

Изучение вариаций мощности радиозатменных сигналов FORMOSAT-3/COSMIC (диапазоны ~19.0 см и ~24.4 см) в высоких широтах северного полушария Земли во время магнитной бури в марте 2015 года

В.Н. Губенко¹, В.Е. Андреев¹, И.А. Кириллович¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН 141190, г. Фрязино, Московская область, пл. Введенского, 1
E-mail: gubenko@fireras.su, vnngubenko@gmail.com

Проанализированы результаты около 50 сеансов зондирования высокоширотной ($>65^\circ$ с.ш.) 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 (КВМ), достигшие магнитосферы Земли в указанный период времени, спровоцировали сильную магнитную бурю класса G4 ($G4 = Kp - 4$), в которой максимальные значения Kp-индекса были равны 8. Эта буря вызвала существенные флуктуации характеристик ДМ-радиоволн на трассах зондирования: навигационные (GPS) спутники – низкоорбитальные (FORMOSAT-3/COSMIC) спутники. Наиболее заметные вариации мощности ДМ-сигналов наблюдались в E-области на высотах ниже ~110 км. Здесь колебания мощности ДМ-сигналов с вертикальными размерами <2 км (дифракционные масштабы) в главную фазу (ступень M2) магнитной бури достигают значений $+2.5$ и -3.0 дБ. Найденная корреляция между флуктуациями рефракционного ослабления и мощности радиоволн свидетельствует об определяющем вкладе слоистых неоднородностей в наблюдаемые вариации мощности с вертикальными размерами >2 км. Исследования, проводимые в ионосфере Земли, важны для анализа динамики космической погоды, а также представляют практический интерес в задачах обеспечения радиосвязи и навигации. Ключевые слова: радиозатменные спутниковые измерения, ионосфера Земли, магнитная буря, мощность ДМ-сигналов, рефракционное ослабление радиоволн

Study of power variations of radio occultation FORMOSAT-3/COSMIC signals (ranges ~19.0 cm and ~24.4 cm) at high latitudes of the Earth's northern hemisphere during the magnetic storm in March 2015

V.N. Gubenko¹, V.E. Andreev¹, I.A. Kirillovich¹

¹ Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Fryazino branch)

Results of about 50 sessions of sounding the Earth's high-latitude ($> 65^\circ$ N) ionosphere conducted on March 17–18, 2015 in the FORMOSAT-3/COSMIC radio occultation experiment for two ranges L1 (~19.0 cm) and L2 (~24.4 cm) of decimeter (DM) waves are analyzed. Coronal mass ejections (CMEs) that reached the Earth's magnetosphere during the specified time period provoked a strong magnetic storm of the G4-class ($G4 = Kp - 4$), in which the maximum values of the Kp-index were equal to 8. This storm caused significant fluctuations in the characteristics of DM radio waves on the sounding paths: navigation (GPS) satellites – low-orbit (FORMOSAT-3/COSMIC) satellites. The most noticeable variations in the power of DM signals were observed in the E-region at altitudes below ~110 km. Here, the oscillations of the power of DM signals with vertical sizes <2 km (diffraction scales) during the main phase (stage M2) of the magnetic storm reach values of $+2.5$ and -3.0 dB. A correlation found between the fluctuations in the refractive attenuation and in the power of radio waves indicates the decisive contribution of layered inhomogeneities to the observed power variations with vertical sizes >2 km. The studies conducted in the Earth's ionosphere are important for analyzing

the dynamics of space weather, and are also of practical interest in the problems of ensuring radio communications and navigation.

Keywords: radio occultation satellite measurements, Earth's ionosphere, magnetic storm, power of DM signals, refractive attenuation of radio waves

Введение

Магнитные бури являются одним из главных факторов космической погоды, которые воздействуют, в основном, на высокоширотную ионосферу Земли. Пик активности 24-го солнечного цикла пришелся на 2015 год [1]. В это время на Земле имели место две сильнейшие магнитные бури примерно одинаковой интенсивности. Шторм 17–18 марта 2015 года оказался самой крупной магнитной бурей (минимум $Dst = -223$ нТл) в 24-ом солнечном цикле. Интенсивность геомагнитной бури 22–23 июня была чуть ниже (минимум $Dst = -204$ нТл), а максимальные значения планетарного Kp -индекса были равны 8 для обеих бурь, что соответствовало уровню $G4$ (очень сильная буря).

