

Мелкомасштабная структура в нижней ионосфере Земли во время магнитной бури в марте 2015 года по радиозатменным данным

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, vngubenko@gmail.com

Весной 2015 года на Солнце имели место мощные корональные выбросы массы (КВМ) в сторону Земли. Корональные выбросы плазмы, достигшие магнитосферы Земли в период с 17 по 18 марта 2015 года, спровоцировали сильную магнитную бурю класса G4, в которой максимальное значение Kp-индекса равнялось 8. Обработаны и проанализированы сеансы радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC, выполненных во время магнитной бури 17–18 марта 2015 года в ионосфере Земли. Проведен поиск ослабления дециметровых (ДМ) радиоволн в двух диапазонах длин волн ~19.0 и ~24.4 см на несущих GPS-частотах с целью изучения мелкомасштабной структуры в нижней ионосфере во время магнитной бури. Ключевые слова: радиозатменные спутниковые измерения, ионосфера Земли, магнитная буря, поглощение радиоволн

Small-scale structure in the Earth's lower ionosphere during a magnetic storm in March 2015 according to radio occultation data

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

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

In the spring of 2015, the Sun experienced powerful coronal mass ejections (CMEs) towards the Earth. Coronal plasma ejections that reached the Earth's magnetosphere in the period from March 17 to 18, 2015 provoked a strong magnetic storm of class G4, in which the maximum value of the Kp index was 8. Sessions of radio occultation FORMOSAT-3/COSMIC measurements carried out during the magnetic storm of March 17–18, 2015 in the Earth's ionosphere were processed and analyzed. A search was carried out for attenuation of decimeter (DM) radio waves in two wavelength ranges ~19.0 and ~24.4 cm at GPS carrier frequencies in order to study the small-scale structure in the lower ionosphere during a magnetic storm.

Keywords: radio occultation satellite measurements, Earth's ionosphere, magnetic storm, radio wave absorption

Введение

Солнечные вспышки и магнитные бури являются главными явлениями космической погоды. Если вспышки оказывают влияние на дневную ионосферу Земли, то геомагнитные штормы воздействуют, в основном, на высокоширотную ионосферу. Следует отметить, что штормовые эффекты также наблюдаются и в D-области низкоширотной ионосферы планеты [1]. D-область (~90–60 км) является нижней частью ионосферы, которая играет важную роль в задачах обеспечения космической радиосвязи и навигации [2, 3]. Несмотря на это, она остается относительно неисследованной вследствие низкой электронной плотности на высотах D-области ионосферы Земли.

Пик активности 24-го солнечного цикла пришелся на 2015 год [4]. В это время на Земле имели место две сильнейшие магнитные бури примерно одинаковой интенсивности. Буря 17–18 марта 2015 года оказалась самой крупной магнитной бурей

(минимум $Dst = -223$ нТл) в солнечном цикле 24. Интенсивность геомагнитного шторма 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 [5]. В начальную фазу шторма с 04.45 по 06.22 UT планетарный Kp -индекс резко увеличился с 2 до 5. На протяжении главной фазы с 06.23 до 22.47 UT 17 марта 2015 года Kp -индекс немонотонно менялся от 5+ до 8– [6]. Главная фаза бури характеризовалась уменьшением индекса $SYM-H$ до -234 нТл (22.47 UT), а также значительной вариабельностью индекса AE [7].

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 (верхняя панель) представлены вариации индекса Dst на различных стадиях бури в марте 2015 года. Пурпурным и красным цветом показаны соответственно начало и фаза бури, а черным цветом выделена фаза восстановления. Здесь также представлены вариации аврорального индекса AE (вертикальная ось справа) во время шторма. Следуя работе [8], кратко рассмотрим физический смысл индексов Dst и AE , которые используются для оценки геомагнитной активности и характеристик ММП. Магнитные бури определяются как наиболее мощные геомагнитные возмущения спокойных суточных условий. Усредняя 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 [8]. Описание геомагнитных условий и характеристик ММП для этого шторма можно найти во многих работах [9–13].

