*Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 258–261.*

УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-258
Orcid 0009-0004-2751-1756

# ОЦЕНКА ВЫСОТЫ ГЕНЕРАЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ПРОХОЖДЕНИЕМ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМИНАТОРА, В ДАННЫХ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

**Ш.Н. Исмоилов, Д.А. Когогин, Д.С. Максимов, Р.В. Загретдинов, И.А. Насыров**

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия,
ishn1999@mail.ru

# ESTIMATING THE GENERATION HEIGHT OF IONOSPHERIC DISTURBANCES, ASSOCIATED WITH PASSAGE OF THE SOLAR TERMINATOR, IN TOTAL ELECTRON CONTENT

**Sh.N. Ismoilov, D.A. Kogogin, D.S. Maksimov, R.V. Zagretdinov, I.A. Nasyrov**

Kazan Federal University, Kazan, Russia, ishn1999@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты оценки высоты генерации ионосферных возмущений, вызванных движением солнечного терминатора (СТ), по данным измерений полного электронного содержания. Для анализа выбраны дни, близкие к весеннему равноденствию (17.03.2024), летнему солнцестоянию (06.07.2024) и осеннему равноденствию (25.10.2024). Применен метод минимальной временной задержки между моментом прохождения СТ и моментом начала возмущения на четырех высотах подыоносферных точек: 200 км, 250 км, 300 км и 400 км. Для построения пространственно-временных разрезов (кеограмм) использовались карты вариаций ПЭС, полученные интерполяцией отфильтрованных значений вариаций ПЭС в точках пересечения лучей ГНСС с ионосферой (подыоносферных точках) на регулярную сетку методом триангуляции. Показано, что минимум временной задержки для 25.10.2024 достигается на высоте ~350–380 км.

**Ключевые слова:** ГНСС, ионосфера, полное электронное содержание, солнечный терминатор, высота генерации, кеограмма.

**Abstract.** This paper presents the results of estimating the generation height of ionospheric disturbances induced by the motion of the solar terminator (ST), based on total electron content (TEC) measurements. The analysis focuses on three specific dates: the vernal equinox (March 17, 2024), the summer solstice (July 6, 2024), and the autumnal equinox (October 25, 2024). The method employed involves determining the minimum time delay between the ST passage and the onset of the disturbance, evaluated at four ionospheric pierce points (IPP): 200 km, 250 km, 300 km, and 400 km. To construct spatiotemporal cross-sections (keograms), we used maps of TEC variations obtained by interpolating GNSS measurements onto a regular grid. It is shown that for October 25, 2024, the minimum time delay occurs at an altitude of approximately 350–380 km.

**Keywords:** GNSS, ionosphere, total electron content, solar terminator, generation height, keogram.

## ВВЕДЕНИЕ

Солнечный терминатор (СТ) — движущаяся граница между освещенной и теневой сторонами Земли — является глобальным, регулярным и предсказуемым источником волновых возмущений в ионосфере. Установлено, что его прохождение сопровождается генерацией атмосферных гравитационных волн (АГВ) и среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (MSTIDs) [Bespalova et al., 2016; Afraimovich, 2008].

Условием эффективной генерации волн является совпадение фазовой скорости волны со скоростью движения терминатора (условие синхронизма). Оно выполняется выше ~130 км, где скорость звука опускается ниже горизонтальной скорости терминатора (~450 м/с на экваторе) и волна оказывается «захвачена» движущимся источником [Bespalova et al., 2016].

Несмотря на многолетнюю историю изучения данного явления, вопрос о высоте генерации возмущений остается открытым. Знание этой высоты принципиально важно для понимания физического механизма: обусловлен ли он фотохимическими процессами нижней ионосферы, резким градиентом фотоионизации в переходной зоне E–F, или магнитогидродинамическими эффектами из сопряженного полушария [Afraimovich et al., 2010]. В настоящей работе для оценки высоты генерации применен метод минимальной временной задержки по данным полного электронного содержания (ПЭС) за трое суток 2024 года.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ ИХ ОБРАБОТКИ

Для анализа выбраны три даты 2024 г., близкие к весеннему равноденствию, летнему солнцестоянию и осеннему равноденствию соответственно: 17 марта, 6 июля и 25 октября. Критериями отбора являлись низкая геомагнитная активность ($Kp < 2$) и отсутствие солнечных вспышек классов M и X. Данные ПЭС получены на сети непрерывно действующих ГНСС-станций в секторе 40–50° с.ш., 40–55° в.д. Угол возвышения спутников — не менее 30°. Из каждого ряда наблюдений вычитался аппроксимирующий полином 6-й степени для удаления фонового тренда. Полосовая фильтрация выполнялась фильтром Баттерворта 7-го порядка в диапазоне периодов 5–20 мин для выделения MSTIDs. Отфильтрованные значения вариации ПЭС интерполировались на регулярную пространственную сетку 100×100 узлов с временным шагом 30 с для четырех высот

подыоносферных точек: 200 км, 250 км, 300 км и 400 км.

