

Сезонные и широтные вариации параметров волновых возмущений МГД-природы, генерируемых солнечным терминатором

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

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291
E-mail: ilya@iszf.irk.ru

В данной работе представлены сезонные особенности регистрации волновых пакетов (ВП), генерируемых солнечным терминатором (СТ), полученные по данным наиболее плотных на сегодняшний день сетей GPS-приемников, расположенных в Японии и в США. При общем числе станций порядка 1220, число регистрируемых ВП в Японии выше, чем в США, примерно в два раза зимой и в 5-6 раз в остальные сезоны. Сезонное изменение времени начала регистрации ВП находится в согласии с гипотезой о магнитогидродинамической природе волновых пакетов, предложенной ранее. Важным подтверждением данной гипотезы является наблюдение изменения начала регистрации ВП с изменением широты. В северном регионе Японии (38° - 45° N) время между началом регистрации пакетов 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.

Ключевые слова: солнечный терминатор, волновые возмущения, ионосфера, GPS, полное электронное сопротивление, МГД.

1. Введение

Исследования ионосферных и атмосферных эффектов различного типа (Beer, 1978; Сомиков, 1983), обусловленных солнечным терминатором (СТ), ведутся уже на протяжении достаточно долгого времени. Геометрия его движения хорошо известна и меняется постепенно, поэтому терминатор представляет собой предсказуемое повторяющееся воздействие. Анализ эффектов воздействия СТ на атмосферу, параметры которой постоянно изменяются, позволяет получить более полное представление о происходящих в ней процессах и о взаимодействии различных геосфер в целом.

Широкое развитие спутниковой системы GPS предоставило еще один инструмент для ионосферных исследований и, в частности, исследований ионосферных возмущений, генерируемых СТ. Использование плотных сетей станций GPS позволяет осуществлять картирование вариаций ПЭС с разрешением ~ 20 км, что ранее было доступно только для оптических систем. С использованием данных плотных сетей в Японии и Калифорнии в работе (Afraimovich, 2008) были представлены волновые пакеты (ВП), появление которых было синхронизировано с прохождением СТ. Последующие работы показали (Afraimovich et al., 2009), что генерация пакетов может начинаться до прихода СТ в точку наблюдения. В то же время их появление синхронизировано со временем появления СТ в магнитосопряженной области. Последний факт позволил высказать гипотезу, о магнитогидродинамической (МГД) природе наблюдавшихся волновых пакетов.

Волновые пакеты могут иметь и другие источники. Акусто-гравитационные волны, генерируемые при прохождении терминатора, распространяясь в верхние слои атмосферы,

могут вызывать вариации ПЭС с теми же частотами, что и МГД ВП. Кроме того, согласно МГД-гипотезе (Leonovich et al., 2010) вариации ПЭС могут наблюдаться также в локальной точке прохождения СТ, будучи при этом сгенерированы под действие ионозвуковой волны, образованной под действием СТ на магнитосиловую трубку. Исходя из МГД-гипотезы, при смене географического положения и сезона года должны изменяться параметры и время регистрации пакетов. Подобные исследования предоставят дополнительные подтверждения данной гипотезе.

2. Методика отбора волновых пакетов

Стандартная технология GPS предоставляет возможность детектирования волновых возмущений по данным фазовых измерений ПЭС $I(t)$ вдоль луча «приемник-ИСЗ» (Hofmann-Wellenhof, 1992; Афраймович, Перевалова, 2006). Ряды $I(t)$ сглаживаются с временным окном 5 мин, затем с окном 20 мин удаляется линейный тренд. Таким образом, мы получаем вариации ПЭС $dI(t)$ в диапазоне периодов 5–20 мин.

Технология глобального поиска волновых пакетов, разработанная в ИСЗФ СО РАН, позволяет отбирать возмущения ПЭС, подходящие под классификацию ВП (Афраймович, Перевалова, 2006). Выделение таких рядов ПЭС происходит по двум критериям. Во-первых, выбираются такие вариации ПЭС, для которых значение СКО превышает заданный порог ε (в данном случае $\varepsilon=0.05$ TECU, TECU = 1016 эл/м²). Затем, для каждого ряда мы проверяем выполнение условия «узкополосности» колебаний ПЭС: отношение R суммарной спектральной амплитуды в заданной полосе частот δF в окрестности максимальной амплитуды S_{\max} к суммарной спектральной амплитуде за пределами полосы δF должно превышать заданный предел R_{\min} . В нашем случае $R_{\min}=2$.