В данной работе мы проводим обработку и анализ радиозатменных измерений эйконала и мощности 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 определения мелкомасштабной структуры и изучения влияния бури на нижнюю ионосферу Земли.

Анализ радиозатменных данных *FORMOSAT-3/COSMIC* и обсуждение полученных результатов

В этой работе мы анализируем сеансы радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC*, проведенные в период с 17 по 18 марта 2015 года. Отобранные сеансы двухчастотных измерений были выполнены на широтах свыше $\sim 60^\circ N$ во время магнитной бури в марте 2015 года и содержали зависимости эйконала (фазового пути) и мощности сигнала от высоты перигея радиолуча. Приемники навигационных сигналов, установленные на шести малых низкоорбитальных спутниках *FORMOSAT-3/COSMIC* (высота орбит ~ 800 км), регистрировали эйконал и мощность 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) как функции времени.

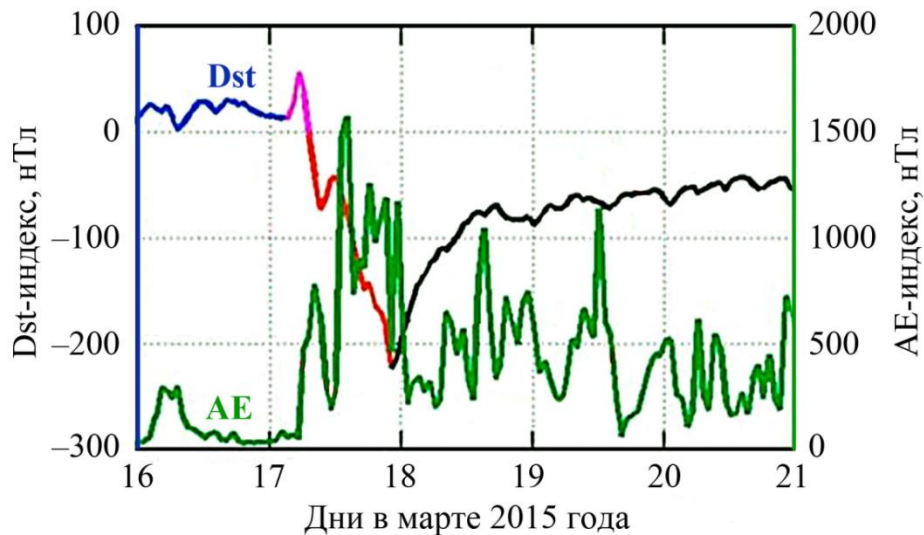


Рис. 1. Вариации *Dst*-индекса (вертикальная ось слева) и аврорального *AE*-индекса (вертикальная ось справа): с 16 до 21 марта 2015 года

Прицельный параметр лучевой траектории и угол рефракции радиолуча можно определить на основе анализа эйконола и учета известных баллистических данных спутников [14]. Обработка данных о нормированной мощности $P(h)$ радиоволн включала сглаживание (фильтрацию) данных по 50 точкам методом скользящего среднего. При вертикальной 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 мелкомасштабной структуре ионосферы при анализе методом геометрической оптики. Более подробное описание обработки экспериментальных данных можно найти в работах [2, 14].