Внезапное начало шторма 17 марта 2015 года приходится на 04.45 UT. В это время корональные выбросы массы (КВМ) достигли магнитосферы Земли. Начало бури характеризуется резким увеличением скорости и давления солнечного ветра. Главная фаза бури начинается, когда B_z -компонента межпланетного магнитного поля (ММП) в первый раз сменила знак и оказалась направленной на юг, а индекс $SYM-H$ начал постепенно уменьшаться [2]. В начальную фазу шторма с ~04.45 UT по ~06.22 UT планетарный Kp -индекс увеличился с 2 до 5. На протяжении главной фазы с ~06.23 UT по ~22.47 UT 17 марта 2015 года Kp -индекс немонотонно менялся от 5+ до 8– [3]. Главная фаза бури характеризовалась уменьшением индекса $SYM-H$ до -234 нТл (22.47 UT), а также значительной вариабельностью индекса AE [4]. Главную фазу шторма можно разделить на две стадии. Первая стадия (M1) главной фазы бури длилась с ~06.23 UT по ~12.00 UT, а вторая стадия (M2) продолжалась с ~12.00 UT по ~23.00 UT 17 марта 2015 года. По сравнению с начальной фазой шторма и первой стадией M1, вторая стадия M2 главной фазы бури характеризуется повышенной авроральной активностью и очень большими значениями AE -индекса [3].

Шторм достиг максимальной интенсивности в ~23.00 UT 17 марта, когда был отмечен минимум Dst -индекса -223 нТл, а затем началась длинная фаза восстановления. На рис. 1 представлены вариации индекса Dst на различных стадиях бури в марте 2015 года. Пурпурным и красным цветом показаны соответственно начальная и главная и фазы бури, а черным цветом выделена фаза восстановления. Тонкие вертикальные линии на рис. 1 отмечают начала двух стадий (M1 и M2) главной фазы бури. Здесь также представлены вариации аврорального индекса AE (вертикальная ось справа) во время шторма. На рис. 1 видны очень сильные вариации AE -индекса, достигающие значений ~1000 нТл и больше во время второй стадии M2 главной фазы магнитной бури в марте 2015 года.

Кратко рассмотрим физический смысл индексов Dst и AE , которые используются для оценки геомагнитной активности и характеристик ММП [5]. Магнитные бури определяются как наиболее мощные геомагнитные возмущения спокойных суточных условий. Усредненная изменения магнитного поля по времени от начала бури можно определить *шторм-тайм вариацию* (индекс Dst). Эта вариация указывает на возрастание северной B_z -компоненты ММП в начальную фазу бури и ее уменьшение в главную фазу. Под авроральным индексом AE подразумевается сумма наибольшего превышения и наибольшего понижения северной B_z -компоненты ММП в данный момент над спокойным значением в высокоширотной области. Индекс AE характеризует меру интенсивности бури в данный момент [5]. Описание геомагнитных условий и характеристик ММП для этого шторма можно найти во многих работах [6–10].

В данной работе проводится анализ радиозатменных измерений эйконала и мощности ДМ-сигналов в диапазонах $L1$ (длина волны ~ 19 см) и $L2$ (длина волны ~ 24.4 см), принимаемых спутниками *FORMOSAT-3/COSMIC* во время магнитной бури в марте 2015 года, с целью изучения вариаций мощности радиоволн и определения влияния бури на нижнюю ионосферу Земли.

Анализ радиозатменных измерений и обсуждение полученных результатов

Здесь мы анализируем ~ 50 сеансов радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC*, проведенных в период с 17 по 18 марта 2015 года. Отобранные сеансы измерений были выполнены на широтах свыше $\sim 60^\circ\text{N}$ во время сильной магнитной бури в марте 2015 года и содержали зависимости эйконала (фазового пути) и мощности радиоволн от высоты перигея радиолуча. Приемники навигационных сигналов, установленные на шести малых низкоорбитальных спутниках *FORMOSAT-3/COSMIC* (высота орбит ~ 800 км), регистрировали зависимости от времени эйконала и мощности радиоволн на двух несущих *GPS*-частотах $f_1 = 1575.42$ МГц (диапазон $L1$, длина волны ~ 19.0 см) и $f_2 = 1227.60$ МГц (диапазон $L2$, длина волны ~ 24.4 см).

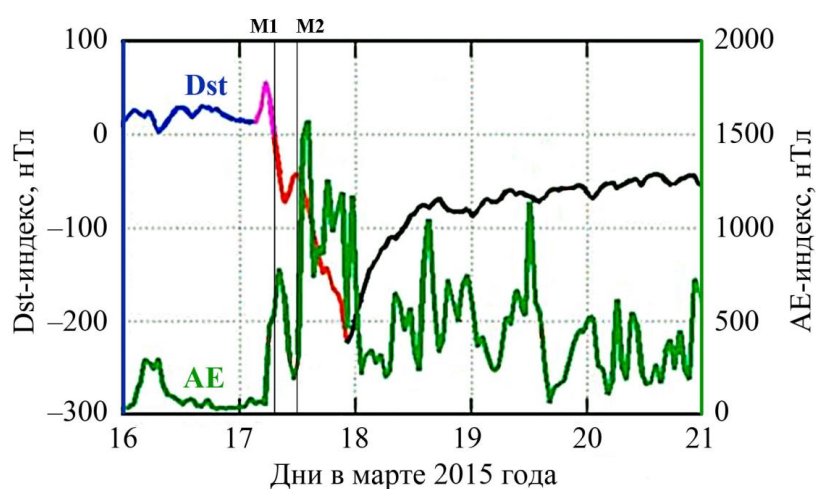


Рис. 1. Вариации Dst-индекса (вертикальная ось слева) и аврорального AE-индекса (вертикальная ось справа) в период с 16 до 21 марта 2015 года. Тонкими вертикальными линиями отмечены начала двух стадий M1 и M2 главной фазы бури в марте 2015 года