Для анализа особенностей генерации волновых пакетов при прохождении СТ, мы вводим систему локального времени терминатора (ЛВТ): $dT=t_{\max}-t_{st}$, где t_{\max} – момент регистрации максимума пакета в выбранной точке, а t_{st} – время появления терминатора на выбранной высоте $h=300$ км над данной точкой (Афраймович и др., 2010). Переход в систему ЛВТ позволяет производить когерентное накопление вариаций ПЭС, связанных с прохождением СТ.

3. Сезонные вариации параметров волновых пакетов

Для исследования характеристик волновых пакетов и их изменений в зависимости от сезона и географического положения приемных пунктов было выбрано 160 дней в 2008 г, т.е. в период минимума солнечной активности. Использовались данные с двух наиболее плотных на сегодняшний день сетей станций: в США (30-50°N, 235-250°E), приемники которой располагаются преимущественно в штате Калифорния, и в Японии (30-46°N, 129-146°E). Японская сеть GEONET насчитывает на сегодня 1228 станций, примерно такое же их количество (1221) находится на территории США в указанных нами границах.

Сезонные особенности поведения волновых пакетов летом исследовались по данным за 41 день (номера дней от начала года: 142 – 150, 155 – 166, 182 – 186, 192 – 206), весной – за 37 дней (092 – 128), осенью – за 41 день (245 – 247, 250 – 276, 280, 281, 287 – 295) и зимой – из 41 день (313 – 319, 325 – 333, 338 – 342, 344 – 363). Использование приблизительно

равного количества дней позволяет при оценках рассматривать число регистрируемых пакетов без нормировки на число дней. Геомагнитная обстановка за рассматриваемые периоды была слабовозмущенной: наибольшее среднее значение индекса за день составляло порядка 3,5, за исключением одного дня в весенном периоде (114-й день), когда средняя величина Кр составила порядка 4,47.