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 дата и 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 верхних панелях 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. Что касается периодической компоненты сигнала (красный цвет) на верхней панели рис. 2, то она связана с помехой и относительно худшим качеством сигнала в диапазоне L2 по сравнению с диапазоном L1. Рисунок 2 демонстрирует убывание средней мощности радиозатменных сигналов с уменьшением высоты в интервале от 40 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 нижней панели рис. 2, были получены в ~ 09.35 UT после начала первой ступени M1 (06.23 UT) главной фазы мартовской бури [6]. Здесь, на высотах более ~ 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. Хорошее соответствие наблюдаемых флуктуаций для двух диапазонов радиоволн и высокая степень корреляции возмущений по высоте

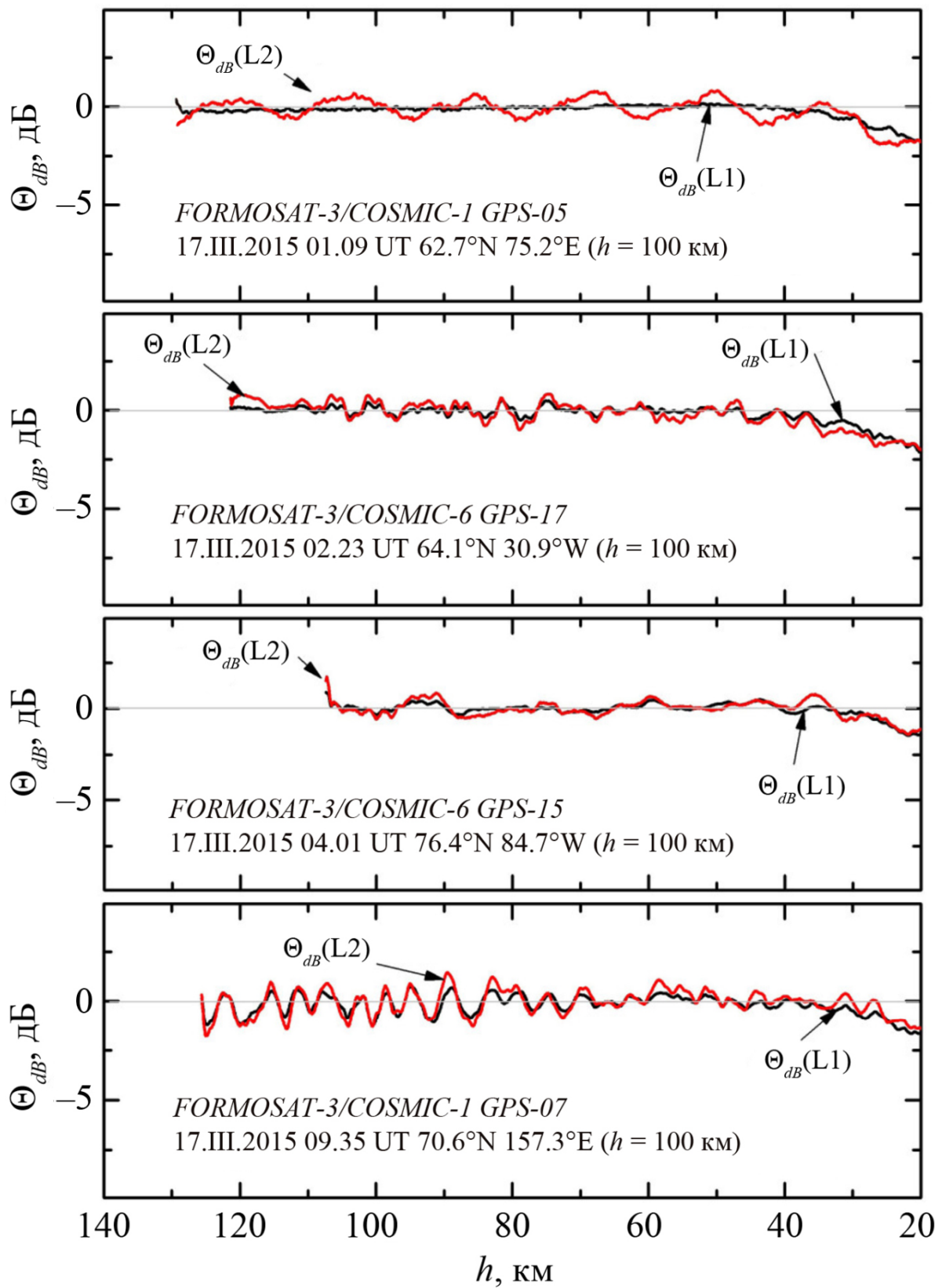


Рис. 2. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазонах L1 (черный цвет) и L2 (красный цвет) после фильтрации, полученные в сеансах радиозатменных измерений 17 марта 2015 года в ионосфере и атмосфере Земли