Прицельный параметр лучевой траектории и угол рефракции радиолуча можно определить на основе анализа эйконала с учетом известных баллистических данных спутников [11]. Обработка измерений нормированной мощности $P(h)$ радиоволн включала сглаживание (фильтрацию) данных по 50 точкам методом скользящего среднего. Так определялись вертикальные профили мощности $\Theta(h)$ после фильтрации. При скорости опускания луча в ионосфере Земли ~ 2 км/с и частоте дискретизации измерений 50 Гц, это соответствует усреднению по высотному интервалу ~ 2 км. При таком усреднении сохраняется практически вся информация о структуре ионосферы, которую можно изучать методами лучевой геометрической оптики (ГО). Подробное описание обработки экспериментальных данных можно найти в ранее опубликованных работах [11, 12].

На рис. 2 представлены 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. Для каждого сеанса указаны время проведения измерений; координаты (широта и долгота) зондируемого района, определенные на высоте $h = 100$

км; номера низкоорбитального (*FORMOSAT-3/COSMIC*) и навигационного (*GPS*) спутников. Три сеанса измерений, представленные на панелях (а), (б) и (в) рис. 2, были выполнены 17 марта 2015 года в спокойный геомагнитный период накануне начала (~04.45 UT) мощной магнитной бури. Возмущения интенсивности принимаемых сигналов на ионосферных высотах > 45 км здесь минимальны и не превышают ~1 дБ. Рисунок 2 демонстрирует убывание средней мощности радиозатменных сигналов с уменьшением высоты в интервале от ~40 км до ~20 км, что объясняется регулярной рефракцией в атмосфере Земли и ее доминирующим влиянием над ионосферой на указанных высотах. Вертикальные профили мощности Θ_{dB} радиоволн, представленные на панели (г) рис. 2, были получены в ~09.35 UT после начала первой стадии M1 (~06.23 UT) главной фазы мартовской бури [3]. Здесь, на высотах более ~85–90 км в *E*-области высокоширотной ионосферы (70.6°N; 157.3°E), имеют место явные квазипериодические возмущения мощности сигналов, с амплитудой достигающей ~2 дБ. Квазипериодические вариации мощности с несколько меньшей амплитудой хорошо различимы и ниже, на высотах *D*-области ионосферы вплоть до ~70 км. Хорошее соответствие и коррелированность наблюдаемых флуктуаций по высоте для двух диапазонов радиоволн свидетельствуют о реальности их существования.

На рис. 3 представлены 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. На панели (а) рис. 3. показан профиль мощности Θ_{dB} сигнала в диапазоне *L1* (длина волны ~19 см), измеренный в ~07.09 UT вскоре после начала первой стадии M1. Передатчик сигналов находился на навигационном (*GPS*) спутнике №17, а приемник был расположен на низкоорбитальном (*FORMOSAT-3/COSMIC*) аппарате №6. Данные на рис. 3а свидетельствуют о практически полном отсутствии возмущений в высокоширотной (73.6°N; 51.0°E) ионосфере Земли во время измерений, за исключением интервала высот от ~87 км до ~75 км в верхней части *D*-области, где обнаруживаются небольшие вариации (< 1 дБ) мощности радиоволн. Возмущения в профиле мощности Θ_{dB} сигнала диапазона *L1* (рис. 3б, стадия M1 (~10.36 UT)) в *D*- и *E*-областях высокоширотной (67.1°N; 48.1°E) ионосферы имеют небольшую амплитуду, но выражены более ярко, чем на рис. 3а.

Начало второй стадии M2 главной фазы бури приходится на ~12.00 UT 17 марта 2015 года [3]. Начиная с этого момента времени и до конца главной фазы бури (~22.47 UT 17 марта) наблюдались повышенные значения планетарного *Kp*-индекса (8–) и резкое усиление авроральной активности (см. вариации *AE*-индекса на рис. 1). Представленные на панелях (в) и (г) рис. 3 вертикальные профили мощности Θ_{dB} сигнала (диапазоны *L1* и *L2*) после фильтрации были измерены во время второй стадии M2 главной фазы шторма. Следует отметить хорошее соответствие и коррелированность по высоте наблюдаемых вариаций мощности Θ_{dB} для двух диапазонов радиоволн в *D*- и *E*-областях ионосферы для сеанса измерений, проведенного в ~14.07 UT (рис. 3в). Несмотря на то, что амплитуда возмущений остается небольшой, вышесказанное подтверждает реальность их существования. Некоторое несоответствие амплитуды вариаций мощности Θ_{dB} для диапазонов *L1* и *L2* (рис. 3г) может быть связано с невысоким качеством сигнала в диапазоне *L2*.