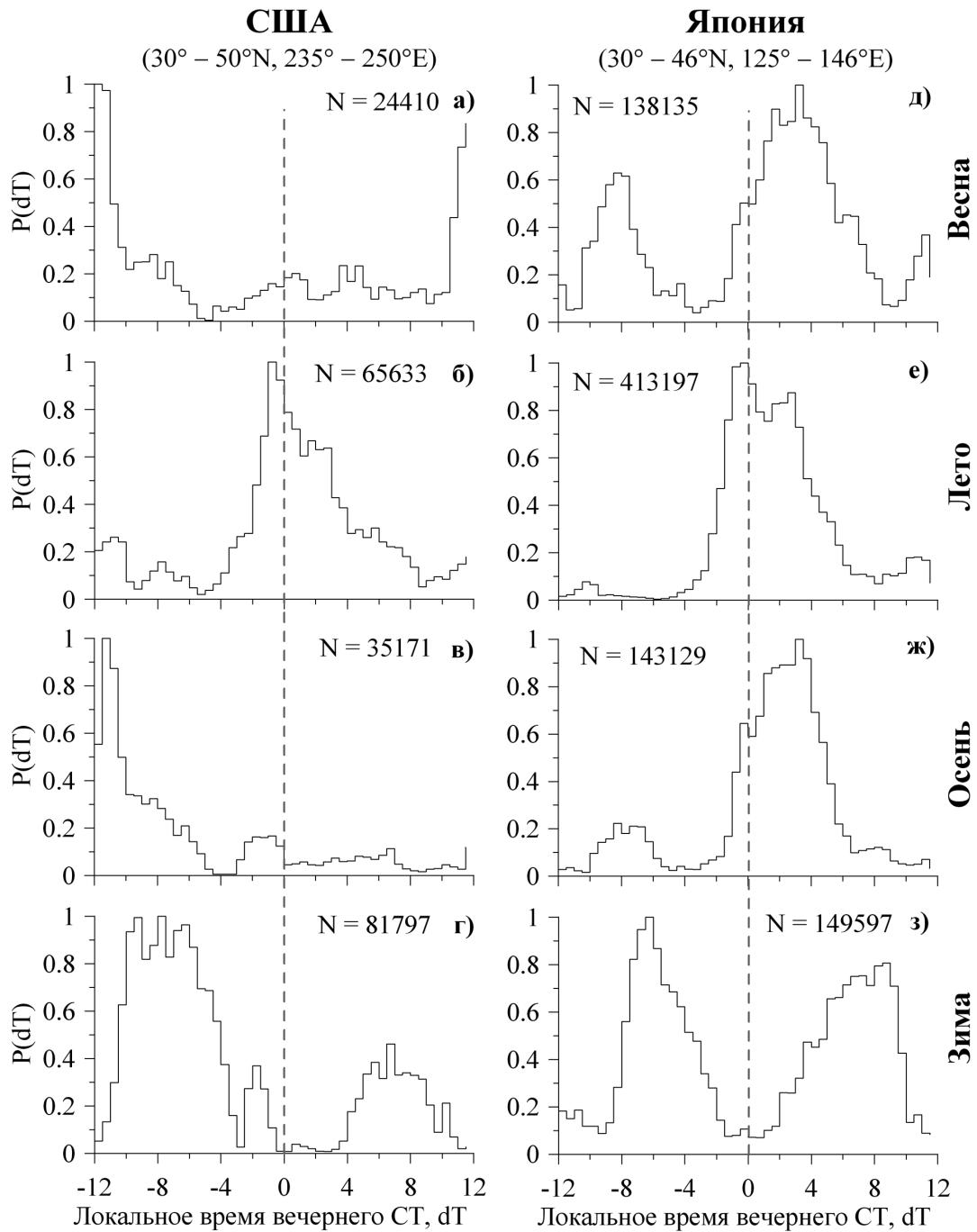


Рис. 1. Распределение количества волновых пакетов в системе ЛВТ на территории Японии (черная линия) и США (серая линия) весной, летом, осенью и зимой

На рис. 1 представлены нормированные распределения $P(dT)$ плотности появления ВП над территорией Японии (черная линия) и США (серая линия) в различные сезоны в системе локального времени вечернего СТ. Пунктирная линия отмечает закат Солнца на высоте 300 км. В указанный выше весенний период по данным приемников GPS, расположенных

ных в США, было зарегистрировано 24 410 пакетов, в летний – 65 633, в осенний – 35 171 и в зимний – 81 797. Таким образом, в США наибольшее число пакетов регистрируется в зимнее время. Отклик на прохождение вечернего СТ в зимнее время регистрируется спустя ~ 4 ч после его прохождения. Начало регистрации ВП практически совпадает со временем прохождения СТ в магнитосопряженной области или магнитосопряженного солнечного терминатора (МССТ).

Наиболее сильный отклик на прохождение вечернего СТ в США регистрируется в летнее время (рис. 1б). Пик летнего распределения наблюдается приблизительно за час до появления вечернего СТ, регистрация ВП начинается примерно за 4 ч до его появления. Увеличение количества пакетов после прохождения утреннего СТ наблюдается по шкале ЛВТ заката на отметке 11-12 ч, что соответствует 2-3 ч после прохождения утреннего СТ. В обоих случаях это согласуется со временем прохождения МССТ. В весенний и осенний периоды (рис. 1а, в) можно также наблюдать отклик на прохождение вечернего СТ – регистрация ВП начинается примерно за два часа прохождения СТ. Однако максимальное число регистрируемых в это время пакетов составляет порядка 20% от максимального их количества, регистрируемого после прохождения утреннего СТ. Отклик на прохождение утреннего терминатора начинает регистрироваться спустя порядка 3 ч весной и 2 ч – осенью, что также согласуется с временем прохождения МССТ.