свидетельствуют о реальности их существования. В то же время, для первой ступени главной фазы бури, возмущения в *D*-области высокоширотной ионосферы планеты практически не наблюдаются на высотах ниже ~90 км (рис. 2, нижняя панель).

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 верхней панели рис. 3. показан профиль мощности Θ_{dB} сигнала в диапазоне L1 (длина волны ~19 см), измеренный в ~07.09 UT вскоре после начала первой ступени M1 главной фазы шторма. Передатчик сигналов находился на навигационном спутнике *GPS* №17, а приемник был расположен на низкоорбитальном аппарате *FORMOSAT-3/COSMIC* №6. Представленные данные на верхней панели рис. 3 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 до ~75 км в верхней части *D*-области, где обнаруживаются небольшие вариации (<1 дБ.) мощности радиоволн. Профиль мощности Θ_{dB} сигнала, показанный на второй панели сверху рис. 3, также был получен в сеансе измерений (~10.36 UT) во время первой ступени главной фазы бури. Здесь, возмущения в *D*- и *E*-областях высокоширотной (67.1°N; 48.1°E) ионосферы выражены более ярко, чем в предыдущем случае, хотя амплитуда вариаций мощности Θ_{dB} и остается небольшой.

Начало второй ступени M2 главной фазы бури приходится на ~12.00 UT 17 марта 2015 года [6]. 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 двух нижних панелях рис. 3 вертикальные профили мощности Θ_{dB} сигнала в диапазонах L1 и L2 после фильтрации были измерены во время второй ступени главной фазы шторма. Следует отметить отличное соответствие наблюдаемых вариаций мощности Θ_{dB} для двух диапазонов радиоволн и высокую степень высотной корреляции возмущений в *D*- и *E*-областях ионосферы для сеанса измерений, проведенного в ~14.07 UT (вторая панель снизу на рис. 3). Несмотря на то, что амплитуда возмущений остается небольшой, вышесказанное является подтверждением реальности их существования. Небольшое несоответствие амплитуды высотных вариаций мощности Θ_{dB} сигнала для диапазонов L1 и L2 на нижней панели рис. 3 может быть связано с недостаточно высоким качеством сигнала в диапазоне L2.

На рис. 4 представлены 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 ступени главной фазы бури. На верхней панели показаны профиль мощности Θ_{dB} сигнала, измеренный ~12.20 UT вскоре после начала второй ступени M2 главной фазы шторма. Здесь, за исключением небольших вариаций (амплитуда <1 дБ) мощности Θ_{dB} сигнала, наблюдающихся на уровнях *E*-области выше ~105 км, отсутствуют какие-либо ионосферные возмущения. На второй панели сверху рис. 4 показан профиль мощности Θ_{dB} сигнала в диапазоне L1, измеренный в ~13.58 UT в высокоширотной (70.1°N; 4.4°E) ионосфере, который демонстрирует наибольший уровень возмущений в *D*- и *E*-областях ионосферы Земли по сравнению с данными анализа других сеансов радиозатменных измерений. Здесь, в интервале от ~120 до ~40 км, наблюдаются заметные вариации мощности Θ_{dB} сигнала, амплитуда которых достигает ~2 дБ на высоте чуть ниже 110 км. Примерно такая амплитуда возмущений мощности и на той же высоте зафиксирована для другого профиля, показанного на рис. 4 (нижняя панель).

