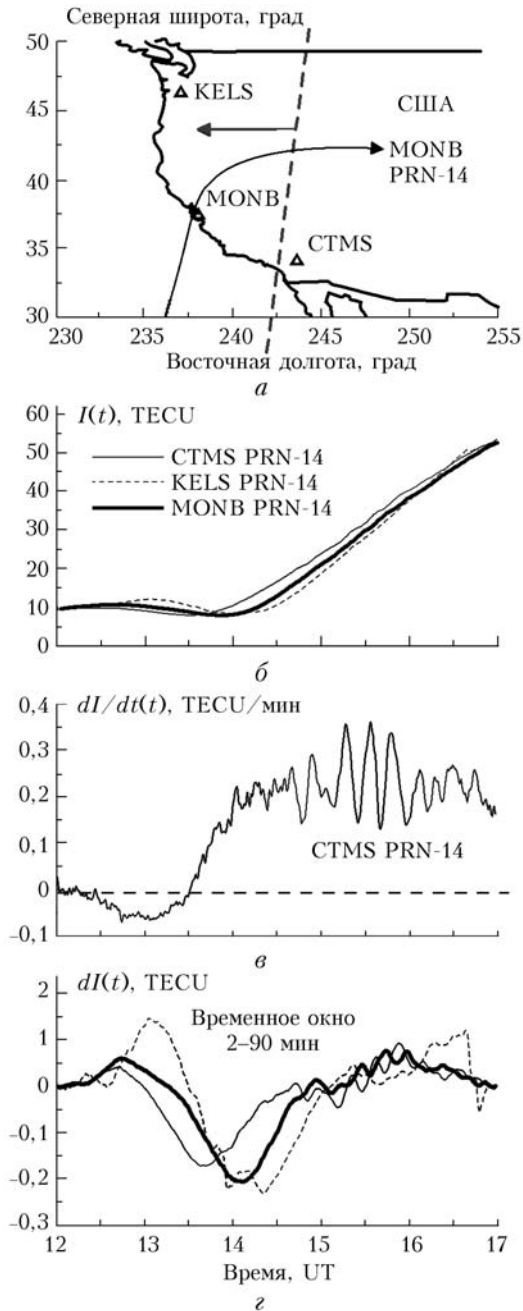


Рис. 1. Геометрия эксперимента GPS-измерений во время движения СТ над территорией Западной США 18 октября 2001 г. — а; исходные ряды ПЭС  $I(t)$  — б; производная по времени ряда ПЭС  $dI(t)/dt$  на луче CTMS — PRN-14 — в; ряды ПЭС, отфильтрованные в диапазоне 2–90 мин — г

Выбранные станции отмечены треугольниками, рядом с каждым приведено название станции. Координаты станций не приведены из соображений экономии места. Сплошная линия показывает траекторию движения подионосферной точки на высоте  $h = 400$  км для луча между приемником MONB и спутником PRN-14; направление движения указано стрелкой. Пунктирная линия отмечает положение терминатора на высоте 100 км в момент времени 13,5 UT; здесь же стрелкой показано направление его движения.

На рис. 1 приведена также временная зависимость исходных рядов ПЭС  $I(t)$ , сглаженных с временным окном 2 мин (рис. 1, б), и ряды ПЭС, отфильтрованные в диапазоне периодов 2–90 мин (рис. 1, г) для PRN-14 и станций CTMS, MONB и KELS, отмеченных на рис. 1, а. На рис. 1, в представлены два основных типа наблюдаемых возмущений ПЭС — длиннопериодные с периодом порядка 1 ч и амплитудой около 0,5–1 TECU и короткопериодные порядка 0,05–0,1 TECU и с периодом около 15 мин. Длиннопериодные вариации ПЭС сходны по форме, но сдвинуты по времени в соответствии со временем появления терминатора в каждой отдельной точке.

