

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ, ПО ДАННЫМ GPS ЗА 2008 г.

П.Л. Малькова, И.К. Едемский

### STUDYING THE LATITUDINAL FEATURES OF WAVE DISTURBANCES IN THE IONOSPHERE GENERATED BY SOLAR TERMINATOR ACCORDING TO 2008 GPS DATA

P.L. Malkova, I.K. Edemsky

Исследование влияния солнечного терминатора (СТ) на ионосферу Земли является важной задачей физики ионосферы. Изучение эффектов СТ обусловлено необходимостью решения ряда прикладных задач радиосвязи, радиолокации, навигации, поскольку эффекты оказывают влияние на характеристики распространяющихся сигналов. В настоящей статье представлены результаты наблюдения волновых пакетов (ВП) в полном электронном содержании на территориях Северной (30–50° N, 225–300° E) и Южной (10° N – 40° S, 250–350° E) Америки. В работе представлены особенности генерации волновых возмущений СТ в утренние и вечерние часы. Исследование проведено для различных регионов земного шара по данным за весь 2008 г. с целью выявления широтных особенностей генерации волновых возмущений в различные сезоны. Для средних широт показано наличие связи времени регистрации ВП со временем прохождения СТ в магнитосопряженной области. Для экваториальных широт наличие связи не наблюдается.

Studying solar terminator influence on the ionosphere is an important problem of ionosphere physics. Such studies are important for radio communication, radar-location and navigation because ionosphere irregularities impact on propagating signal characteristics. We present results of total electron content wave packet observations over North America (30–50° N, 225–300° E) and South America (10° N – 40° S, 250–350° E). We investigated features of wave disturbances in morning and evening hours. Based on 2008 data, latitudinal features of wave packet were studied for various seasons. Wave packets recording time agree with a moment of solar terminator passage in magneto-conjugate regions at middle latitudes. For equatorial latitudes such agreement was not revealed.

Исследование динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации, а также процессов в околоземном пространстве, является одной из ключевых задач физики ионосферы. Изучение структуры ионосферы и явлений, влияющих на ее состояние, важно как для понимания физики протекающих в ней процессов, так и для решения разнообразных радиофизических задач. Одной из важных задач является мониторинг состояния ионосферы во время прохождения солнечного терминатора (СТ) – области, отделяющей пространство, освещаемое полным диском Солнца, от области полной тени, отбрасываемой Землей), поскольку установлено, что в ионосфере происходит генерация различных возмущений, связанных с его прохождением СТ [Сомников, 1983]. СТ представляет собой повторяющееся регулярное явление, что позволяет проводить множественные наблюдения, повышающие статистическую достоверность полученных результатов.