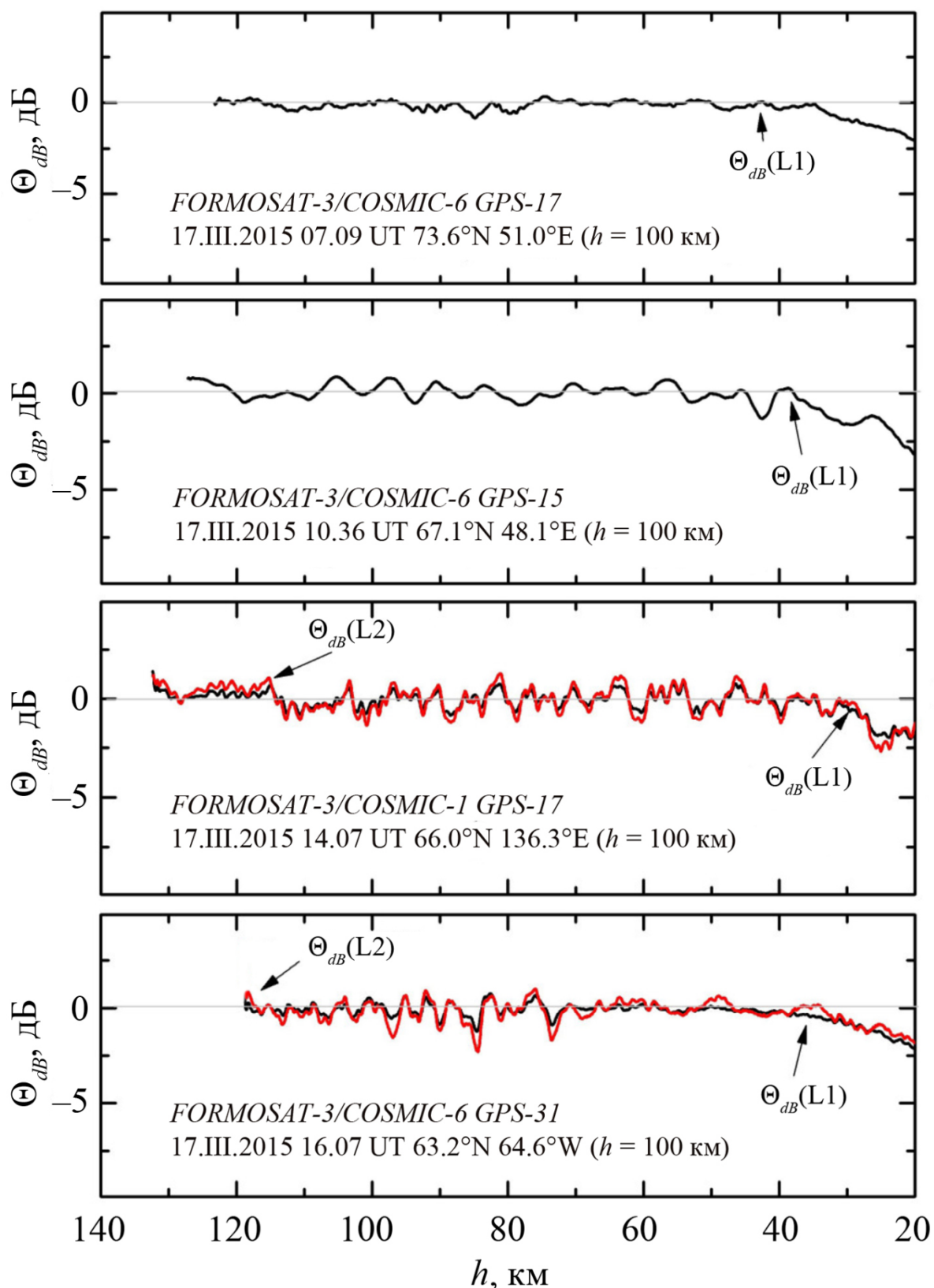


Рис. 3. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазонах L1 (черный цвет) и L2 (красный цвет) после фильтрации, полученные 17 марта 2015 года в сеансах радиозатменных измерений спутников *FORMOSAT-3/COSMIC* во время главной фазы магнитной бури