На рис. 1, в представлена временная производная  $dI(t)/dt$  исходного ряда ПЭС на луче «CTMS-PRN-14», сглаженная с окном 2 мин. Короткопериодные осцилляции производной ПЭС по времени имеют форму волнового пакета, который появляется, когда производная  $dI/dt(t)$  достигает максимума.

## 3. Отбор ПВП

Технология глобального поиска ПВП, разработанная в ИСЗФ СО РАН, позволяет отбирать (из значительного числа экспериментальных данных и в автоматическом режиме) возмущения ПЭС, подходящие под классификацию ПВП. Выделение похожих на ПВП рядов ПЭС происходит по двум критериям. Во-первых, выбираются такие вариации ПЭС, для которых значение СКО превышает заданный предел  $\epsilon$  (в данном случае  $\epsilon = 0,05$  TECU). Кроме того, для каждого фильтрованного ряда мы проверяем выполнение условия «узкополосности» колебаний ПЭС: отношение  $R$  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 предел  $R_{\min}$ . В нашем случае  $R_{\min} = 2$ .

Для каждой из отобранных вариаций ПЭС строилась огибающая и определялась длительность пакета как интервал времени  $\Delta T$ , в течение которого огибающая превышала уровень 0,5 от максимальной амплитуды колебаний  $A_{\max}$  для данного случая. Отмечался также момент времени  $t_{\max}$ , соответствующий амплитуде  $A_{\max}$ . Период вариаций  $T$  определяется по формуле  $T = 2\langle\delta T\rangle$ , где  $\langle\delta T\rangle$  — среднее значение временного интервала  $\delta T$  между соседними экстремумами вариаций ПЭС, лежащими в пределах интервала  $\Delta T$ .

В специальный файл записывалась вся информация о каждом событии: имя и географические координаты станции GPS; номер PRN ИСЗ GPS; время  $t_{\max}$ , соответствующее максимальному значению амплитуды  $A_{\max}$  ПВП; амплитуда  $A_{\max}$ ; длительность пакета  $\Delta T$ ; период пакета  $T$ ; отношение  $R$ ; значения угла места  $\theta_s(t)$  и азимута  $\alpha_s(t)$  луча «приемник–ИСЗ», рассчитанные для момента времени  $t_{\max}$ .

#### 4. Морфология ПВП

С использованием описанного выше метода было зафиксировано 275426 ПВП за 277 полных суток. Анализ статистических результатов выявил некоторые зависимости параметров ПВП от ряда факторов.

В первую очередь мы рассмотрели сезонную зависимость количества и амплитуды ПВП (рис. 2).

