

Вариации мощности дециметровых радиозатменных сигналов в высокоширотной ионосфере Земли во время магнитной бури в марте 2015 года

Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А.

*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, пл. акад. Б.А. Введенского,
дом 1, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия*



E-mail: gubenko@fireras.su

**Двадцать третья международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ
КОСМОСА»**

10 - 14 ноября 2025 года, ИКИ РАН, Москва

Введение: В марте 2015 года на Солнце имели место мощные корональные выбросы массы (КВМ) в сторону Земли. Корональные выбросы плазмы, достигшие магнитосферы Земли в период 17–18 марта, спровоцировали сильную магнитную бурю класса $G4$ ($G4 = Kp - 4$), в которой максимальные значения планетарного Kp -индекса были равны 8.

В данной работе проводится анализ радиозатменных измерений эйконала ψ (приращения фазового пути) и мощности P дециметровых (ДМ) сигналов в диапазонах L1 (длина волны ~ 19.0 см) и L2 (длина волны ~ 24.4 см), принимаемых низкоорбитальными спутниками *FORMOSAT-3/COSMIC* во время магнитной бури в марте 2015 г., с целью изучения вариаций мощности радиоволн и определения влияния бури на нижнюю ионосферу Земли. С помощью измерений эйконала определяется рефракционное ослабление X , а сравнение данных о мощности и рефракционном ослаблении радиоволн позволяет оценить интегральное поглощение ДМ-сигналов на трассах радиозатменного зондирования.

Исходные экспериментальные данные и обработка

Исходные экспериментальные данные о нормированной мощности $P(h)$ радиоволн (частота выборки 50 Гц) сначала отфильтровывались методом скользящего среднего по 50 точкам. Таким образом, были получены вертикальные профили средней мощности $\Theta(h)$ ДМ-сигналов. При вертикальной скорости опускания луча в ионосфере Земли ~ 2 км/сек, это соответствует усреднению данных по интервалу в ~ 2 км. При таком усреднении сохраняется практически вся информация о вертикальной структуре ионосферы, которую можно разрешить при анализе методом геометрической оптики (ГО). Вертикальное разрешение ГО-метода определяется размером (диаметром $d_f = 2r_f$) физического луча. Величина $r_f = (\lambda \cdot L_L)^{1/2}$ составляет ~ 800 м для диапазонов L1 и L2 (Горбунов, 2019), где λ – длина волны сигнала, L_L – расстояние от низкоорбитального спутника (LEO) до атмосферного лимба планеты (~ 2800 км). Таким образом, ГО-метод применим при распространении радиоволн диапазонов L1 и L2 в среде с вертикальными масштабами неоднородностей не менее $d_f = 2r_f \approx 1.6$ км. Масштаб дифракционных неоднородностей ограничен сверху размером первой зоны Френеля, поэтому усреднение скользящим средним приводит к фильтрации (вымыванию) высокочастотных пространственных компонент, в том числе, и дифракционных.

Анализ профилей рефракционного ослабления $X(h)$ показал, что регулярное (осредненное) рефракционное ослабление $\langle X \rangle$ мощности радиоволн в сеансах измерений на высотах > 50 км практически отсутствует. Поэтому, мы полагали, что наблюдаемое ослабление нормированной средней мощности $\Theta(h) = \langle P(h) \rangle$ ДМ-сигнала может быть связано с поглощением радиоволн в нижней ионосфере Земли во время магнитной бури (Andreev et al., 2020, 2021; Gubenko et al., 2021a, 2021b, 2022, 2023).