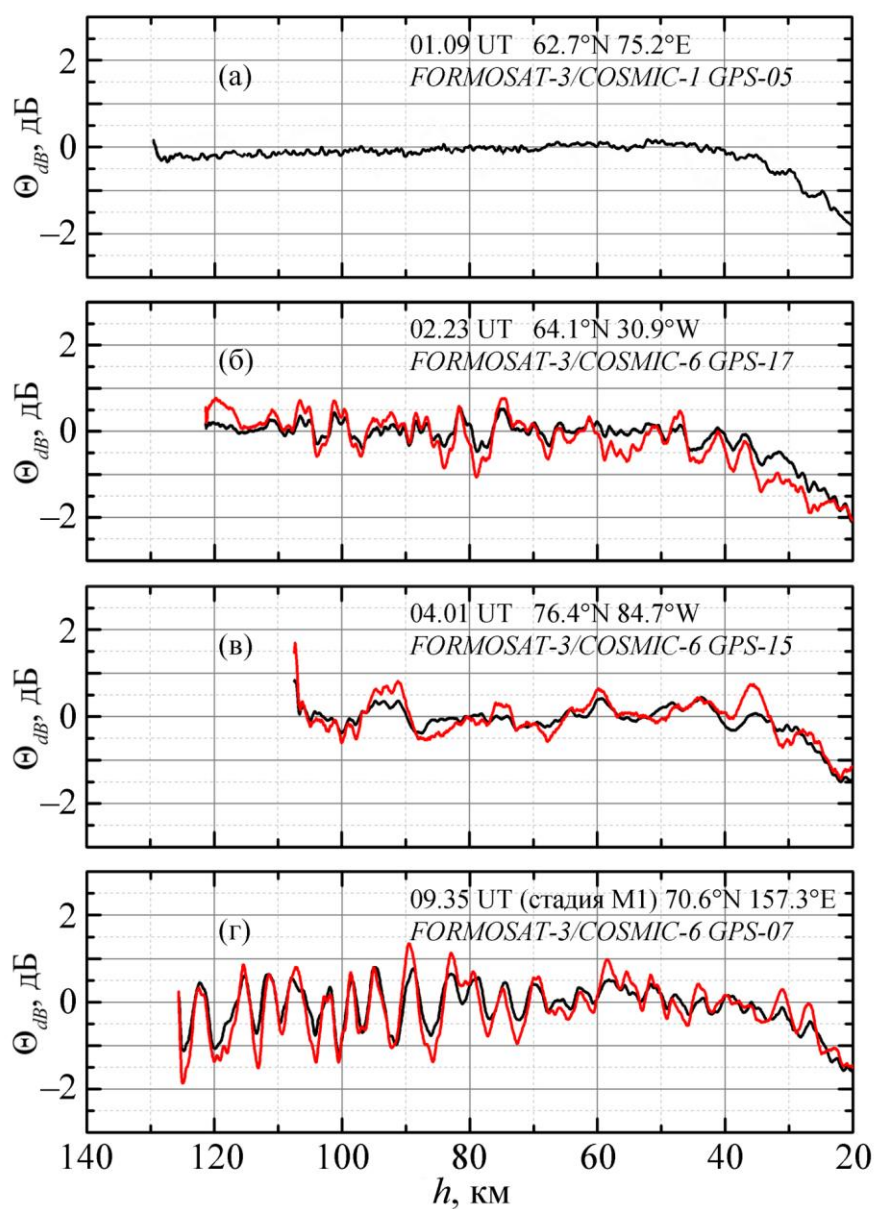


Рис. 2. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазонах $L1$ (черный цвет) и $L2$ (красный цвет) после фильтрации, полученные в сеансах радиозатменных измерений 17 марта 2015 года в ионосфере и атмосфере Земли