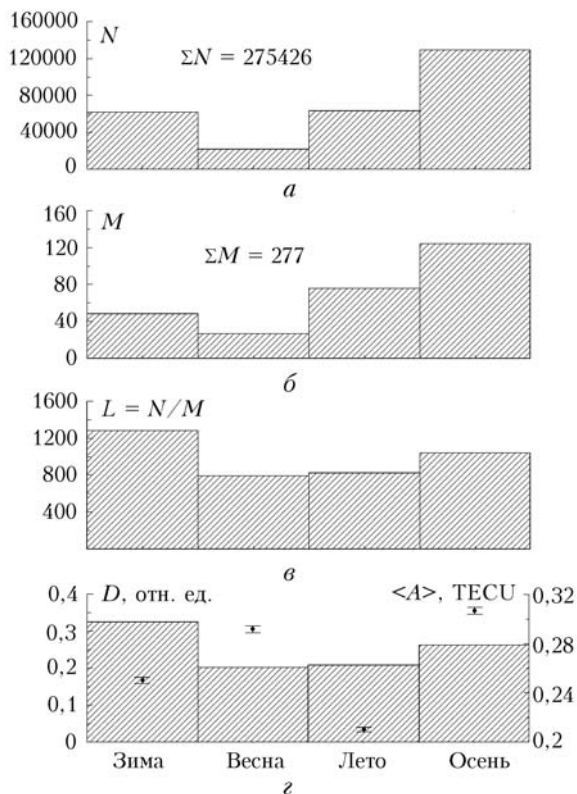


Рис. 2. Сезонная зависимость плотности и среднего значения максимальной амплитуды ПВП:  $a$  – число ПВП  $N$ ;  $b$  – число дней наблюдения  $M$  в зависимости от времени года;  $c$  – среднее число ПВП на сезон  $L = N/M$ ;  $d$  – относительная плотность  $D$ , полученная как отношение числа ПВП  $N$  к их общему числу

Как следует из рис. 2, ПВП наблюдаются чаще зимой (более 0,33) и осенью (порядка 0,26) по сравнению с весной и летом (менее 0,2 каждый).

На рис. 2,  $d$  точками показаны средние значения  $\langle A \rangle$  максимальных амплитуд  $A_{\max}$  ПВП для каждого сезона, а вертикальными линиями их СКО. Средние значения  $\langle A \rangle$  с небольшим разбросом располагаются вблизи 0,25 TECU, независимо от сезона.

Рис. 3,  $a$  показывает зависимость  $P_{TWP}(|Dst|)$  числа зарегистрированных ПВП от уровня геомагнитной активности в это время, выраженного модулем индекса Dst (черная линия).

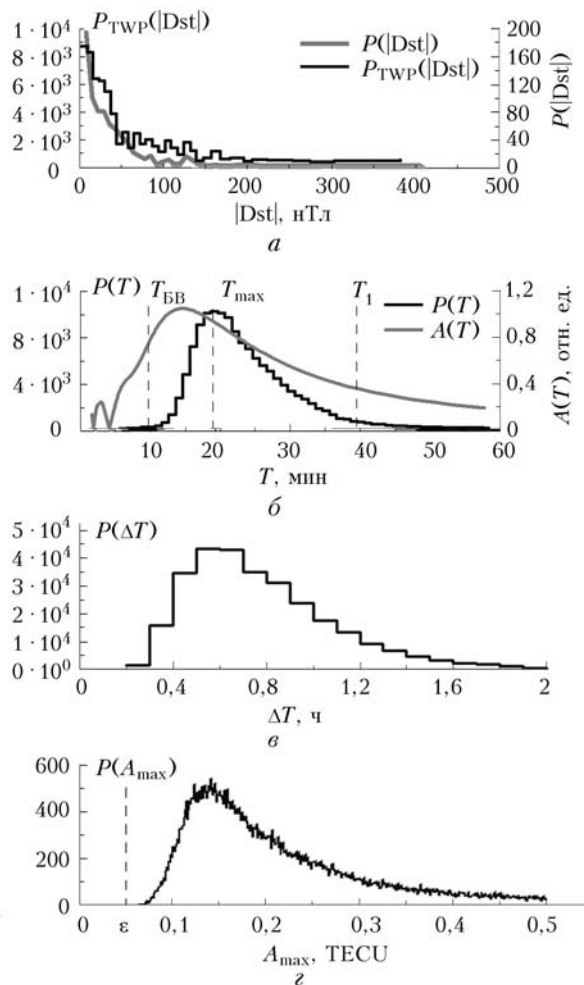


Рис. 3. Статистика ПВП:  $a$  – зависимость  $P_{TWP}(|Dst|)$  числа ПВП от модуля индекса Dst; на правой шкале отложено распределение  $P(|Dst|)$  часовых значений модуля индекса Dst за целые сутки для всех обработанных дней;  $b$  – распределение  $P(T)$  числа ПВП с различными периодами  $T$ ; справа показана передаточная характеристика фильтра (серая линия), использовавшегося для обработки начальных рядов ПЭС;  $c$  – распределение ПВП  $P(\Delta T)$  по длительности пакета  $\Delta T$ ;  $d$  – распределение максимальной амплитуды  $A_{\max}$ ; вертикальная пунктирная линия на панели отмечает выбранное пороговое значение для амплитуды  $\epsilon = 0,05$  TECU

Там же (серой линией) приведено распределение  $P(|Dst|)$  часовых значений модуля индекса Dst за целые сутки для всех обработанных дней. Поведение распределений носит сходный характер, что позволяет сделать вывод об отсутствии корреляции между числом ПВП и значением индекса Dst.