Для каждой из трех дат и четырех высот подыоносферных точек строились пространственно-временные разрезы — кеограммы. Кеограмма представляет собой двумерный массив, в котором по оси X откладывается время, по оси Y — географическая широта, а цвет отображает величину вариации ПЭС в данной точке в данный момент времени. Таким образом, кеограмма позволяет одновременно видеть временную динамику и пространственную структуру возмущений. Для построения кеограмм из трехмерного массива вариации ПЭС выбирался меридиональный или зональный срез вблизи центра области наблюдения. На полученных разрезах четко видны наклонные полосы — волновые пакеты MSTIDs, движущиеся вслед за терминатором. Наклон полос определяет горизонтальную фазовую скорость возмущений, а момент появления первой полосы — время момента начала волнового возмущения $t_{\text{onset}}(h)$ для данной высоты подыоносферных точек.

Для каждой высоты подыоносферных точек по кеограмме определялся момент начала волнового возмущения. Для этого сначала вычислялся фоновый уровень шума σ как стандартное отклонение амплитуды вариации ПЭС за два часа до прихода терминатора, когда ионосфера еще не возмущена. Затем устанавливался порог 2σ — граница между фоновым шумом и реальным сигналом. Момент начала волнового возмущения $t_{\text{onset}}(h)$ фиксировался тогда, когда амплитуда вариации ПЭС устойчиво превышала этот порог: не менее трех измерительных точек подряд выше 2σ. Такое условие устойчивости позволяет отсеять случайные кратковременные выбросы и уверенно зафиксировать начало волнового пакета.

Временная задержка между прохождением СТ и моментом начала волнового возмущения на каждой высоте определялась как

$$\Delta t(h) = t_{onset}(h) - t_{ST}(h),$$

где $t_{ST}(h)$ — расчетное время прохождения терминатора через область наблюдения на высоте $h$, определяемое из условия нулевой высоты Солнца с учетом атмосферной рефракции [Somsikov, 1987].

Метод основан на том, что если ионосферные возмущения генерируются на высоте $h^*$, то задержка $\Delta t$ минимальна именно при $h = h^*$, т. е. волна находится в нашей области. На других высотах $h \neq h^*$ волне требуется дополнительное время для распространения от $h^*$ до $h$, что увеличивает наблюдаемую задержку. Таким образом, кривая $\Delta t(h)$ имеет минимум в точке $h^*$, соответствующей высоте генерации.

Для нахождения точного положения минимума по четырем дискретным значениям высоты применялась параболическая аппроксимация методом наименьших квадратов:

$$\Delta t(h) = ah^2 + bh + c.$$

Коэффициенты $a$, $b$, $c$ находятся из системы уравнений $AX = B$ методом наименьших квадратов:

$$X = (A^T A)^{-1} \cdot A^T \cdot B,$$

где $A$ — матрица из степеней высот размером 4×3, $X$ — вектор искомых коэффициентов, $B$ — вектор наблюдаемых задержек.

Минимум параболы (при $a > 0$) определяется аналитически из условия $\frac{d(\Delta t)}{dh} = 0$:

$$h = \frac{-b}{2a}.$$

Для данных 25.10.2024: $a = 0.00125$, $b = -0.897$, $c = 273.2$, откуда $h^* = 0.897 / (2 \cdot 0{,}00125) \approx 359$ км.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для детального анализа пространственной структуры возмущений, генерируемых СТ, были построены карты вариаций ПЭС. Пример такой карты для дня вблизи летнего солнцестояния (06.07.2024) показан на рис. 1. Построение карт стало возможным благодаря комплексу примененных методик обработки данных ГНСС. На рис. 1, *а* показан волновой пакет после прохождения утреннего терминатора в 03:00 UT: хорошо видны четкие полосы с чередованием положительных и отрицательных отклонений ПЭС. На рис. 1, *б*, соответствующем вечернему терминатору (19:45 UT), также наблюдаются полосы, ориентированные с северо-востока на юго-запад, что согласуется с направлением движения вечернего терминатора.