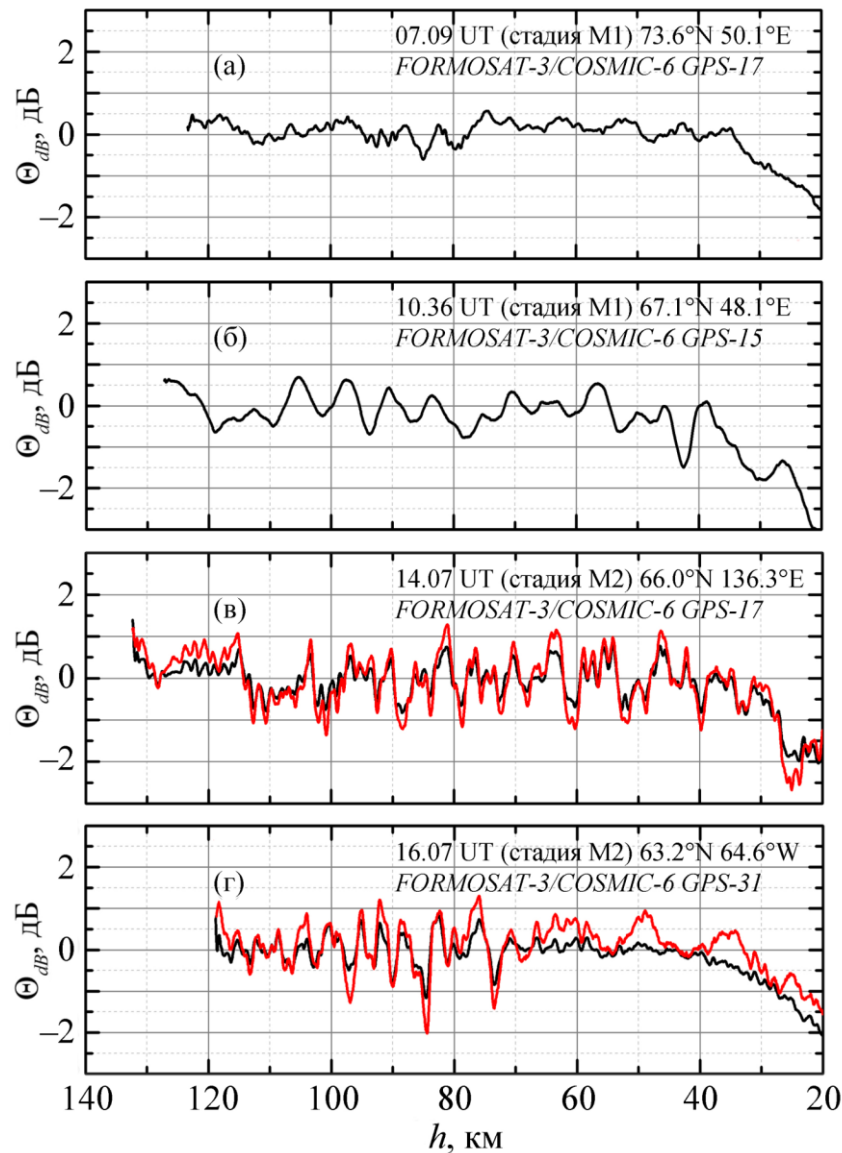


Рис. 3. Вертикальные профили нормированной мощности $\Theta_{дВ}$ сигналов в диапазонах $L1$ (черный цвет) и $L2$ (красный цвет) после фильтрации, полученные 17 марта 2015 года в сеансах радиозатменных измерений спутников *FORMOSAT-3/COSMIC* во время главной фазы магнитной бури

На рис. 4а показан профиль мощности $\Theta_{дВ}$ сигнала (диапазон $L1$), измеренный в ~ 12.20 UT 17 марта 2015 года вскоре после начала второй стадии M2 главной фазы шторма. Здесь, за исключением небольших вариаций (амплитуда < 1 дБ) мощности $\Theta_{дВ}$ сигнала, наблюдающихся на уровнях E -области выше ~ 105 км, отсутствуют какие-либо ионосферные возмущения. Вариации мощности $\Theta_{дВ}$ сигнала диапазона $L1$ (рис. 4б, стадия M2 (~ 13.58 UT)) в D - и E -областях высокоширотной (70.1°N ; 4.4°E) ионосферы Земли демонстрируют, пожалуй, наибольший уровень возмущений по сравнению с данными других сеансов радиозатменных измерений. Здесь, в интервале высот от ~ 120 км до ~ 40 км, наблюдаются заметные вариации мощности, амплитуда которых достигает ~ 2 дБ на уровне чуть ниже ~ 110 км. Примерно такая амплитуда возмущений мощности и на той же высоте зафиксирована для профиля, показанного на рис. 4г.

В работах [13–15] 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 [12]:

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

Нами проводился поиск поглощения радиоволн диапазонов $L1$ и $L2$ на трассах радиозатменного зондирования в D - и E -областях высокоширотной ионосферы Земли во время сильной магнитной бури 17 и 18 марта 2015 года. Это предполагает анализ сеансов радиозатменных измерений эйконала и мощности сигнала для определения интегрального поглощения (уровень -3 дБ и ниже) и решения обратной задачи о поглощении радиоволн. Такие уровни интегрального поглощения, как показывает опыт анализа данных о геомагнитной буре в июне 2015 года, позволяют восстанавливать вертикальные профили коэффициента поглощения в ионосфере Земли с приемлемой относительной погрешностью не хуже $\sim 50\%$ [12].