На рис. 3,  $b$  черной линией представлена зависимость  $P(T)$  количества ПВП от периода колебаний  $T$ . Наиболее вероятный период ПВП  $T_{\max}$  составил ~19 мин. Здесь же серой кривой дана передаточная характеристика  $A(T)$  фильтра, используемого при

отборе ПВП, которая представляет собой отношение амплитуды сигнала на выходе фильтра к амплитуде исходного монохроматического сигнала на входе.

В области малых периодов распределение  $P(T)$  ограничено периодом Бранта–Вайсяля  $T_{БВ} \approx 10$  мин – минимальным значением периода для АГВ на высотах максимума слоя F2 [14]. Это указывает на то, что ПВП, скорее всего, являются ионосферным проявлением АГВ. В области больших периодов значение передаточной характеристики фильтра  $A(T)$  на интервале от точки  $T_{\max}$  максимального значения распределения  $P(T)$  до точки  $T_1$  (рис. 3, б) уменьшилось в 3 раза, а величина распределения по периодам  $P(T)$  – примерно в 18 раз. Таким образом, падение передаточной характеристики фильтра происходит медленнее, чем падение распределения  $P(T)$ . Следовательно, вид распределения  $P(T)$  определяется в первую очередь свойствами ПВП, а не передаточной характеристикой используемого фильтра.

На рис. 3, в отобразена зависимость  $P(\Delta T)$  количества ПВП от длительности пакета  $\Delta T$ . Длительность ПВП не превышает 2 ч с наиболее вероятным значением 0,5 ч. На рис. 3, г дано распределение числа пакетов по величине максимальной амплитуды пакета  $P(A_{\max})$ . Вертикальной штриховой линией отмечен порог по амплитуде  $\varepsilon = 0,05$  TECU. Максимум распределения соответствует амплитуде порядка 0,15 TECU.

## 5. Рассмотрение ПВП в системе координат времени терминатора

Для того чтобы проверить гипотезу о связи генерации ПВП с появлением СТ, мы вводим систему локального времени терминатора:  $dT = t_{\text{obs}} - t_{\text{st}}$ , где  $t_{\text{obs}}$  – момент времени в точке, данные которой мы рассматриваем;  $t_{\text{st}}$  – время прихода терминатора на высоту  $h = 200$  км над данной точкой. Таким образом, мы сначала переходим от широты и долготы точки максимальной амплитуды пакета ко времени появления терминатора над этой точкой, а затем определяем разность момента времени в точке  $t_{\text{obs}}$  и времени появления терминатора  $t_{\text{st}}$ . Отличительная черта данного подхода заключается в исключении из рассмотрения конкретных координат точек измерения и рассмотрении их только в контексте взаимосвязи с терминатором.

Метод, описанный в разд. 4, позволяет выявлять ПВП, а также определять время  $t_{\max}$ , на которое приходится максимум огибающей каждого пакета. Зная это время, мы можем определить число волновых пакетов  $N$  в зависимости от локального времени терминатора  $dT = t_{\max} - t_{\text{st}}$  при различных условиях.

На рис. 4 отражена связь увеличения числа ПВП в различное время и над различными территориями с появлением терминатора на высоте 200 км. Гистограмма  $P(dT)$  представляет зависимость числа пакетов, обнаруженных в промежутке времени от  $dT$  до  $dT + \delta t$ , нормированную на максимальное число пакетов, попавших в один промежуток  $\delta t$ . Вся ось  $dT$  охватывает диапазон времени

от  $-12$  до  $12$  ч. Шаг гистограммы  $\delta t$  был выбран равным 15 мин.