В Японии за те же дни было зарегистрировано 138 135 ВП в весенний период, в летний – 413 197, в осенний – 143 129 и в зимний – 149 597 (рис. 1, черная линия). Таким образом, наибольшее количество пакетов наблюдается в Японии в летний период, а общее количество регистрируемых в данном регионе пакетов, в целом, выше, нежели в США.

Распределения, полученные по данным GEONET, отличаются от полученных для США более значительным откликом на прохождение вечернего СТ для всех сезонов. Отклик на прохождение утреннего СТ практически не наблюдается летом, а весной и осенью достигает уровней 0,62 и 0,22 от уровня отклика на вечерний СТ, соответственно. В зимнее время количество пакетов, регистрируемых после прохождения вечернего СТ составляет ~ 0,7 от уровня после прохождения утреннего.

Регистрация волновых пакетов в весенний (рис. 1а) и осенний (рис. 1в) периоды начинается примерно за час до прохождения СТ в области наблюдения. Пики распределений наблюдаются спустя ~ 4 ч после прохождения вечернего СТ. В летний период регистрация волновых пакетов начинается примерно за 3 ч до прихода СТ. Распределение имеет два максимума, наблюдаемых примерно за час до прохождения вечернего терминатора и спустя порядка трех часов после (рис. 1б). Зимой (рис. 1г) увеличение количества волновых пакетов наблюдается спустя порядка 4 ч после прохождения как утреннего, так и вечернего терминаторов. Пик распределения, наблюдаемый после прохождения вечернего СТ, приходится на отметку 8 ч и составляет порядка 0,7 от максимального количества пакетов в данный сезон.