На рис. 5 приведены примеры зависимостей мощности P (черный цвет), рефракционного ослабления X (зеленый цвет) и интегрального поглощения Γ (желтый цвет) ДМ-сигнала (диапазон $L1$) от высоты перигея луча. Приведенные на рис. 5 (панели а и б) профили $\Theta(h)$ и $X(h)$ очень хорошо соответствуют друг другу, что указывает на высокое качество сигналов на частоте f_1 . Данные, показанные на панели (а) рис. 5 и полученные в спокойный геомагнитный период до начала бури, свидетельствуют о полном отсутствии возмущений в интервале высот от ~ 125 км до ~ 45 км. Для профилей $\Theta(h)$ и $X(h)$, представленных на панели (б) рис. 5 (вторая стадия $M2$ главной фазы бури), характерны вариации мощности сигнала с амплитудой $\sim 20\%$ относительно единичного среднего уровня на указанных высотах. Как видно из рассмотрения рис. 5б, эти вариации связаны не с поглощением сигнала, а с рефракционным ослаблением радиоволн. Коррелированность профилей $\Theta(h)$ и $X(h)$ по высоте на рис. 5б свидетельствует об определяющем вкладе здесь слоистых неоднородностей в наблюдаемые вариации [15]. Некоторые отличия (~ 10 – 15%) в вертикальных профилях $\Theta(h)$ и $X(h)$ наблюдаются в третьем примере (рис. 5в, стадия $M2$). Максимальные отличия $X(h)$ и $\Theta(h)$ на определенных высотах указывают на возможное поглощение сигнала в местах их локализации. Максимум $\Gamma \approx 0.8$ (-1 дБ) наблюдается на высоте ~ 84 км (рис. 5в). Однако, этого явно недостаточно для надежной оценки интегрального поглощения в данном сеансе измерений. Как упоминалось выше, уровень интегрального поглощения ~ 0.5 (-3 дБ) необходим для восстановления вертикального профиля коэффициента поглощения (относительная погрешность не хуже $\sim 50\%$) по результатам решения обратной задачи.