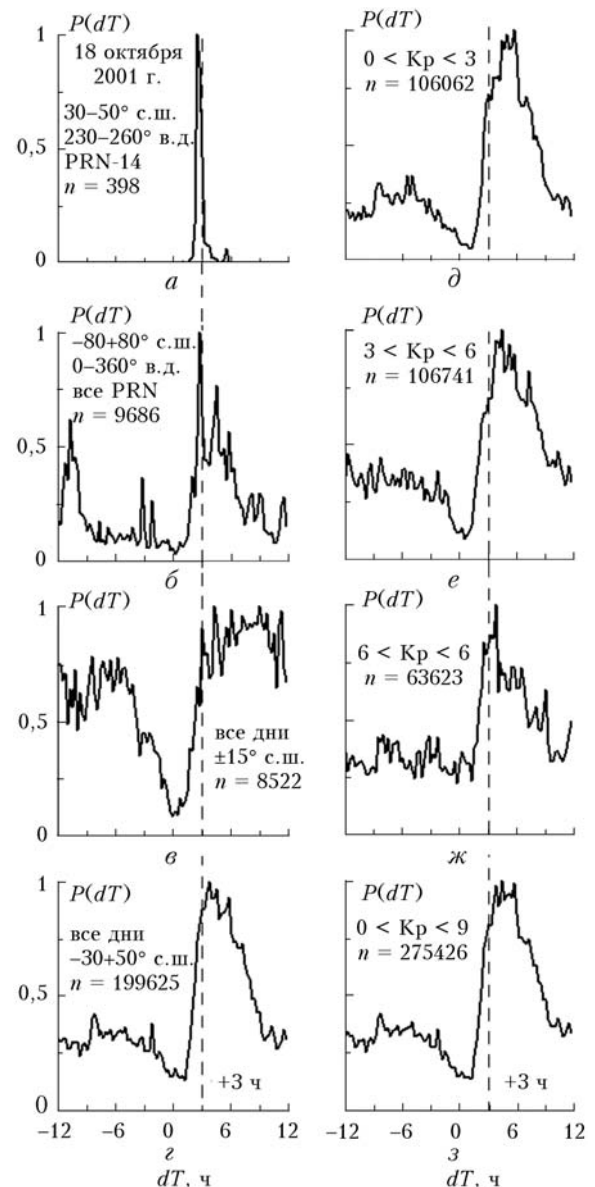


Рис. 4. Относительная плотность появления ПВП в зависимости от разности  $dT = t_{\text{obs}} - t_{\text{st}}$  между временем наблюдения  $t_{\text{obs}}$  и временем появления СТ  $t_{\text{st}}$  над точкой наблюдения на высоте 200 км для 18 октября 2001 г.: а – Запад США, один спутник PRN-14; б – все спутники по всей территории земного шара; в – экваториальная зона, все дни; г – область средних широт; д, е, ж – для всего мира и всех спутников для различных диапазонов Kp; з – для всех имеющихся данных. Вертикальной пунктирной линией отмечено запаздывание появления максимального числа пакетов относительно СТ на высоте 200 км

На рис. 4, а представлено распределение  $P(dT)$  ПВП, зарегистрированных по данным наземных GPS станций США от 18 октября 2001 г. для спутника PRN-14. Распределение имеет форму узкого пика, максимум которого приходится на 3 ч с момента появления терминатора (398 зарегистрированных ПВП). Это время отмечено пунктирной линией.