Исходные экспериментальные данные и обработка (продолжение)

В работах (*Gubenko et al.*, 2018; *Gubenko and Kirillovich*, 2019) приведены формулы, позволяющие определять рефракционное ослабление (X) мощности сигнала на основе анализа зависимости эйконала (ψ) от времени (t):

$$1 - X(t) = \frac{L_L L_G}{L_L + L_G} \cdot \frac{d^2 \psi / dt^2}{(dp_0 / dt)^2}, \quad (1)$$

где p_0 – прицельное расстояние радиолуча, L_L и L_G – расстояния от точки перигея луча до приемника (спутник *LEO*) и передатчика (спутник *GPS*), соответственно. Анализ вертикальных профилей мощности $P(h)$ и учет рефракционного ослабления $X(h)$ позволяет оценить интегральное поглощение (Γ) радиоволн с помощью следующих соотношений (*Gubenko et al.*, 2022):

$$\begin{aligned} \Gamma(\text{отн. ед.}) &= P(\text{отн. ед.})/X(\text{отн. ед.}), \\ \Gamma(\text{дБ}) &= P(\text{дБ}) - X(\text{дБ}). \end{aligned} \quad (2)$$

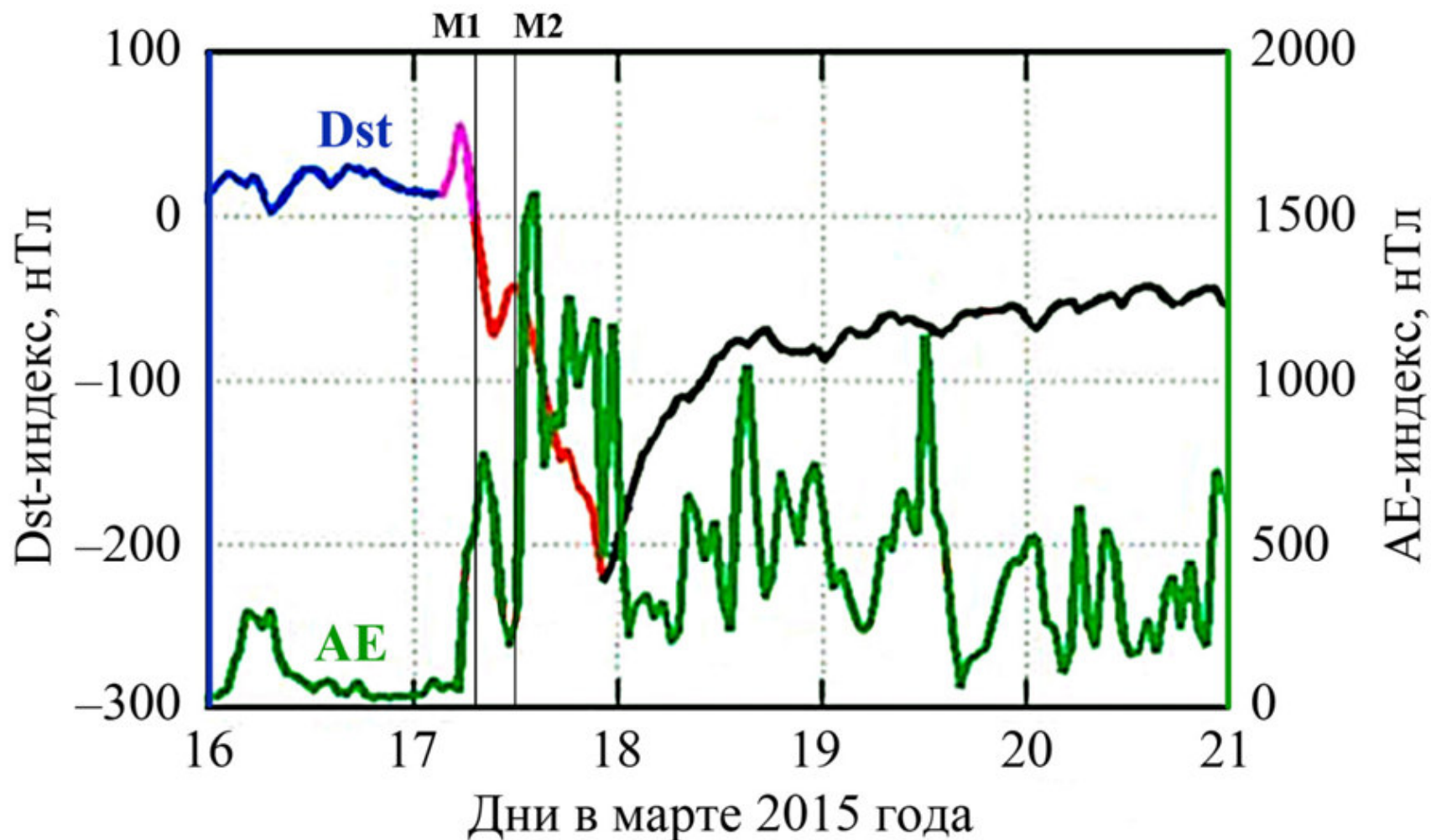


Рис. 1. Вариации *Dst*-индекса (вертикальная ось слева) и аврорального *AE*-индекса (вертикальная ось справа) в период с 16 до 21 марта 2015 года. Начальная и главная фазы магнитной бури показаны пурпурным и красным цветом, соответственно, а фаза восстановления выделена черным цветом. Начальная стадия длилась с ~04.45 UT до ~06.22 UT 17 марта 2015 года. Тонкими вертикальными линиями отмечены начала двух стадий (M1) и (M2) главной фазы бури. Первая стадия M1 основной фазы шторма продолжалась с ~06.23 UT до ~12.00 UT, а вторая стадия M2 длилась с ~12.00 UT до ~23.00 UT 17 марта. Начало фазы восстановления бури: ~23.00 UT 17 марта 2015 года.