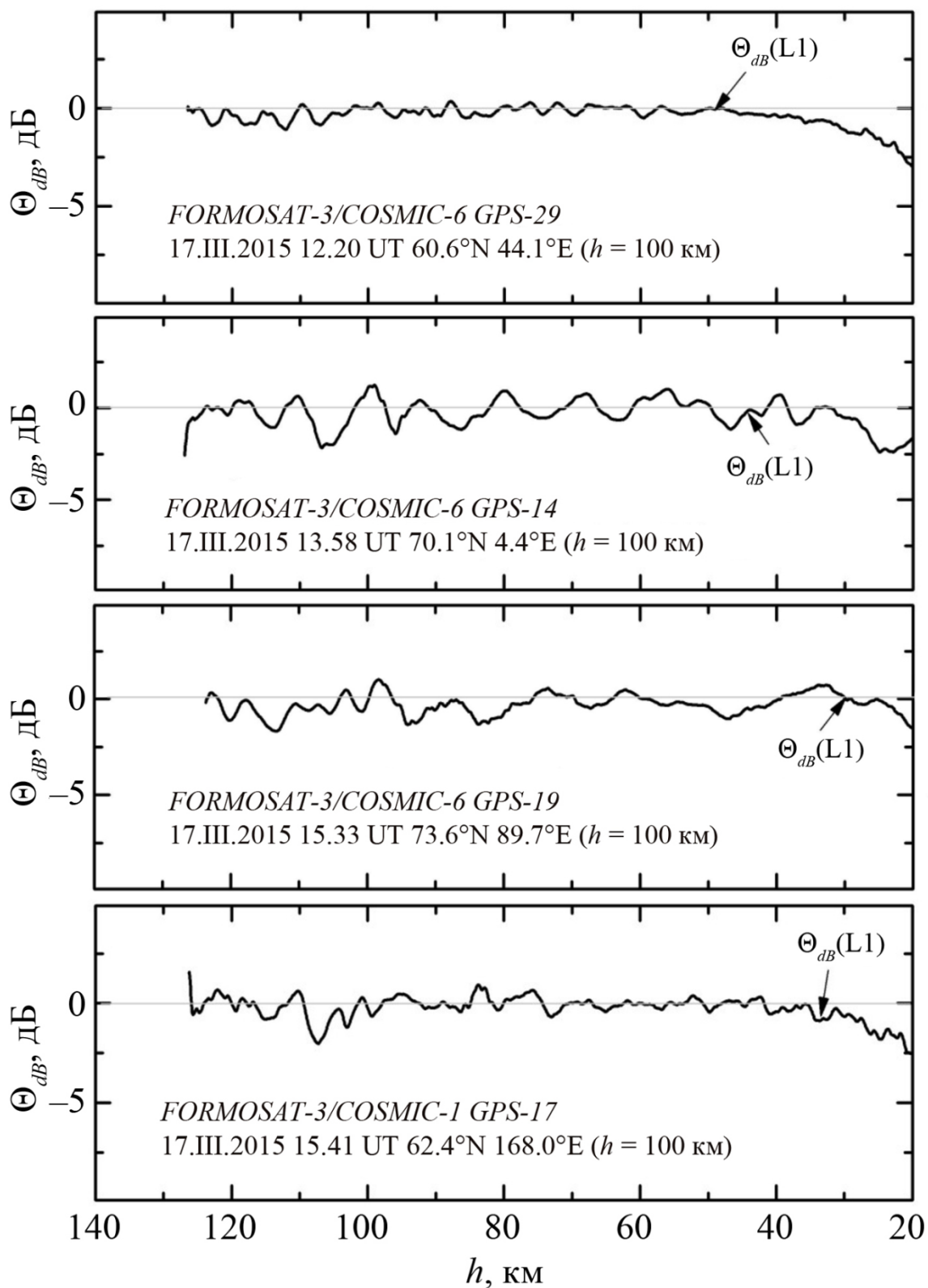


Рис. 4. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазоне L1 после фильтрации, полученные 17 марта 2015 года в четырех сеансах радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC в высокоширотной ионосфере и атмосфере Земли во время второй ступени главной фазы бури