Аналогичное рассмотрение для данного дня проведено для всех спутников по всему миру ( $\pm 80^\circ$  с.ш.,  $0 \div 360^\circ$  в.д.), при этом число зарегистрированных ПВП составило 9686 (рис. 4, б). На отмеченную пунктиром трехчасовую точку и здесь приходится максимальное число волновых пакетов. Следует отметить, что распределение имеет не гладкий вид, а состоит из нескольких отдельных пиков, что указывает на наличие некоторой квазипериодической структуры, жестко связанной с появлением терминатора.

Вид распределения ПВП  $P(dT)$  различен для разных широт. Для околоэкваториальной зоны характерно практически постоянное присутствие волновых пакетов днем. На рис. 4, в представлено распределение  $P(dT)$  для области, отстоящей от географического экватора на  $\pm 15^\circ$  с.ш. Число зарегистрированных пакетов при этом составило 8522. Почти равномерное распределение имеет ряд зубцов, указывающих на наличие некоторой квазипериодической закономерности в генерации ПВП. Следует отметить, что время появления утреннего терминатора отмечено провалом в распределении, а на трехчасовую метку приходится достижение максимального уровня после провала. Для средних широт ( $30\text{--}50^\circ$  с.ш.) распределение  $P(dT)$  по всем имеющимся дням имеет четкий максимум на трехчасовой отметке — на нее приходится большая часть из 199625 ПВП, зарегистрированных в средних широтах Северного полушария (рис. 4, г).

Картина распределения ПВП  $P(dT)$  при различных значениях планетарного индекса геомагнитной активности  $K_p$  в значительной мере сходна. В каждом из трех диапазонов  $K_p$  ( $K_p < 3$ ;  $3 < K_p < 6$ ;  $6 < K_p < 9$ ) наблюдается пик на отметке 3 ч после наступления терминатора. Однако стоит отметить, что при слабовозмущенной геомагнитной обстановке распределение имеет более гладкий вид, чем при возмущенной (рис. 4, д, е). С увеличением возмущенности кривая приобретает более изрезанный вид. В условиях сильной возмущенности исчезает провал в характеристике, приходившийся на время появления терминатора, однако максимум прослеживается так же хорошо, как и при малых значениях  $K_p$  (рис. 4, ж). Число зарегистрированных пакетов для каждого из этих случаев связано с количеством дней, попадающих в тот или иной диапазон  $K_p$ , данными по которым мы располагали.

Таким образом, переход к системе локального времени терминатора выявил наличие жесткой взаимосвязи генерации волновых пакетов с появлением СТ. Во всех случаях наблюдается резкое возрастание числа пакетов спустя 3 ч после СТ. Максимум появления пакетов приходится практически на одно и то же время, и вид распределений слабо зависит от уровня геомагнитной активности.

## 6. Обсуждение и заключение

Впервые с использованием измерений ПЭС по данным глобальной сети приемников GPS за длительный интервал времени с 1998 по 2007 г. представлена морфология нового класса среднеширотных

СМ ПИВ — перемещающихся волновых пакетов. Полное число зарегистрированных ПВП превышает 275000. ПВП представляют собой узкополосные колебания ПЭС с периодом около 10–20 мин и длительностью порядка 1 ч. Наиболее вероятное значение амплитуды ПВП  $A_{\max}$  составляет  $\sim 0,15$  TECU.

ПВП наблюдаются преимущественно после прохождения утреннего терминатора с задержкой порядка 3 ч, когда временная производная ПЭС достигает максимума. Таким образом, наши наблюдения подтверждают, что СТ является постоянным повторяющимся источником ионосферных волновых возмущений, а также показывают, что GPS-детектирование ионосферных структур, генерируемых СТ, открывает более широкие возможности для исследования данного явления.

Термин «волновые пакеты» впервые в отношении ионосферных неоднородностей применил Hines [1]. Вслед за Hines [1] и Francis [2] мы стали применять данный термин в отношении обнаруженных возмущений. Исследования, проведенные в данной работе, показали, что такое обозначение наиболее адекватно описывает рассматриваемое явление. В частности, ПВП имеют ограниченную длительность (около 1–2 ч) и следуют за СТ. Следовательно, с точки зрения наблюдателя в фиксированной системе координат на поверхности Земли, ПВП представляют собой волновые процессы.