За указанные дни для каждого сезона были получены распределения количества волновых пакетов по амплитудам (рис. 2а, б) и периодам (рис. 2в, г) для Японии (сверху) и США (снизу). Распределения для зимы, весны, лета и осени даны, соответственно, синим, зеленым, желтым и оранжевым цветами. Шаг по шкале абсцисс гистограммы составляет 0,0125 ТЕСУ. Пунктирной линией отмечено пороговое значение ε .

В Японии наиболее вероятное значение амплитуды пакета составляет 0,15 ТЕСУ независимо от сезона (рис. 2а). Наиболее узкое распределение наблюдается в зимнее время, далее следуют по мере увеличения ширины – весеннее, осенне и летнее распределения.

Для региона Калифорнии наибольшее количество ВП также имеют амплитуду 0,15 ТЕСУ и по возрастанию ширины распределения располагаются следующим образом (рис. 2б): весеннее, осенне, летнее и зимнее. В данном регионе зимнее распределение имеет наибольшую ширину. В осенном и летнем распределениях присутствует небольшой пик, максимум которого приходится на $\sim 0,06$ ТЕСУ.

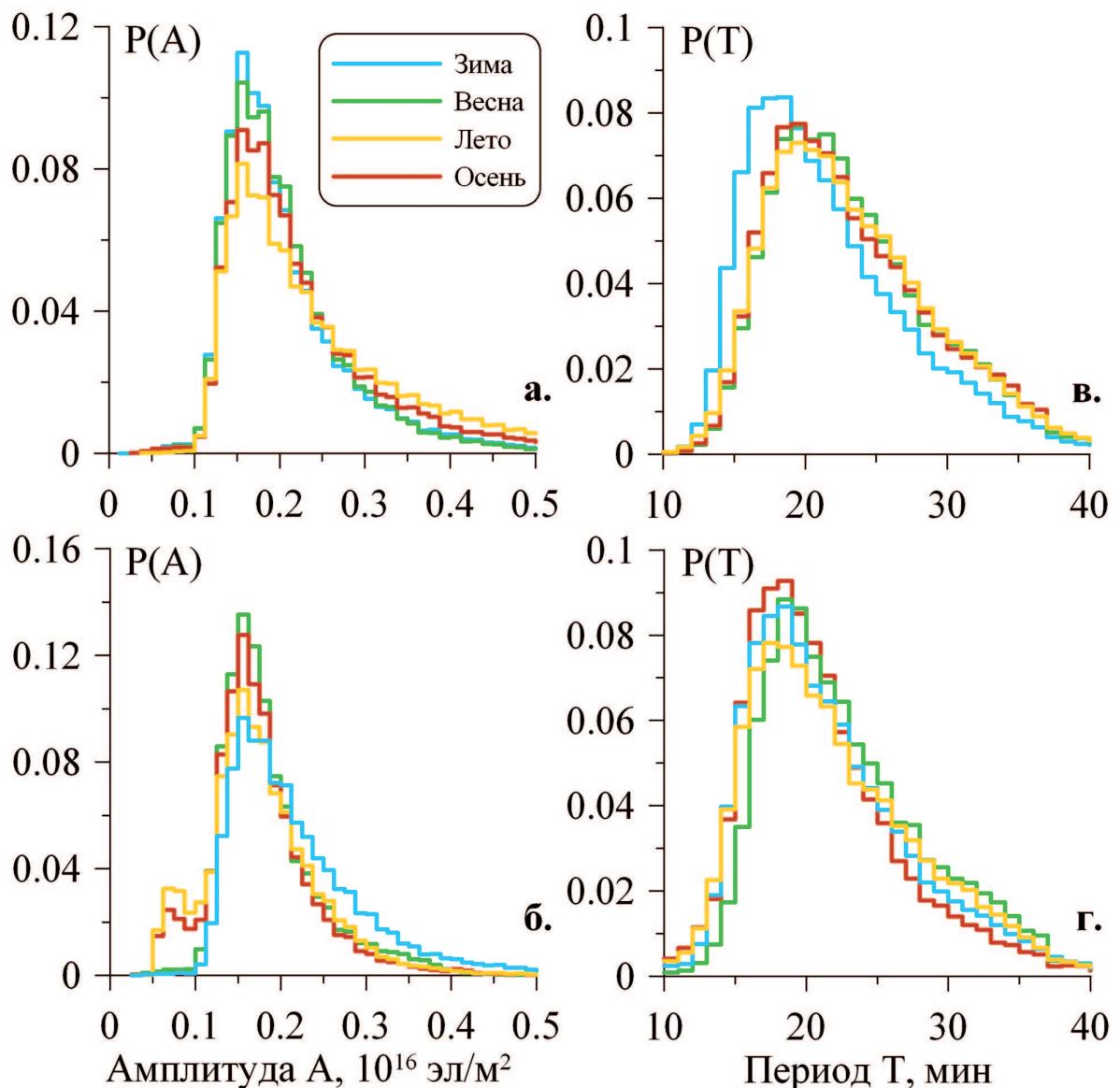


Рис. 2. Распределение количества зарегистрированных волновых пакетов по амплитудам (а, б) и периодам (в, г) для Японии (сверху) и США (снизу)

4. Широтные изменения количества регистрируемых волновых пакетов

Согласно гипотезе о магнитогидродинамической природе ВП (Afriamovich et al., 2009), их генерация начинается при прохождении СТ в магнитосопряженной области. Вследствие изменения наклона линии терминатора относительно магнитного экватора в течение года можно наблюдать изменение времени начала регистрации ВП. Вследствие этого же наклона мы должны наблюдать изменение временного отрезка между началом регистрации пакетов

и приходом СТ в локальную точку. При уменьшении геомагнитной широты этот интервал должен уменьшаться, при увеличении – увеличиваться.

Для исследования изменений характеристик волновых пакетов с широтой были выбраны два региона: «Север», расположенный на севере Японии ($38^{\circ} - 45^{\circ}\text{N}$; $138^{\circ} - 145^{\circ}\text{E}$), и «Юг», расположенный на юге ($30^{\circ} - 35^{\circ}\text{N}$; $130^{\circ} - 140^{\circ}\text{E}$). Регион «Юг» содержит 463 станции, «Север» – 285 станций. Распределения количества пакетов, полученные для четырех сезонов за те же дни, что и представленные ранее (рис. 1), показаны на рис. 3. Они нормированы так, чтобы максимальное значение соответствовало единице.

В северном регионе (рис. 3, черная линия) весной общее число пакетов составило – 14 842 (а), летом – 55 179 (б), осенью – 13 903 (в), зимой – 24 169 (г). Регистрация пакетов в северном полушарии летом (рис. 3б) начинается примерно за два часа до прохождения вечернего СТ, максимум ВП наблюдается примерно за час до прохождения СТ. Отклик на прохождение утреннего СТ можно наблюдать в точке –10 ч по шкале ЛВТ заката.