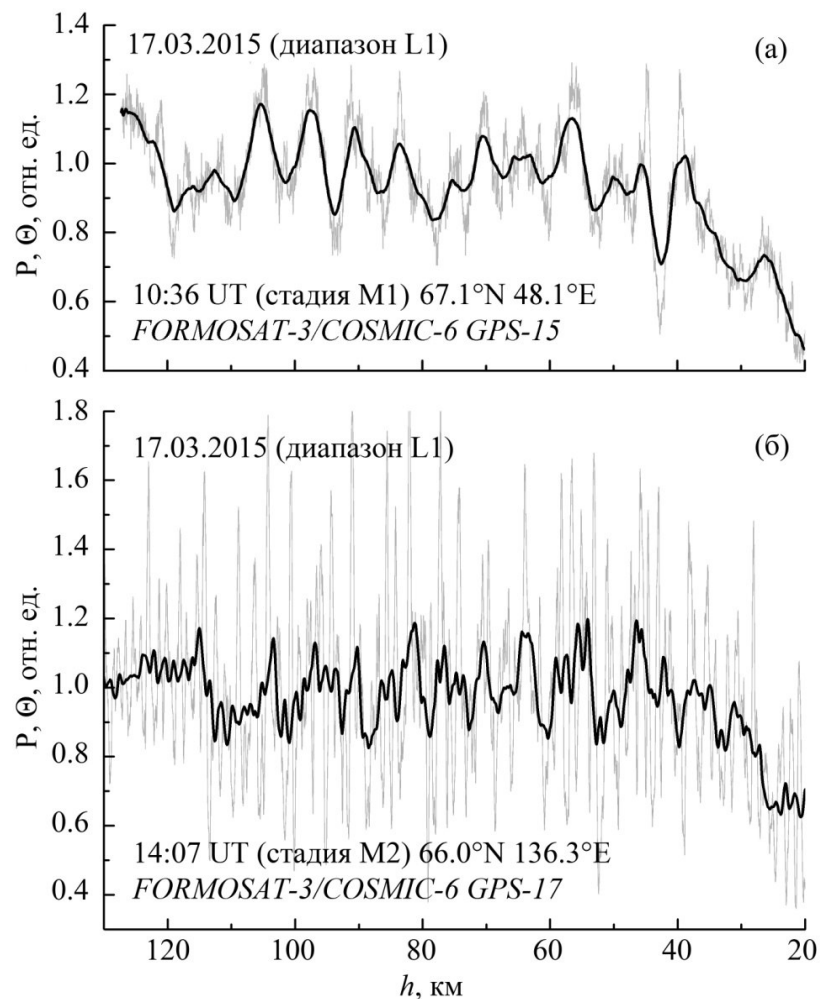


Рис. 2. Иллюстрация процедуры усреднения (фильтрации) исходных данных по 50 точкам методом скользящего среднего в двух радиозатменных сеансах, проведенных во время магнитной бури в марте 2015 года (панель а – стадия M1, б – стадия M2). Тонкими линиями показаны исходные данные $P(h)$ о мощности, толстыми – результаты $\Theta(h)$ их усреднения по 50 точкам.

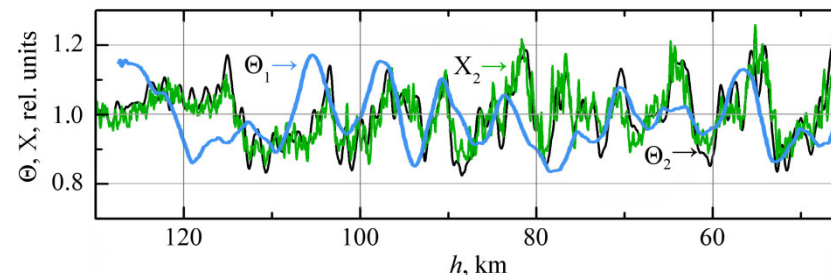


Рис. 3. Сравнение усредненных данных о мощности, представленных на рис. 2. Здесь значения Θ_1 (голубая линия) и Θ_2 (черная линия) – результаты фильтрации исходных данных, показанных на рис. 2а и 2б, соответственно. Параметр X_2 (зеленая линия) представляет собой рефракционное ослабление мощности для усредненных данных на панели б.

Вывод

Для первой стадии M1 главной фазы магнитной бури высокочастотные флуктуации мощности $P(h)$ ДМ-сигнала с вертикальными размерами <2 км (дифракционные масштабы) малы и фильтрация исходных данных методом скользящего среднего визуально воспринимается как «идеальный фильтр» (рис. 2а). Для второй стадии M2 главной фазы бури (рис. 2б) высокочастотные возмущения мощности $P(h)$ существенно больше, чем для стадии M1 (рис. 2а) и изменялись от -3.0 до $+2.5$ дБ. Обнаружена корреляция между ГО-вариациями (вертикальные масштабы >2 км) мощности и рефракционного ослабления ДМ-сигнала (рис. 3), которая свидетельствует об определяющем вкладе слоистых неоднородностей в наблюдаемые вариации.