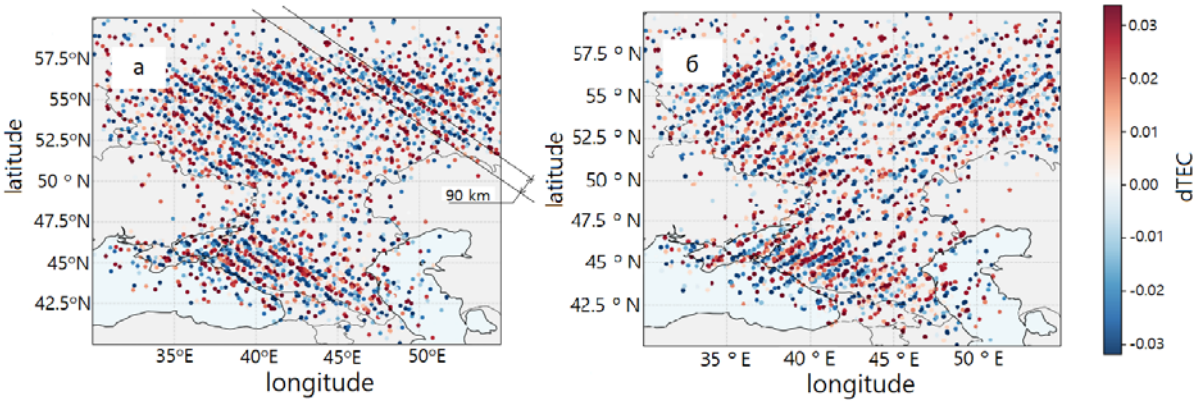


*Рис. 1.* Карты вариаций ПЭС 06.07.2024 после прохождения утреннего СТ в 03:00 UT (*а*) и вечернего СТ в 19:45 UT (*б*)

Таблица 1. Времена прохождения утреннего терминатора через область наблюдения.

| Дата | 200 км, UT | 250 км, UT | 300 км, UT | 400 км, UT |
|---|---|---|---|---|
| 17.03.2024 | 01:20 | 01:07 | 00:56 | 00:36 |
| 06.07.2024 | 22:45 пред. день | 22:33 пред. день | 22:20 пред. день | 21:55 пред. день |
| 25.10.2024 | 01:51 | 01:39 | 01:28 | 01:08 |

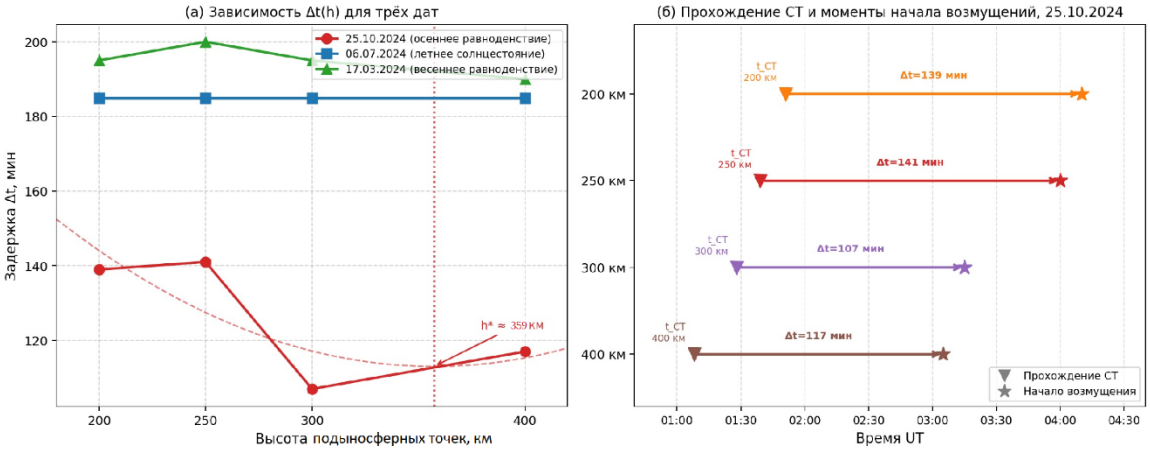


*Рис. 2.* Зависимость временной задержки $\Delta t(h)$ от высоты подыносферных точек для трех дат 2024 г. (*а*): штриховая линия — параболическая аппроксимация для 25.10.2024; вертикальная красная пунктирная линия — оценка $h^* \approx 359$ км. Диаграмма времен прохождения СТ (треугольники) и моментов начала возмущений (звезды) для 25.10.2024 (*б*)

Расчетные времена прохождения утреннего терминатора через область наблюдения приведены в табл. 1. Закономерность такая, что с ростом высоты подыоносферных точек терминатор проходит раньше, что вполне логично и физически объяснимо.