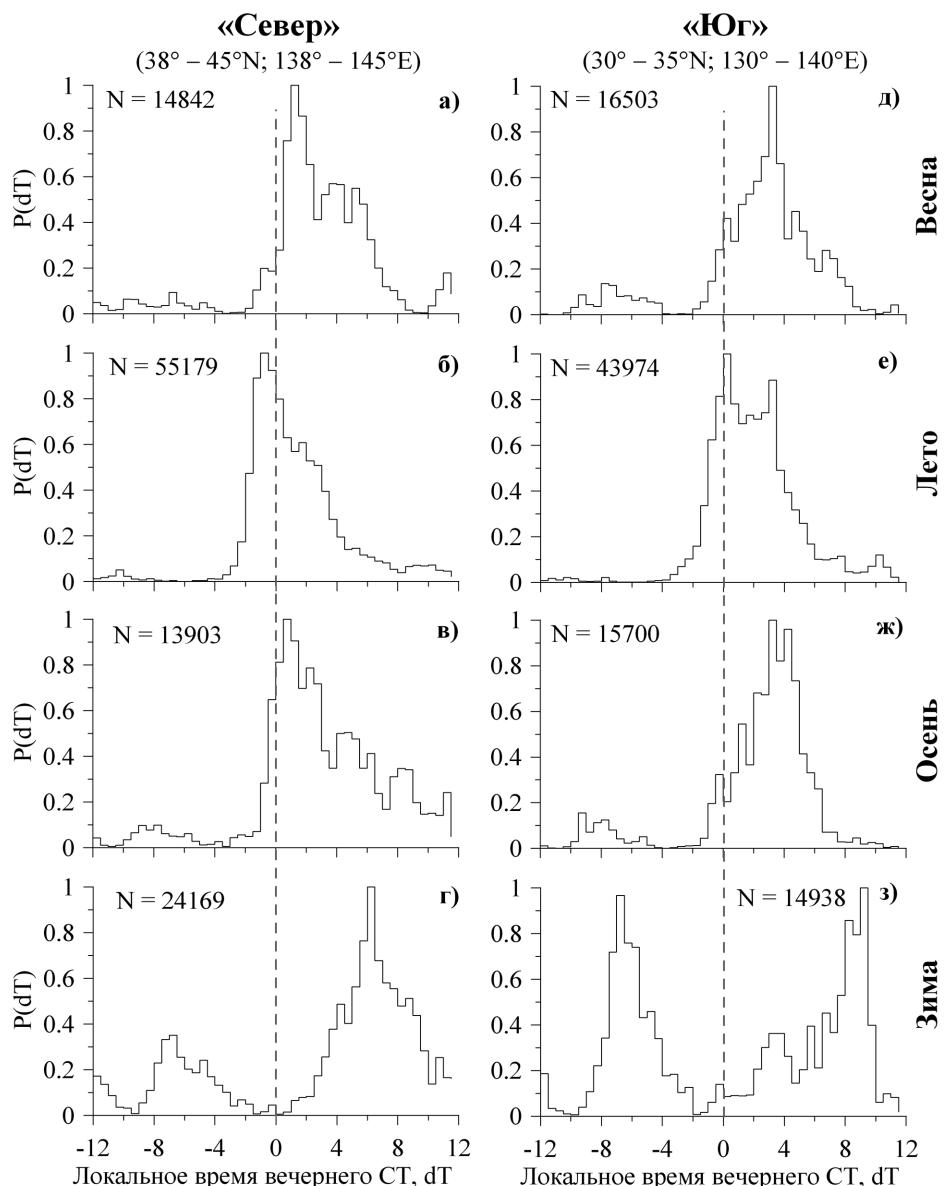


Рис. 3. Распределение количества волновых пакетов, наблюдавшихся в регионах «Север» ($38^{\circ} - 45^{\circ}\text{N}$; $138^{\circ} - 145^{\circ}\text{E}$) и «Юг» ($30^{\circ} - 35^{\circ}\text{N}$; $130^{\circ} - 140^{\circ}\text{E}$) в различные сезоны

Наибольшее число пакетов весной и осенью регистрируется спустя ~ 30 мин после прохождения вечернего терминатора (рис. 3 а, в). Зимнее распределение (рис. 3г) демонстрирует увеличение количества пакетов после прохождения как вечернего, так и утреннего СТ. При этом «утренний» отклик достигает значения $\sim 0,4$ от уровня «вечернего». Регистрация пакетов после прохождения вечернего терминатора зимой начдается спустя порядка 4 ч, наибольшее их число наблюдается спустя порядка 6 ч.

В южном регионе (рис. 3, серая линия) общее число пакетов весной составило 16 503, летом – 43 974, осенью – 15 700, зимой – 14 938. В летнее время пакеты начинают регистрироваться примерно за час до прохождения вечернего СТ, их максимум наблюдается практически одновременно с прохождением СТ. Весной в южном регионе пакеты появляются меньше, чем за полчаса до прихода вечернего терминатора, максимум наблюдается спустя ~ 3 ч после его прохождения. Регистрация волновых пакетов осенью начинается примерно за полчаса до прохождения вечернего СТ, их количество достигает уровня 0,3, затем наблюдается еще один пик спустя ~ 1 ч после прохождения СТ. Наибольшее число ВП наблюдается спустя $\sim 3 - 4$ ч после прохождения вечернего СТ, т.е. практически в то же время, что и в летний период.

Зимнее распределение для региона «Юг» также имеет два максимума, но наблюдаемый после прохождения утреннего СТ (-6 ч) выражен более значительно, практически достигая значения 1,00. Регистрация пакетов, связанных с вечерним СТ, начинается спустя ~ 2 ч после его прохождения и пик приходится на 3 ч, достигая уровня 0,4. Больше всего пакетов наблюдается спустя ~ 8 ч после прохождения вечернего СТ.

Для демонстрации изменения времени регистрации волновых пакетов с широтой в летний период мы использовали динамические спектры вариаций ПЭС, рассчитанные по данным сети GEONET для регионов «Север» и «Юг». Динамические спектры накапливались в системе ЛВТ из одиночных спектров, рассчитанных с помощью быстрого преобразования Фурье для каждого луча «спутник-приемник» каждой станции сети. Шаг по оси времени составляет 5 мин.