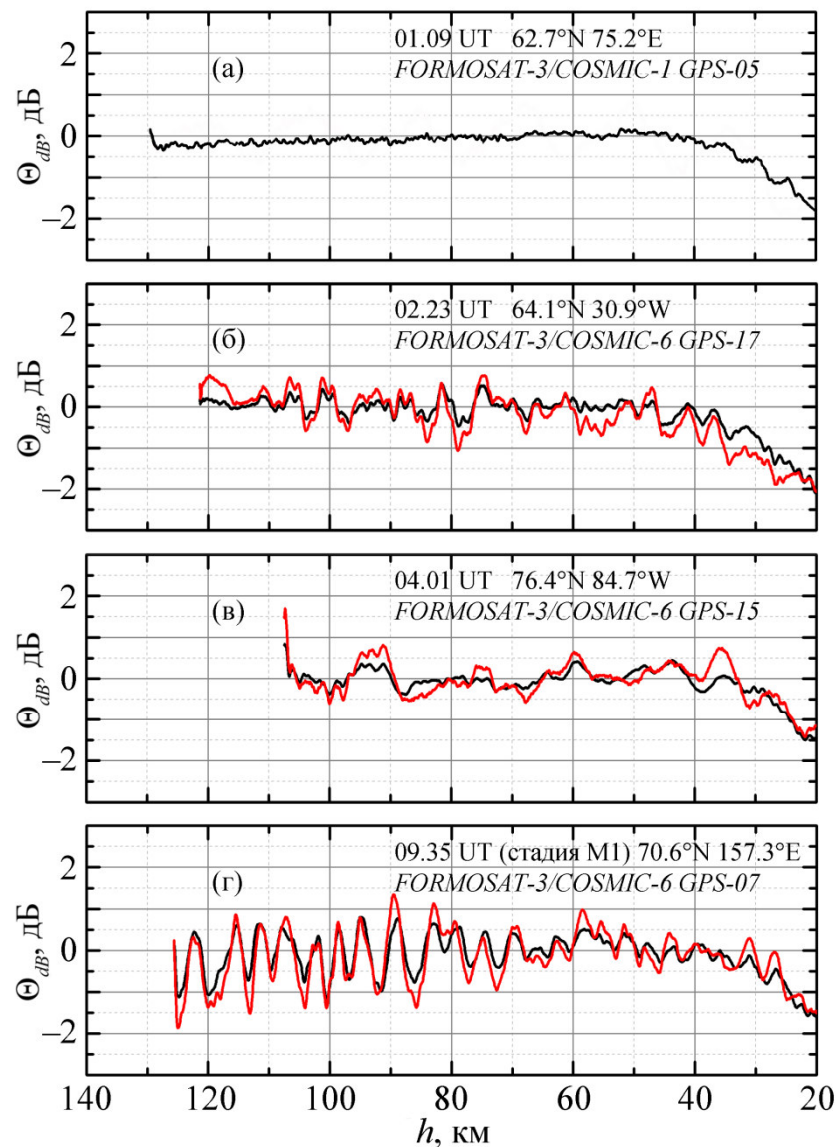


Рис. 4. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазонах L1 (черный цвет) и L2 (красный цвет) после фильтрации, полученные в сеансах радиозатменных измерений 17 марта 2015 года в ионосфере и атмосфере Земли