Полученные результаты согласуются с теоретическими указаниями на эффекты воздействия терминатора [5] и не противоречат результатам, полученным Сомиковым [21] и Дробжевым и др. [22], которые основаны на ограниченном статистическом материале. Дробжев и др. [22] и Безотский и др. [23] исследовали динамический спектр действующих высот отражения радиоволн, полученный при вертикальном зондировании ионосферы. Было показано, что в переходные часы при спокойной магнитной обстановке максимум в низкочастотной области спектра сдвигается в сторону высоких частот.

Полученные нами результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего развития теории генерации и распространения ионосферных неоднородностей для различных геогеофизических условий. Наши данные важны для развития физики ионосферных неоднородностей и моделирования трансionoсферного распространения радиоволн. Используя новую среднеширотную модель ионосферы SAMI2, разработанную в исследовательской лаборатории ВМФ США, авторы [24, 25] обнаружили, что ионозвуковые волны могут генерироваться в верхней ионосфере на низких широтах на восходе и закате. Они могут существовать 1–3 ч на высотах порядка высоты перехода  $O^+/H^+$  (около 1000 км) с периодами 10 мин. Эти волны являются результатом резкого нагрева и охлаждения нижней ионосферы во время восхода и заката. На восходе фотоэлектронное нагревание рождает восходящие потоки плазмы,двигающиеся вдоль силовых линий. Эти потоки приводят к локальному сжатию и нагреву плазмы в верхней точке силовой линии, что приводит к генерации ионозвуковых волн. На закате волны генерируются резким охлаждением

плазмы. Однако основное влияние ионозвуковые волны оказывают на высотах выше 1000 км. В то же время основной вклад в колебания электронной концентрации, генерируемые терминатором, был обнаружен радаром некогерентного рассеяния Обсерватории в Миллстоун Хилл на высоте максимума F-слоя (около 300 км) [11].

Пространственно-временные особенности и физическая природа волновых пакетов среднего масштаба, генерируемых солнечным терминатором, будут проанализированы в наших дальнейших работах.

Авторы выражают благодарность доктору J.D. Huba и профессору J.M. Forbes за интерес к работе и полезные дискуссии, а также сотрудникам the Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) and the Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) за предоставленные ими данные GPS, использованные в настоящем исследовании.

Работа поддержана грантом СО РАН—ДВО РАН—НАНУ № 3.24, грантом РФФИ-ГФЕН № 06-05-39026, грантом РФФИ № 07-05-00127, а также проектом INTAS Ref. № 06-1000013-8823.

1. Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* 1960. V. 38. N 8. P. 1441–1481.
2. Francis S.H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. N 34. P. 5245–5259.
3. Beer T. On atmospheric wave generation by the terminator // *Planet. Space Sci.* 1978. V. 26. P. 185–189.
4. Cot C., Teitelbaum H. Generated of the gravity waves by inhomogeneous heating of the atmosphere // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1980. V. 42. N 9/10. P. 877–883.
5. Сомских В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1983. 192 с.
6. Somsikov V.M. A spherical model of wave generation in atmosphere by solar terminator // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1987. V. 49. N 5. P. 433–438.
7. Somsikov V.M., Ganguly B. On the mechanism of formation of atmospheric inhomogeneities in the solar terminator region // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1995. V. 57. N 12. P. 75–83.
8. Mishin E.V., Epishova A.E., Ishkova L.M., Kovalevskaya E.M., Kozlov E.F., Kolokolov L.E., Rubcov L.N., Samorokin N.I., Sidorova L.N., Somsikov V.M., Telegin V.A., Yudovich L.A. Disturbances of F-region electron density following solar terminator during the WITS period of 16–20 March // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1991. V. 53. N 6/7. P. 643–648.
9. Sobral J.H.A., Borba G.L., Abdu M.A., Batista I.S., Sawant H., Zamlutti C.J., Takahashi H., Nakamura Y. Post-sunset wintertime 630.0 nm airglow perturbations associated with gravity waves at low latitudes in the South American sector // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1997. V. 59. N 13. P. 1611–1623.
10. Dominici P., Cander L.R., Zolesi B. On the origin of medium-period ionospheric waves and their possible