Для 25.10.2024 моменты начала возмущений определены по кеограммам: $h = 400$ км — 03:05 UT, $h = 300$ км — 03:15 UT, $h = 250$ км — 04:00 UT, $h = 200$ км — 04:10 UT. Вычисленные задержки: $\Delta t(200) = 139$ мин, $\Delta t(250) = 141$ мин, $\Delta t(300) = 107$ мин, $\Delta t(400) = 117$ мин. Наименьшая задержка наблюдается на высоте 300 км. Параболическая аппроксимация уточняет положение минимума до $h^* \approx 359$ км (рис. 2).

Для 17.03.2024 и 06.07.2024 задержка слабо зависит от высоты (~185–200 мин), что указывает на менее выраженный минимум.

Оценка высоты генерации ~350–380 км для 25.10.2024 указывает на то, что источник волновых возмущений расположен в нижней части слоя F ионосферы — там, где вертикальный градиент электронной концентрации максимален. Именно в этой области резкая фотохимическая граница, создаваемая терминатором, обеспечивает максимальное возмущение проводимости Педерсена и эффективную связь с нейтральными АГВ [Afraimovich et al., 2010].

Различие в поведении $\Delta t(h)$ для разных дат обусловлено как сезонными изменениями геометрии терминатора, так и особенностями состояния ионосферы. В период осеннего равноденствия (25.10) терминатор ориентирован почти перпендикулярно экватору, движется относительно быстро и создает резкую фотохимическую границу — условие синхронизма выполняется наиболее четко, что и дает выраженный минимум $\Delta t(h)$ на определенной высоте. Вблизи весеннего равноденствия (17.03) ситуация схожа, однако несколько иные положение Солнца и состояние ионосферы приводят к более равномерному распределению задержки по высотам.

Вблизи летнего солнцестояния (06.07) функция $\Delta t(h)$ практически не зависит от высоты (~185 мин на всех уровнях). Это может объясняться несколькими факторами. Во-первых, в летний период терминатор сильно наклонен к меридиану, его горизонтальная проекция движется медленнее, что ослабляет эффект синхронизма. Во-вторых, нельзя исключить вклад иного механизма — магнитогидродинамического переноса возмущений из сопряженного полушария, который в летних условиях может давать сигнал раньше и на нескольких высотах одновременно [Andreyev et al., 2025; Afraimovich et al., 2010], тем самым сглаживает высотную зависимость задержки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе применен метод минимальной временной задержки для оценки высоты генерации ионосферных возмущений, индуцированных солнечным терминатором. Метод основан на построении кеограмм вариаций ПЭС для четырех высот подыносферных точек, определении времен момента начала возмущения и сравнении с расчетными временами прохождения СТ.

Вблизи осеннего равноденствия (25.10.2024) минимум кривой $\Delta t(h)$, определенный

параболической интерполяцией, соответствует высоте $h^* \approx 350–380$ км: задержка на высоте 300 км составила 107 мин против 139–141 мин на высотах 200–250 км.

Вблизи летнего солнцестояния (06.07.2024) задержка слабо зависит от высоты, что свидетельствует о менее локализованной зоне генерации. Вблизи весеннего равноденствия (17.03.2024) картина промежуточная.

Полученные результаты согласуются с теоретическими представлениями [Gasque et al., 2024; Somsikov, 2011] и экспериментальными данными [Afraimovich et al., 2010], а также создают основу для статистического исследования высоты генерации волновых возмущений, индуцированных прохождением солнечного терминатора, на большем объеме данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


Afraimovich E.L. First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator: a review // Earth Planets Space. 2008. V. 60. P. 895–900.

Afraimovich E.L., Edemsky I.K., Voeykov S.V., et al. MHD nature of ionospheric wave packets generated by the solar terminator // Geomagn. and Aeron. 2010. V. 50, N 1. P. 79–95.

Andreyev A., Somsikov V., Kapytin V., et al. Estimation of ionosphere electron density structure related to the solar terminator // Atmosphere. 2025. V. 16. P. 1217.

Bespalova A.V., Fedorenko A.K., Cheremnykh O.K., Zhuk I.T. Satellite observations of wave disturbances caused by moving solar terminator // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2016. V. 140. P. 79–85.

Gasque L.C., Harding B.J., Immel T.J., et al. Evening solar terminator waves in Earth's thermosphere: neutral wind signatures observed by ICON-MIGHTI // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2024. V. 129, e2023JA032274.

Somsikov V.M. A spherical model of wave generation in the atmosphere by the solar terminator // J. Atmos. Terr. Phys. 1987. V. 49, N 5. P. 433–438.

Somsikov V.M. Solar terminator and dynamic phenomena in the atmosphere: A review // Geomag. and Aeron. 2011. Vol. 51, N 6. P. 707–719.