

Изучение влияния магнитных бурь в марте и июне 2015 года на нижнюю ионосферу Земли по данным анализа радиозатменных измерений

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

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 и летом 2015 года на Солнце имели место мощные корональные выбросы массы (КВМ) в сторону Земли. Корональные выбросы плазмы, достигшие магнитосферы Земли в периоды с 17 по 18 марта и с 22 по 23 июня 2015 года, спровоцировали две сильные магнитные бури класса G4, в которых максимальные значения Kp-индекса равнялись 8. Нами проведена обработка и анализ ~100 сеансов радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC, выполненных во время магнитной бури 22–23 июня 2015 года в ионосфере Земли. Полученные результаты показали, что магнитная буря в июне 2015 года вызвала значительные флуктуации параметров радиоволн на трассах ионосферного зондирования навигационные (GPS) спутники – низкоорбитальные (FORMOSAT-3/COSMIC) спутники в высокоширотной ионосфере планеты. Было найдено, что ионосферные возмущения характеристик радиоволн обусловлены как геомагнитными условиями во время шторма, так и активностью мощных рентгеновских вспышек, наблюдавшихся в период измерений. Проведенный поиск ослабления дециметровых (ДМ) радиоволн (длина волны ~19 см) на несущей GPS-частоте 1545.42 МГц обнаружил поглощение ДМ-сигнала в D- и E-областях высокоширотной ионосферы Земли. По результатам решения обратной задачи о поглощении радиоволн были восстановлены профили коэффициента поглощения ДМ-радиоволн в нижней ионосфере планеты во время магнитной бури 22–23 июня 2015 года. Также проведены обработка и анализ радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC, выполненных во время магнитной бури 17–18 марта 2015 года в ионосфере Земли. Сравнение полученных результатов с данными о магнитной буре 22–23 июня 2015 года показывает существенные различия влияния бурь на нижнюю ионосферу планеты. Ключевые слова: радиозатменные спутниковые измерения, ионосфера Земли, магнитная буря, поглощение радиоволн

Study of the influence of magnetic storms in March and June 2015 on the Earth's lower ionosphere according to the analysis of radio occultation measurements

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

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

In the spring and summer of 2015, the Sun experienced powerful coronal mass ejections (CMEs) towards the Earth. Coronal plasma ejections that reached the Earth's magnetosphere during the periods from March 17 to 18 and from June 22 to 23, 2015 provoked two strong magnetic storms of the G4-class in which the maximum values of the planetary Kp-index were equal to 8. We processed and analyzed ~100 radio occultation sessions of FORMOSAT-3/COSMIC satellite measurements taken during a magnetic storm on June 22–23, 2015 in the Earth's ionosphere. The results of this analysis show that the storm in June 2015 caused significant fluctuations in the parameters of radio waves on the ionospheric sounding paths between navigational (GPS) and low-orbit (FORMOSAT-3/COSMIC) satellites in the planet's high-latitude ionosphere. It was found that ionospheric disturbances of the radio wave characteristics are caused by both the storm geomagnetic conditions and the activity of powerful X-ray flares observed during the period of measurements.

A search for the absorption of decimeter (DM) radio waves (wavelength ~19 cm) at the GPS-carrier frequency of 1545.42 MHz found the integral absorption of DM radio waves in the D- and E-regions of the Earth's high-latitude ionosphere. Based on the results of solving the inverse problem of radio wave absorption, the altitude profiles of the absorption coefficient of DM radio waves in the lower ionosphere were reconstructed during the magnetic storm on June 22–23, 2015. Processing and analyzing the FORMOSAT-3/COSMIC radio occultation measurements during a magnetic storm on March 17–18, 2015 in the Earth's ionosphere were carried out, also. Comparison of the results obtained with data on the magnetic storm of June 22–23, 2015 shows significant differences in the influence of storms on the planet's lower ionosphere.

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].