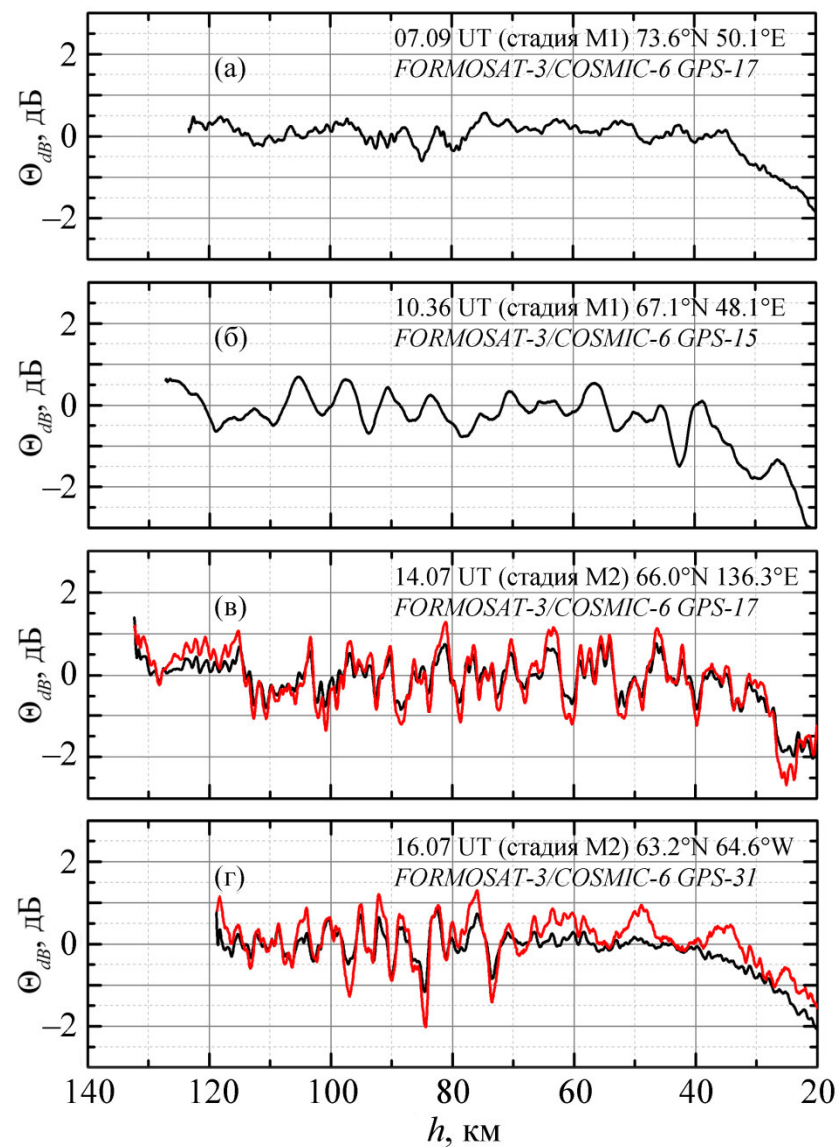


Рис. 5. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазонах L1 (черный цвет) и L2 (красный цвет) после фильтрации, полученные 17 марта 2015 года в сеансах радиозатменных измерений спутников *FORMOSAT-3/COSMIC* во время главной фазы магнитной бури.