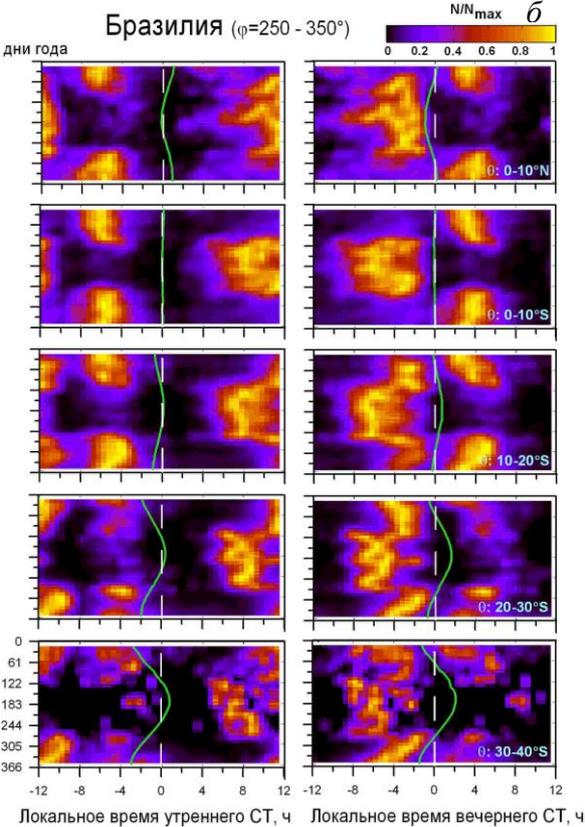
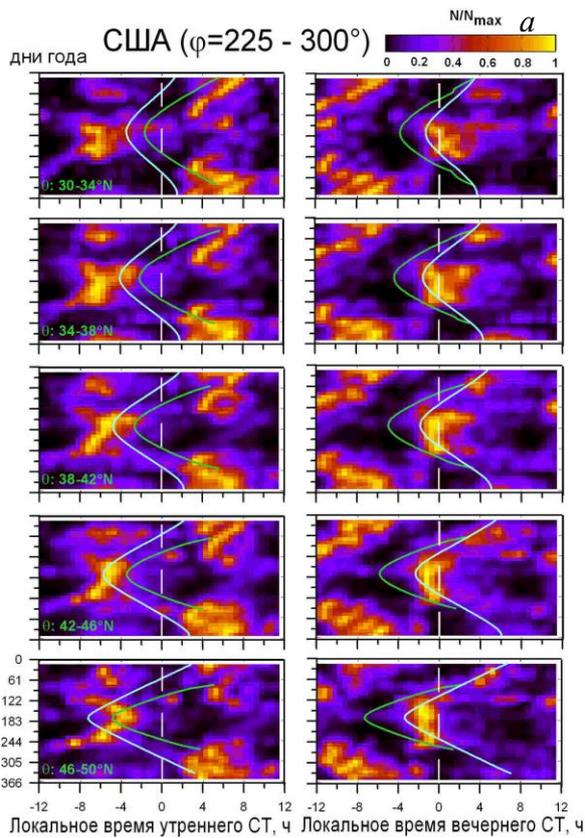
В настоящее время для определения параметров и характеристик волновых возмущений, вызванных СТ, существует радиофизический метод, позволяющий проводить экспериментальные исследования с помощью спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Использование навигационной системы очень удобно, так как позволяет наблюдать пространственно-временную структуру ионосферных возмущений непрерывно с хорошим разрешением.

Предыдущие исследования [Едемский и др., 2011] показали, что СТ вызывает генерацию волновых возмущений, существующих во всей толще атмосферы. По данным измерений полного электронного содержания (количество электронов, содержащихся в столбе сечением 1 м<sup>2</sup>, соединяющем приемник и спутник) на сети приемников GPS было обнаружено, что эти возмущения наблюдаются в форме

волновых пакетов (ВП). В работе [Едемский и др., 2011] изучены особенности возмущений по данным станций США и Японии. На основе полученного материала авторами [Afraimovich et al., 2009] сделан вывод, что наблюдаемые возмущения имеют магнитогидродинамическую природу.

В предыдущих работах исследования характеристик и параметров ВП проводились по данным двух небольших регионов Японии и США, что дало возможность проследить только общую динамику возмущений. В настоящей работе изучены широтные особенности волновых возмущений на территориях Северной (30–50° N, 225–300° E) и Южной (10° N – 40° S, 250–350° E) Америки (рис. 1, 2) на протяжении 2008 г. Этот период был выбран вследствие низкого уровня солнечной и геомагнитной активности. Авторами [Afraimovich et al., 2009] выдвинуто предположение, что из-за сезонного изменения угла наклона линии СТ относительно геомагнитных линий время регистрации ВП на различных широтах меняется. Предположение было проверено по данным исследований широтных регионов.