modeling: a short review // *Ann. geofis.* 1997. V. XL. N 5. P. 1171–1178.

11. Galushko G., Paznukhov V.V., Yampolski Y.M., Foster J.C. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator // *Ann. Geophys.* 1998. V. 16. N 7. P. 821–827.
12. Hocke K., Igarashi K. Electron density in the F region derived from GPS/MET radio occultation data and comparison with IRI // *Earth, Planets, and Space.* 2002. V. 54. N 10. P. 947–954.
13. Šauli P., Abry P., Altadill D., Boška J. Detection of the wave-like structures in the F-region electron density: two station measurements // *Stud. Geophys. Geod.* 2006. V. 50. N 1. P. 131–146.
14. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Ann. Geophys.* 1996. V. 14. N 2. P. 917–940.
15. Forbes J.M., Bruinsma S.L., Miyoshi Y., Fujiwara H. A solar terminator wave in thermosphere neutral densities measured by the CHAMP satellite // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. N L14802, doi:10.1029/2008GL034075.
16. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
17. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П., Воeyков С.В. Traveling wave packets of total electron content disturbances as deduced from global GPS network data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2003. V. 65. N 11/13. P. 1245–1262.
18. Афраимович Э.Л. First GPS-TEC evidence of wave structure excited by solar terminator moving // *Earth, Planets and Space.* 2008. V. 60. P. 895–900.
19. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: theory and practice.* N.Y.; Wien: Springer-Verlag, 1992. 327 p.
20. Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // *IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst.* 1986. V. 23. N 3. P. 325–331.
21. Сомских В.М. О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором // *Геомагнетизм и аэрон.* 1992. Т. 32. № 3. С. 55.
22. Дробжев В.И., Зачатейский Д.Е., Козина П.Е., Конопляно М.М., Курманалиев Д.А., Сомских В.М. Среднеширотные особенности короткопериодных возмущений в ионосфере во время прохождения солнечного терминатора // *Геомагнетизм и аэрон.* 1992. Т. 32. № 1. С. 181–183.
23. Безотосный А.А., Дробжев В.И., Сомских В.М., Аксаров А.Г., Беляев В.А. Об особенностях вариаций действующих высот отражений в переходные часы суток // *Геомагнетизм и аэрон.* 1994. Т. 34. № 2. С. 170–172.
24. Huba J.D., Joyce G. Ion sound wave in the topside low latitude ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2000a. V. 27. N 19. P. 3181–3184.
25. Huba J.D., Joyce G. Sami2 is another model of ionosphere (SAMI2): a new low-latitude ionosphere model // *J. Geophys. Res. A.* 2000b. V. 105. N 10. P. 23035–23053.

*E.L. Afraimovich, I.K. Edemskii, S.V. Voeykov, Yu.V. Yasyukevich, I.V. Zhivetiev. Travelling wave packets generated at high altitude by solar terminator.*

For the first time morphology of the new type of mid-latitude mid-scale traveling ionosphere disturbances – traveling wave packets (TWP) – is presented by using of total electron content (TEC) measurements from global net of GPS-receivers for a long period from 1998 to 2007. Total amount of the registered TWP exceeds 275 000. In the time context TWP is narrow-band TEC oscillations with duration about an hour and with period about 10–20 min. TWP is seen in general about 3 hours after morning solar terminator moving, when temporal derivatives of the TEC have reached maximum.