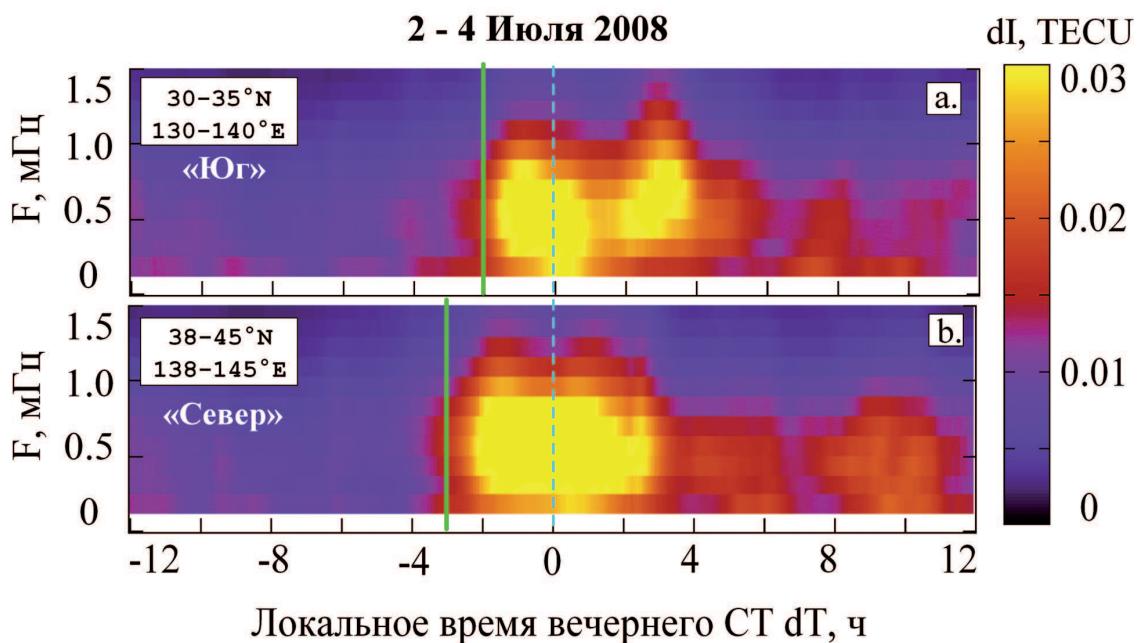


Рис. 4. Динамические спектры за период 2-4 июля 2008 г. для регионов «Север» (а) и «Юг» (б).
Синяя линия отмечает время прихода СТ в магнитосопряженную точку

На рис. 4 представлены динамические спектры в системе ЛВТ заката за 2-4 июля 2008 для регионов «Север» (а) и «Юг» (б). Разница между временем появления СТ и МССТ составляет порядка 2 часов для региона «Юг» и около 3 – для региона «Север». Наблюданная разница между временем появления СТ и временем начала регистрации пакетов хорошо согласуется с данными распределений (рис. 4). В обоих случаях наблюдается две области повышения мощности спектра: после прохождения МССТ и после прохождения СТ в локальной точке. Это позволяет предполагать, что генерация ВП осуществляется в два этапа и суммарно наблюдаемые ВП имеют различные источники.

5. Заключение и обсуждение

Результаты, полученные в данной работе, согласуются с представленными ранее по данной тематике (Afraimovich, 2008; Afraimovich et al., 2009; Афраймович и др., 2010). В работе (Afraimovich et al., 2009) были представлены данные по сезонным изменениям динамических спектров в системе ЛВТ, которые также согласуются с нашими данными.

Представленные результаты показывают, что наибольшее число ВП, в среднем, регистрируется в Японии в летнее время, в США – в зимнее. При общем числе станций ~ 1220, в Японии наблюдается больше пакетов, чем в США, примерно в 2 раза зимой и в 5-6 раз в остальные сезоны. Сезонное изменение времени начала регистрации ВП находится в согласии с гипотезой о МГД природе ВП. Различное количество регистрируемых ВП, по-видимому, связано с тем, что находясь в одном широтном поясе, данные регионы расположены на различных геомагнитных широтах: геомагнитной широте 40°N в Японии соответствует географическая широта 45°N, а в выбранном нами регионе США – 35°N.