Для исследования на территориях США и Бразилии характеристик волновых возмущений, вызванных СТ, были построены распределения количества ВП в системе локального времени утреннего и вечернего терминатора [Афраймович и др., 2009]. Выбор данной системы позволил рассмотреть ВП, связанные с появлением СТ. Территория Северной и Южной Америки разбивалась на регионы, и для каждого были построены распределения. Протяженность региона по широте составляет 4° для США и 10° для Бразилии. Год делился на 35 интервалов по 30 дней. Каждый последующий интервал включал в себя 20 последних дней предыдущего интервала. Нормировка построенных распределений произведена таким образом, чтобы наибольшему



Динамика распределения числа ВП в системе утреннего (слева) и вечернего (справа) терминаторов, полученная по данным широтных регионов, расположенных в США (а) и Бразилии (б), в течение 2008 г.

количеству ВП соответствовало значение, равное 1. Далее полученные 35 распределений собирались вместе, образуя непрерывную поверхность изменения числа ВП в зависимости от времени в системе

терминатора и номера дня в году для США и Бразилии (см. рисунок).

Белой штриховой линией, отвечающей нулевому значению на оси времени, отмечено появление СТ на высоте 300 км над GPS-станцией. Зеленой и голубой линиями на панели а отмечено время прохождения СТ на высоте 300 км над точками, сопряженными по магнитному полю точкам с наибольшей и наименьшей долготой в каждом регионе соответственно. Зеленой линией на панели б отмечено время прохождения СТ в магнитосопряженной точке (точка, расположенная на одной магнитной линии с локальной точкой, находящейся с ней на одной высоте и долготе, но в разных полушариях) для центра заданного региона. Линии на распределениях представляют собой кривые. Это связано с тем, что в течение года угол наклона линии СТ меняется, вследствие чего меняется время достижения терминатором магнитосопряженной точки относительно локальной.

Видно, что характер распределений меняется на протяжении всего года, отмечая переход от летних условий к зимним и наоборот. На территории США наиболее выражен эффект вечернего терминатора. В зимний период (1–90, 240–366 дни) ВП наблюдаются после прохождения утреннего (слева) СТ, т. е. в дневное время. В летний период (90–240 дни) они регистрируются в ночные часы. В системе вечернего (справа) терминатора в послетерминаторной области количество ВП растет по мере изменения широты к северу. В системе утреннего терминатора в послетерминаторной области максимальное количество ВП наблюдается на широтах 34–46° N. В период весеннего и осеннего равноденствия распределения подобны.

По распределениям в системе вечернего терминатора видно, что ВП регистрируются почти одновременно с прохождением СТ в магнитосопряженной точке, что подтверждает гипотезу о магнитогидродинамической природе волновых пакетов, предложенной в [Афраймович др., 2009].

По данным распределений над территорией Южной Америки видно, что в зимний период (1–90, 240–366 дни) ВП наблюдаются в ночное время. В летний период (90–240 дни) они регистрируются в основном в дневные часы. На распределениях по мере удаления от экваториальных широт количество ВП значительно меньше. Мы предполагаем, что на южных широтах (30–40° S) расположена менее плотная сеть GPS-приемников. В период весеннего и осеннего равноденствия распределения совпадают.

На основании данных распределений над территорией Бразилии нельзя сделать однозначное заключение о связи регистрируемых в данном диапазоне широт ВП с прохождением СТ в магнитосопряженной точке. По-видимому, это объясняется расположением большинства станций данной сети в регионе экваториальной аномалии.

Авторы признательны С.В. Воейкову за помощь в обработке данных и Ю.В. Ясюкевичу за помощь в работе над статьей и обсуждение результатов. Авторы выражают благодарность институту географической съемки Японии (Geographical Survey Institute of

Япан), а также Международной службе глобальных навигационных спутниковых систем (International GNSS Service, IGS) за данные GPS, использованные в работе. Работа поддержана грантами РФФИ № 12-05-31069, 12-05-33032.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В. и др. Перемещающиеся волновые пакеты, генерируемые солнечным терминатором в верхней атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 8. С. 753–759.

Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В. Сезонные и широтные вариации параметров волновых возмущений МГД-природы, генерируемых солнечным терминатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 107–116.

Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1983. 192 с.

Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., et al. The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator // Geophys. Res. Lett. 2009. Iss. 36. P. L15106. doi:10.1029/2009GL039803.36.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*