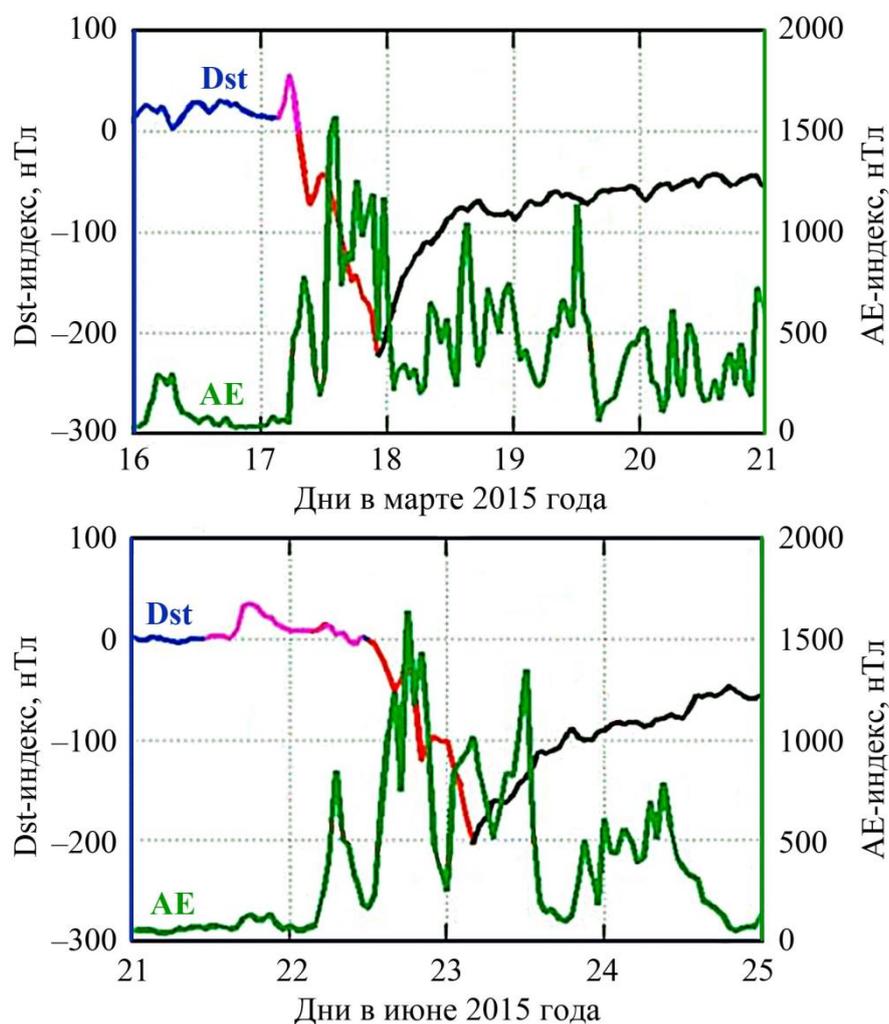


Рис. 1. Вариации Dst -индекса (вертикальная ось слева) и аврорального AE -индекса (вертикальная ось справа): с 16 до 21 марта 2015 года (верхняя панель) и с 21 по 25 июня (нижняя панель)

Начало шторма 22 июня 2015 года приходится на ~ 18.36 UT. В это время основной КВМ подошел к магнитосфере Земли, и данное событие сопровождалось сильными изменениями плотности и скорости солнечного ветра, а также компонент (B_x , B_y , B_z) ММП [14, 15]. Скорость протонов увеличилась с ~ 450 до 700 км/с, а давление солнечного ветра с 7 до 55 нПа. B_z -компонента ММП флуктуировала и меняла знак с ~ 19.20 UT 22 июня по ~ 08.00 UT 23 июня. Она оставалась южно направленной на длительном протяжении с ~ 08.00 UT по ~ 12.00 UT 23 июня, что обусловило минимум Dst -индекса -204 нТл в ~ 04.30 UT 23 июня 2015 года [4]. На рис. 1 (нижняя панель) представлены вариации Dst -индекса в июне 2015 года. Различные стадии шторма выделены разным цветом на графике. Здесь также показаны вариации аврорального AE -индекса (вертикальная ось справа) во время бури. Более подробная информация о шторме в июне 2015 года дана в работах [16–18].