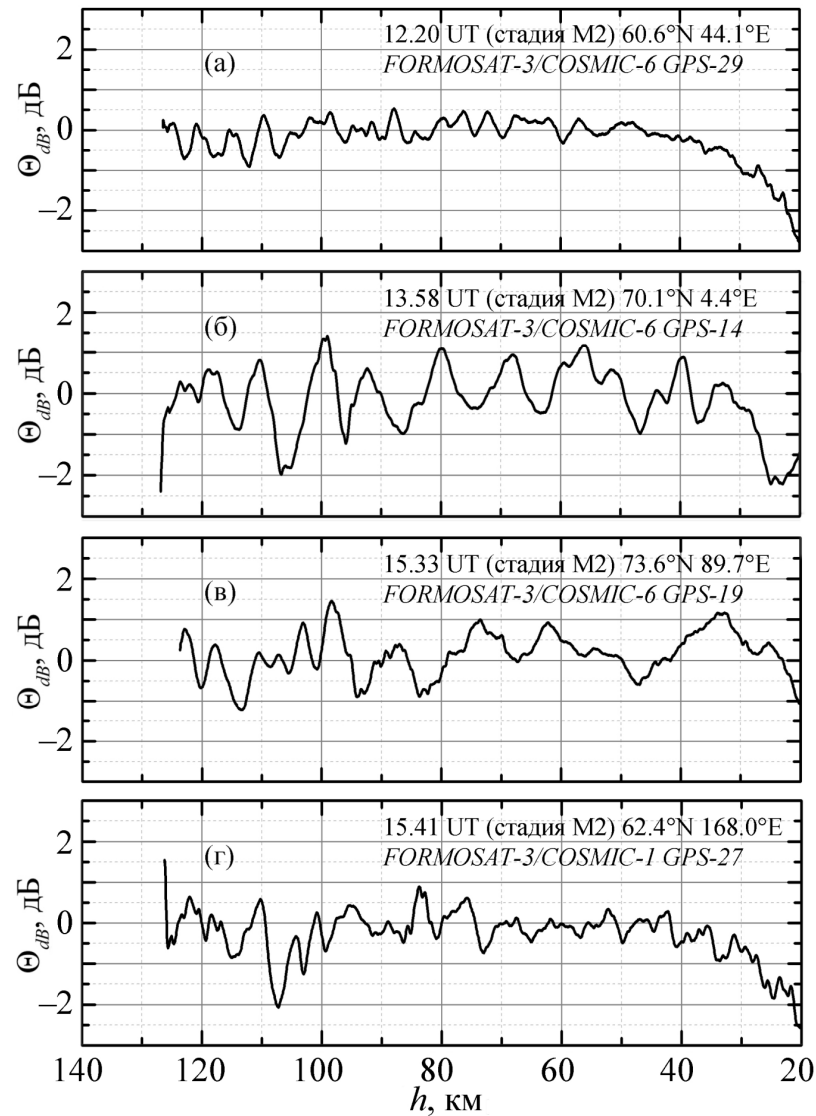


Рис. 6. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазоне L1 после фильтрации, полученные 17 марта 2015 года в четырех сеансах радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC* в высокоширотной ионосфере и атмосфере Земли во время второй стадии (M2) главной фазы бури.

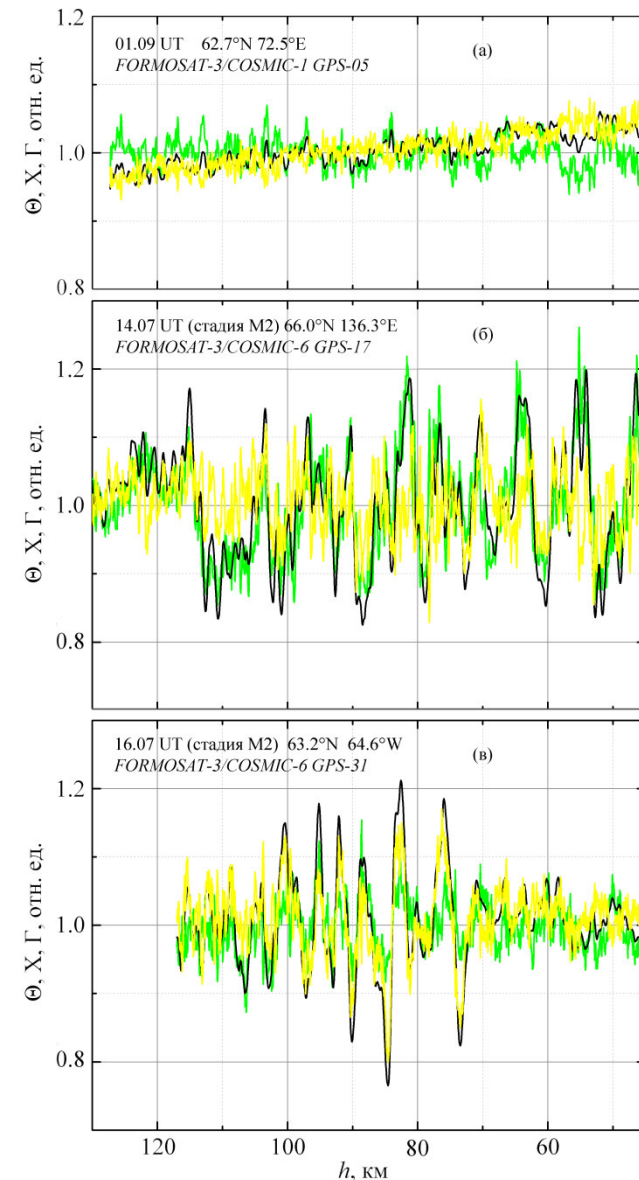


Рис. 7. Примеры зависимостей мощности P (черный цвет), рефракционного ослабления X (зеленый цвет) и интегрального поглощения Γ (желтый цвет) ДМ-сигнала от высоты перигея луча, полученных из анализа радиозатменных измерений эйконала и мощности в D - и E -областях высокоширотной ионосферы Земли 17 марта 2015 года во время магнитной бури.