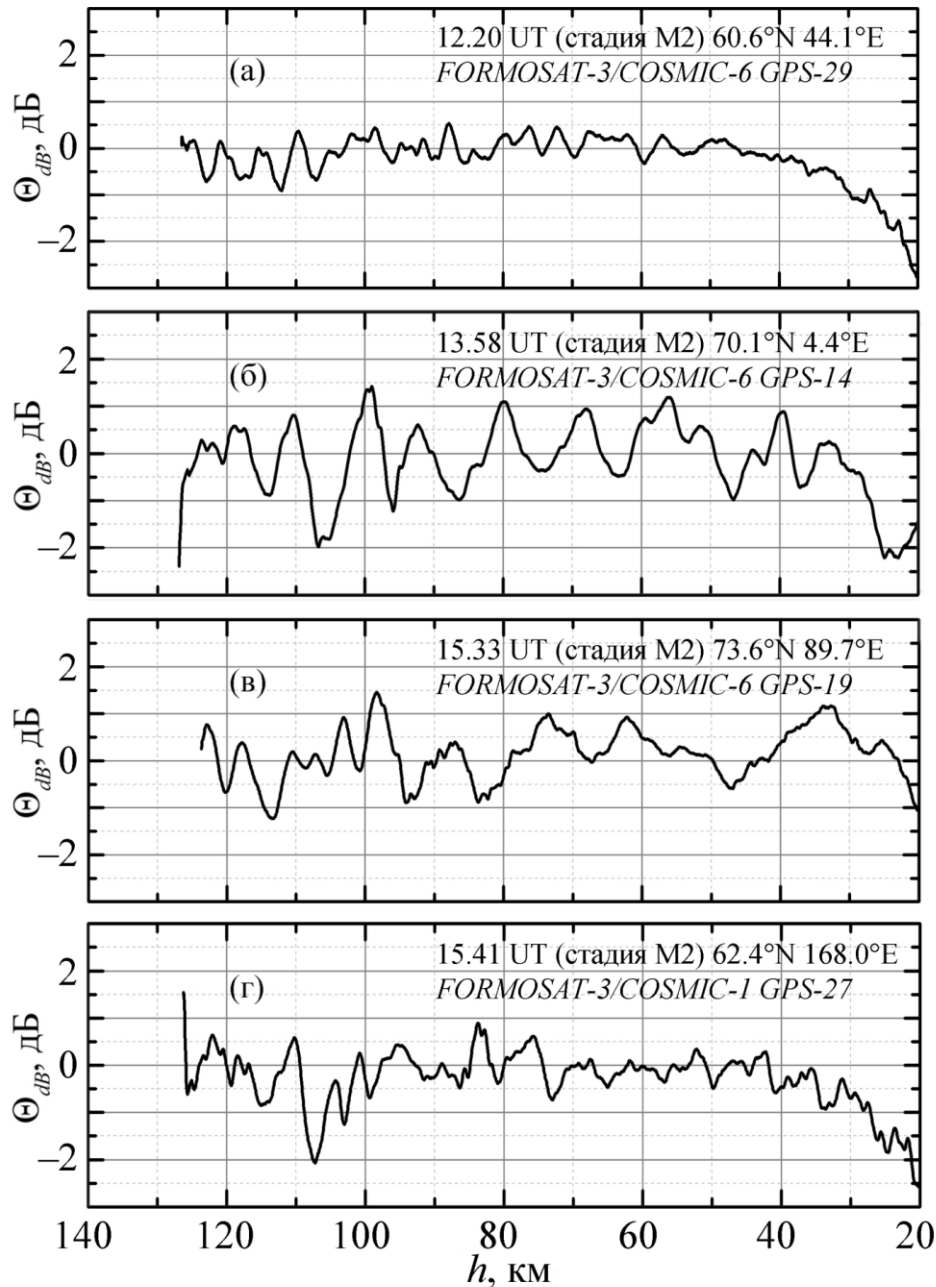


Рис. 4. Вертикальные профили нормированной мощности $\Theta_{дв}$ сигналов в диапазоне $L1$ после фильтрации, полученные 17 марта 2015 года в четырех сеансах радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC* в высокоширотной ионосфере и атмосфере Земли во время второй ступени главной фазы бури

Ранее, при анализе ~100 сеансов радиозатменных измерений, проведенных во время бури в июне 2015 года, было установлено, что абсолютная величина интегрального поглощения ДМ-радиоволн (диапазон $L1$) на трассах зондирования составляет ~3 дБ в интервале высот от ~50 до ~90 км, а в некоторых случаях достигает ~10 дБ на уровнях от ~90 до ~95 км [11, 12]. Поиск поглощения радиоволн (диапазоны $L1$ и $L2$) в высокоширотной ионосфере Земли во время сильной магнитной бури в марте 2015 года был проведен нами для ~50 сеансов радиозатменных измерений, однако аналогичных мощных ионосферных возмущений и поглощения радиоволн на трассах

радиозатменного зондирования не было зафиксировано. Объяснение данного факта требует дальнейших исследований.