Сезонные изменения амплитуды и периода в целом незначительны за исключением некоторых особенностей. Распределения по величине амплитуды в США летом и осенью демонстрируют нетипичное, хотя и небольшое, увеличение в области малых амплитуд. На фоне распределений для других сезонов и другого региона (Афраймович и др., 2010), можно предполагать, что данным амплитудам соответствуют ВП, механизм или условия генерации которых отличаются от остальных. При рассмотрении распределений по периодам следует учитывать, что движение спутника вызывает погрешности определения периода и можно предполагать, что исследование данных вариаций с помощью, например, геостационарных ИСЗ даст более узкие распределения.

Важным подтверждением гипотезы о МГД-природе волновых пакетов является наблюдение изменения начала их регистрации с изменением широты. В северном регионе время между началом регистрации ВП и приходом СТ больше, чем в южном, что соответствует разнице между временами прихода СТ и МССТ в данных регионах.

Дополнительным подтверждением присутствия широтных изменений времени регистрации ВП служат динамические спектры, рассчитанные для трех дней лета. На данных спектрах видно очень хорошее согласие с поведением распределений количества ВП для летнего. Кроме того, на спектрах различимы две области повышения спектральной мощности, что является указанием на регистрацию ВП, генерируемых в разное время и, видимо, различными локальными источниками. Это вполне согласуется с представлением о МГД-природе ВП (Leonovich et al., 2010). Движение СТ в магнито-сопряженной области вызывает генерацию волны медленного магнитного звука (ММЗ), который распространяясь по

магнитосиловой линии, вызывает вариации ПЭС в локальной точке. В момент прохождения СТ в локальной точке также происходит генерация ММЗ, отклик на которую регистрируется в ПЭС в точке генерации, т.е. – в локальной точке.

Наблюдаемые в зимнее время ВП регистрируются спустя порядка 4 ч после прохождения утреннего СТ. Это может быть связано с тем, что в зимнее время в Северном полушарии ширина СТ увеличивается и градиенты термодинамических величин на его границе, соответственно, уменьшаются. Поэтому возможно, что условия, необходимые для генерации ВП, создаются только при достаточно высоком положении Солнца. Таким образом, можно говорить, что наличие источника возмущений не является достаточным – необходимо создания условий для генерации и поддержания колебаний. По-видимому, в остальные сезоны такие условия создаются в часы заката и восхода.

Исследование особенностей поведения ВП в зимний период, а также исследование ВП по данным станций Южного полушария представляет значительный интерес и является темой дальнейших исследований в данной области.

Благодарности

Авторы выражают благодарность институту географической съемки Японии (Geographical Survey Institute of Japan), а также Международной службе глобальных навигационных спутниковых систем (International GNSS Service, IGS) за данные GPS, использованные в работе. Работа поддержана грантом РФФИ 10-05-00113, грантом Президента РФ МК-3094.2010.05, а также Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК 14.740.11.0078).

Литература

1. Афраймович Э.Л., И.К. Едемский, С.В. Войков, Ю.В. Ясюкевич, И.В. Живетьев. МГД природа ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 1. С. 82-99.
2. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
3. Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1983. 192 с.
4. Afraimovich E.L. First GPS-TEC evidence of wave structure excited by solar terminator // Earth, Planets and Space. 2008. V. 60. P. 895-900.
5. Afraimovich E.L., I.K. Edemskiy, A.S. Leonovich, L.A. Leonovich, S.V. Voeykov, Yu.V. Yasyukevich. The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L15106. doi:10.1029/2009GL039803.36.
6. Beer T. On atmospheric wave generation by the terminator // Planet. Space Sci. 1978. V. 26. № 2. P. 185-188.
7. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice // New York: Springer-Verlag Wien. 1992. P. 327.
8. Leonovich A.S., D.A. Kozlov, I.K. Edemskiy. Standing slow magnetosonic waves in a dipole-like plasmasphere // Planetary and Space Science. 2010. V. 58. P. 1425–1433.

Seasonal and latitudinal variations of parameters of MHD-nature wave packets, generated by solar terminator

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

*Institute of solar-terrestrial physics SB RAS
664033, Russia, Irkutsk, Lermontov st., 126a, p.o. box 291
E-mail: ilya@iszf.irk.ru*

This paper presents seasonal registration features of wave packets (WP), generated by solar terminator (ST). Results achieved using data of most dense GPS-site networks, located in Japan and USA. Total number of sites for the both networks is about 1220 sites. Registered WPs quantity in Japan is higher in total than in USA: in winter in Japan are registered in two times more WPs than in USA. For other seasons number of registered in Japan WPs is higher about 5-6 times than in USA. 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.

Keywords: solar terminator, wave disturbances, ionosphere, GPS, total electron content, MHD.