Заключение:

Проанализированы результаты ~50 сеансов зондирования высокоширотной ($>60^\circ$ N) ионосферы Земли, проведенных 17–18 марта 2015 г. в радиозатменном эксперименте *FORMOSAT-3/COSMIC* для двух диапазонов L1 (~19.0 см) и L2 (~24.4 см) дециметровых (ДМ) волн. Корональные выбросы массы, достигшие магнитосферы Земли в указанный период времени, спровоцировали сильную магнитную бурю класса $G4$ ($G4 = K_p - 4$), в которой максимальные значения K_p -индекса были равны 8. Эта магнитная буря вызвала значительные возмущения характеристик ДМ-сигналов на трассах зондирования: навигационные спутники (*GPS*) – низкоорбитальные спутники (*FORMOSAT-3/COSMIC*).

Наиболее заметные вариации мощности радиоволн наблюдались в E -области нижней ионосферы Земли на высотах ниже ~110 км. Здесь возмущения мощности ДМ-сигналов, обусловленные неоднородностями с вертикальными размерами <2 км (дифракционные масштабы), были максимальны во время второй стадии (M2) главной фазы магнитной бури и изменялись от -3.0 до $+2.5$ дБ. Обнаружена корреляция между ГО-вариациями (вертикальные масштабы неоднородностей >2 км) мощности и рефракционного ослабления радиоволн, которая свидетельствует об определяющем вкладе слоистых неоднородностей в наблюдаемые вариации. Исследование вариаций мощности радиозатменных сигналов в высокоширотной ионосфере Земли представляет практический интерес в задачах обеспечения радиосвязи и навигации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература:

- Горбунов М.Е. Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли. М.: ГЕОС, 2019. 288 с.
- Andreev V.E., Gubenko V.N., Pavelyev A.A., Kirillovich I.A., Gubenko T.V. Absorption of decimetre radio waves in the Earth's high-latitude ionosphere during a geomagnetic storm in June 2015. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1632, no. 1, 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1632/1/012008>.
- Andreev V.E., Gubenko V.N., Kirillovich I.A. GPS L1 signals absorption in high-latitude lower ionosphere during severe geomagnetic storm in June 2015. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1991, no. 1, 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1991/1/012006>.
- Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A., Gubenko D.V. Radio Occultation Studies of Disturbances in the Earth's Ionosphere During a Magnetic Storm on June 22–23, 2015. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021a, vol. 61, no. 6, pp. 713–722. <https://doi.org/10.1134/S0016793221060050>.
- Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A. Variations in the Parameters of Radio Waves in the Earth's High-Latitude Ionosphere on the Satellite–Satellite Paths during the Geomagnetic Storm of June 22–23, 2015. *Cosmic Research*. 2021b, vol. 59, no. 3, pp. 157–161. <https://doi.org/10.1134/S0010952521030047>.
- Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A., Gubenko D.V. The Absorption Coefficient of Decimeter Radio Waves (~19 cm) in the Earth's Ionosphere Based on the Inverse Problem Solution in Radio Occultation Satellite Studies during the June 2015 Magnetic Storm. *Cosmic Research*. 2022, vol. 60, no. 6, pp. 437–444. <https://doi.org/10.1134/S001095252206003X>.
- Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A., Gubenko D.V. Determination of the Effective Collision Frequency of Electrons in the E and D Regions of the High-Latitude Ionosphere from Analysis of Radio-Occultation Measurements. *Cosmic Research*. 2023, vol. 61, no. 6, pp. 454–460. <https://doi.org/10.1134/S0010952523700491>.
- Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Kirillovich I.A., Liou Y.-A. Case study of inclined sporadic E layers in the Earth's ionosphere observed by CHAMP/GPS radio occultations: Coupling between the tilted plasma layers and internal waves. *Advances in Space Research*. 2018. vol. 61, no. 7, pp. 1702–1716. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001>.
- Gubenko V.N., Kirillovich I.A. Modulation of sporadic E layers by small-scale atmospheric waves in Earth's high-latitude ionosphere. *Solar-Terrestrial Physics*. 2019, vol. 5, no. 3, pp. 98–108. <https://doi.org/10.12737/stp-53201912>.

Спасибо за внимание!