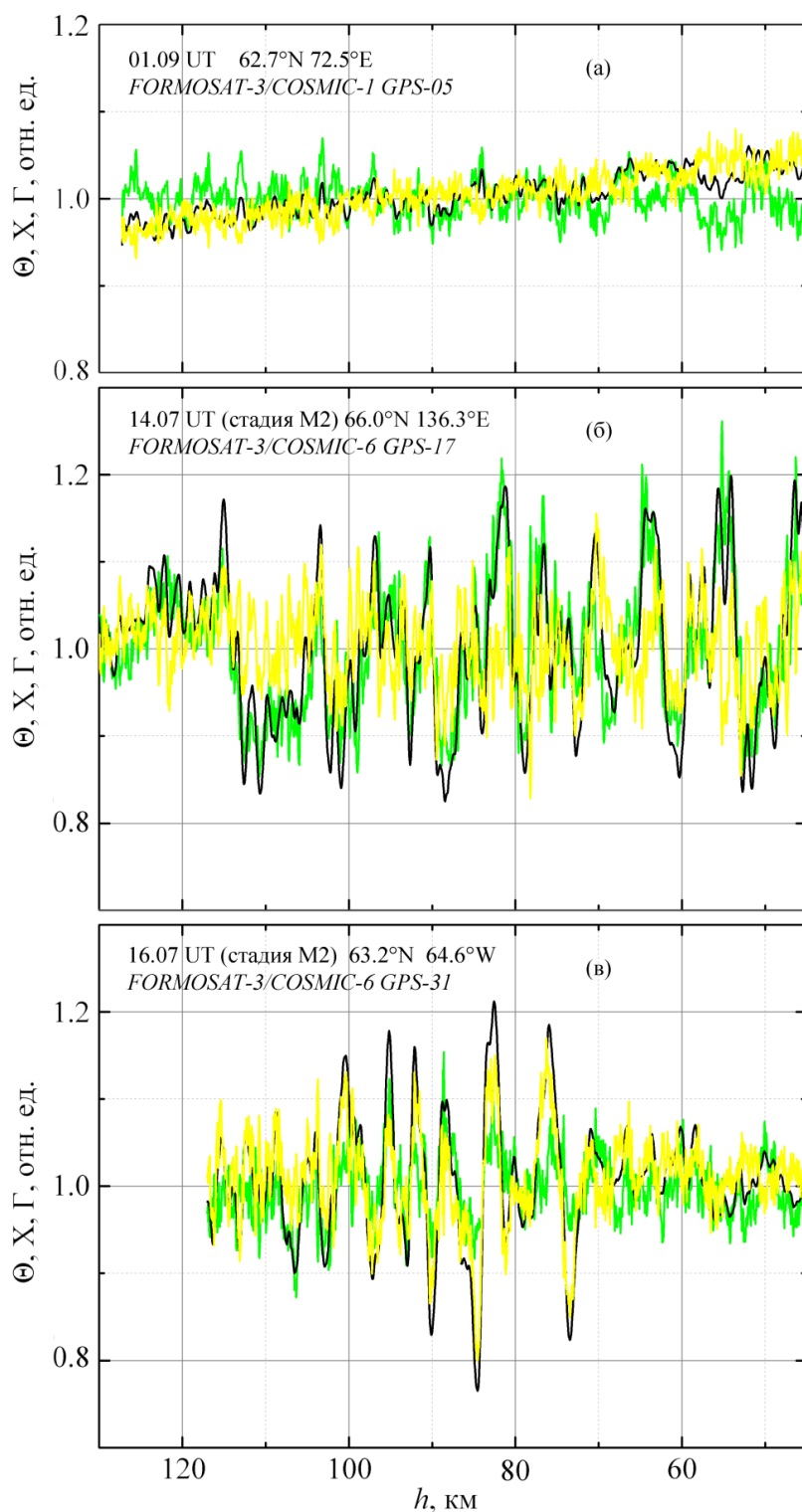


Рис. 5. Примеры зависимостей мощности P (черный цвет), рефракционного ослабления X (зеленый цвет) и интегрального поглощения Γ (желтый цвет) ДМ-сигнала от высоты перигея луча, полученных из анализа радиозатменных измерений эйконала и мощности в D - и E -областях высокоширотной ионосферы Земли 17 марта 2015 года во время магнитной бури

Литература

1. Maurya A.K., Venkatesham K., Kumar S., Singh R., Tiwari P., Singh A.K. Effects of St. Patrick's Day geomagnetic storm of March 2015 and of June 2015 on low-equatorial D region ionosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2018, V. 123. <https://doi.org/10.1029/2018JA025536>.
2. Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120, P. 9023–9037, <https://doi.org/10.1002/2015JA021629>.
3. Шпынев Б.Г., Золотухина Н.А., Полех Н.М., Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Мелич Й. Исследование ионосферного отклика на сильную геомагнитную бурю в марте 2015 года по данным евразийской цепи ионозондов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 4. С. 235–248, <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-235-248>.
4. Данильчук Е.И., Ясюкевич Ю.В., Ясюкевич А.С., Затолокин Д.А. Влияние геомагнитной бури 17 марта 2015 г. на точность GPS-позиционирования в одночастотном режиме // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 1. С. 31–39. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-31-39>.
5. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 518 с.
6. Ramsingh S., Sripathi S., Sreekumar S., Banola K., Emperumal P.T., Kumar B.S. Low-latitude ionosphere response to super geomagnetic storm of 17/18 March 2015: Results from a chain of ground based observations over Indian sector // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. P. 10864–10882. <https://doi.org/10.1002/2015JA021509>.
7. Marubashi K., Cho K.S., Kim R.S., Kim S., Park S.H., Ishibashi H. The 17 March 2015 storm: The associated magnetic flux rope structure and the storm development // *Earth, Planets and Space*. 2016. V. 68(1). P. 173–184. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0551-9>.
8. Verkhoglyadova O.P., Tsurutani B.T., Mannucci A.J., Mlynczak M.G., Hunt L.A., Paxton L.J., Komjathy A. Solar wind driving of ionosphere-thermosphere responses in three storms near St. Patrick's Day in 2012, 2013, and 2015 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2016. V. 121. P. 8900–8923. <https://doi.org/10.1002/2016JA022883>.
9. Wu C. C., Liou K., Lepping R.P., Huttig L., Plunkett S., Howard R.A., Socker D. The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: "The St. Patrick's Day event (17 March 2015)" // *Earth, Planets and Space*. 2016. V. 68(1). P. 151–163. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0525-y>.
10. Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б., Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Подлесный А.В. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2016. Т. 56. № 5. С. 591–605, <https://doi.org/10.7868/S0016794016040179>.
11. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В. Радиозатменные исследования возмущений в ионосфере Земли во время магнитной бури 22–23 июня 2015 года // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. Т. 61. № 6. С. 713–722, <https://doi.org/10.31857/S0016794021060067>.
12. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В. Коэффициент поглощения дециметровых радиоволн (~19 см) в ионосфере Земли по результатам решения обратной задачи в радиозатменных спутниковых исследованиях во время магнитной бури в июне 2015 г. // *Космические исследования*.

2022. Т. 60. № 6. С. 471–478, <https://doi.org/10.31857/S0023420622060036>.

13. 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. V. 61. No. 7. P. 1702–1716, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001>.

14. Губенко В.Н., Кириллович И.А. Модуляция спорадических Е-слоев мелкомасштабными атмосферными волнами в высокоширотной ионосфере Земли // *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5. № 3. С. 116–129, <https://doi.org/10.12737/szf-53201912>.

15. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2010. 208 с.