В ранее опубликованных статьях [15, 16] 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 [2]:

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

Нами проводился поиск поглощения радиоволн диапазонов L1 и L2 на трассах радиозатменного зондирования в *D*- и *E*-областях высокоширотной ионосферы Земли во время магнитной бури 17 и 18 марта 2015 года. На рис. 5 приведены три примера зависимостей мощности P (черный цвет) и рефракционного ослабления X (зеленый цвет) ДМ-сигнала от высоты перигея луча. Данные, показанные на верхней панели рис. 5 и полученные в спокойный геомагнитный период до начала бури, свидетельствуют о полном отсутствии ионосферных возмущений в интервале высот от ~125 до ~45 км. Для профилей $P(h)$ и $X(h)$, представленных на средней панели рис. 5 (вторая ступень главной фазы бури), характерны вариации мощности сигнала с амплитудой ~20% на указанных ранее высотах. Однако, как видно из рассмотрения рис. 5, все они связаны не с поглощением сигнала, а с рефракционным ослаблением радиоволн. Некоторые отличия (~10–15%) вертикальных профилей $P(h)$ и $X(h)$ наблюдаются в третьем примере (нижняя панель рис. 5, вторая ступень главной фазы бури). Тем не менее, этого недостаточно для удовлетворительной идентификации и оценки поглощения в данном сеансе измерений. 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 он не увенчался успехом.

Ранее, при анализе 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 [2, 14]. Таким образом, мы видим, что по данным анализа радиозатменных измерений во время бури в марте 2015 года не было зафиксировано аналогичных мощных ионосферных возмущений и поглощения радиоволн на трассах радиозатменного зондирования. Одна из возможных причин этого, по-видимому, связана с отсутствием здесь мощных потоков рентгеновского излучения, которые наблюдались во время бури в июне 2015 года. Тем не менее, объяснение данного факта требует дальнейших исследований.

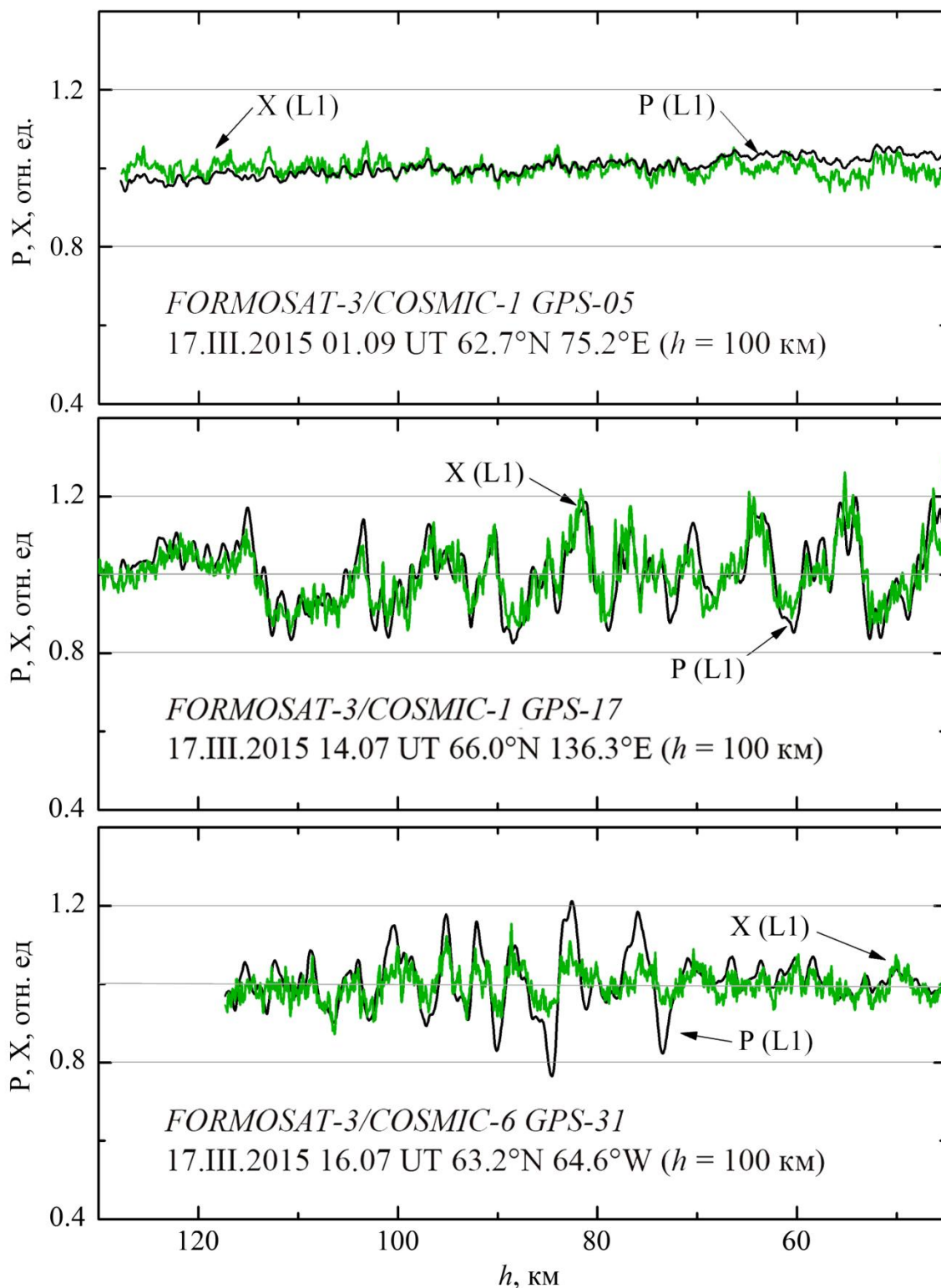


Рис. 5. Примеры зависимостей мощности P (черный цвет) и рефракционного ослабления X (зеленый цвет) ДМ-сигнала от высоты перигея луча, полученных из анализа радиозатменных измерений эйконала и мощности в D - и E -областях высокоширотной ионосферы Земли во время магнитной бури 17 и 18 марта 2015 года.

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

Литература

1. Kumar S., Kumar A., Menk F., Maurya A. K., Singh R., Veenadhari B. Response of the low-latitude D region ionosphere to extreme space weather event of 14–16 December 2006 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. P. 788–799, <https://doi.org/10.1002/2014JA020751>.
2. 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>.
3. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В. Определение эффективной частоты столкновения электронов в области E и D ионосферы высоких широт по данным анализа радиозатменных измерений // *Космические исследования*. 2023. Т. 61, № 6. С. 454–460, <https://doi.org/10.31857/S0023420623600137>.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. 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>.
8. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 518 с.
9. Ramsingh S., Sripathi S., Sreekumar S., Vanola 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>.
10. 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>
11. Verkhoglyadova O.P., Tsurutani B.T., Mannucci A.J., Mlynchak 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>.
12. Wu C. C., Liou K., Lepping R.P., Hutting 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>.
13. 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>.
14. 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>.
15. 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>.
16. Губенко В.Н., Кириллович И.А. Модуляция спорадических E-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>.