Важной отличительной особенностью магнитных бурь в марте и июне 2015 года является то, что приход основного КВМ в магнитосферу Земли в ~ 18.36 UT 22 июня практически совпал по времени с мощными всплесками рентгеновского излучения (~ 18.00 UT – время максимальных потоков), которые были зарегистрированы геостационарными спутниками *GOES-13* и *-15*. Так, максимальные величины потоков в диапазонах (0.05 – 0.40) нм (жесткий рентген $\lambda < 0.1$ нм) и (0.10 – 0.80) нм (мягкий рентген) превышают их фоновые значения на ~ 3 и ~ 2 порядка, соответственно. Отметим также, что рост потоков рентгеновского излучения начался в ~ 16.30 UT 22 июня. Эти потоки достигли максимума в ~ 18.00 UT 22 июня, затем они убывали и в ~ 02.00 UT 23 июня восстановились до фоновых значений [15]. Однако, во время бури в марте 2015 года не было зарегистрировано какого-либо заметного превышения потоков рентгеновских лучей над фоном для спокойной геомагнитной обстановки.

Ранее мы подробно проанализировали более 100 радиозатменных сеансов измерений спутников *FORMOSAT-3/COSMIC*, выполненных во время главной фазы шторма в июне 2015 года, а также накануне бури и вскоре после ее окончания. Данные этого анализа опубликованы в следующих статьях [2, 3, 15, 19–21]. Проведем краткий обзор результатов, полученных в перечисленных работах. Анализируемые сеансы измерений были выполнены на высотах от ~ 100 до ~ 50 км в интервале высоких широт от $\sim 65^\circ$ до $\sim 88^\circ$ N.

1) Поиск ослабления ДМ-сигнала (длина волны ~ 19 см) впервые надежно обнаружил слой поглощения дециметровых радиоволн в *D*- и *E*-областях высокоширотной ионосферы, которые были обусловлены мощными потоками рентгеновского излучения и геомагнитными возмущениями во время шторма в июне 2015 года [2, 3]. Для сеансов радиозатменных измерений, проведенных после начала всплесков рентгеновского излучения и во время главной фазы шторма, характерны повышенные уровни электронной плотности на высотах *D*- и *E*-областей ионосферы, достигающие значений $\sim 3.9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ [15].

2) Разработан и апробирован метод определения высотных профилей коэффициента поглощения ДМ-радиоволн на основе решения обратной задачи о поглощении сигнала в нижней ионосфере Земли. Этот метод является общим и его можно использовать для различных диапазонов радиоволн и других сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Максимальная величина коэффициента поглощения ДМ-сигнала $(5.7 \pm 1.4) \cdot 10^{-3}$ дБ/км была зафиксирована нами на высоте ~ 91.8 км в *E*-области высокоширотной (78.1° N; 95.0° E) ионосферы Земли [2].

3) Разработан и апробирован новый метод определения вертикальных профилей эффективной частоты столкновений электронов с ионами и нейтрами в *D*- и *E*-областях высокоширотной ионосферы планеты. Для оценки эффективной частоты были использованы вертикальные профили коэффициента поглощения ДМ-сигнала и электронной плотности, которые мы восстановили из анализа радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC* во время магнитной бури в июне 2015 года [3].

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 изучения ее влияния на нижнюю ионосферу Земли и для сравнения с аналогичными данными о буре в июне 2015 года.

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 $\sim 60^\circ\text{N}$ 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. Прицельный параметр лучевой траектории и угол рефракции радиолуча можно определить на основе анализа эйконала и учета известных баллистических данных спутников [15]. 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, 15].

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 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).

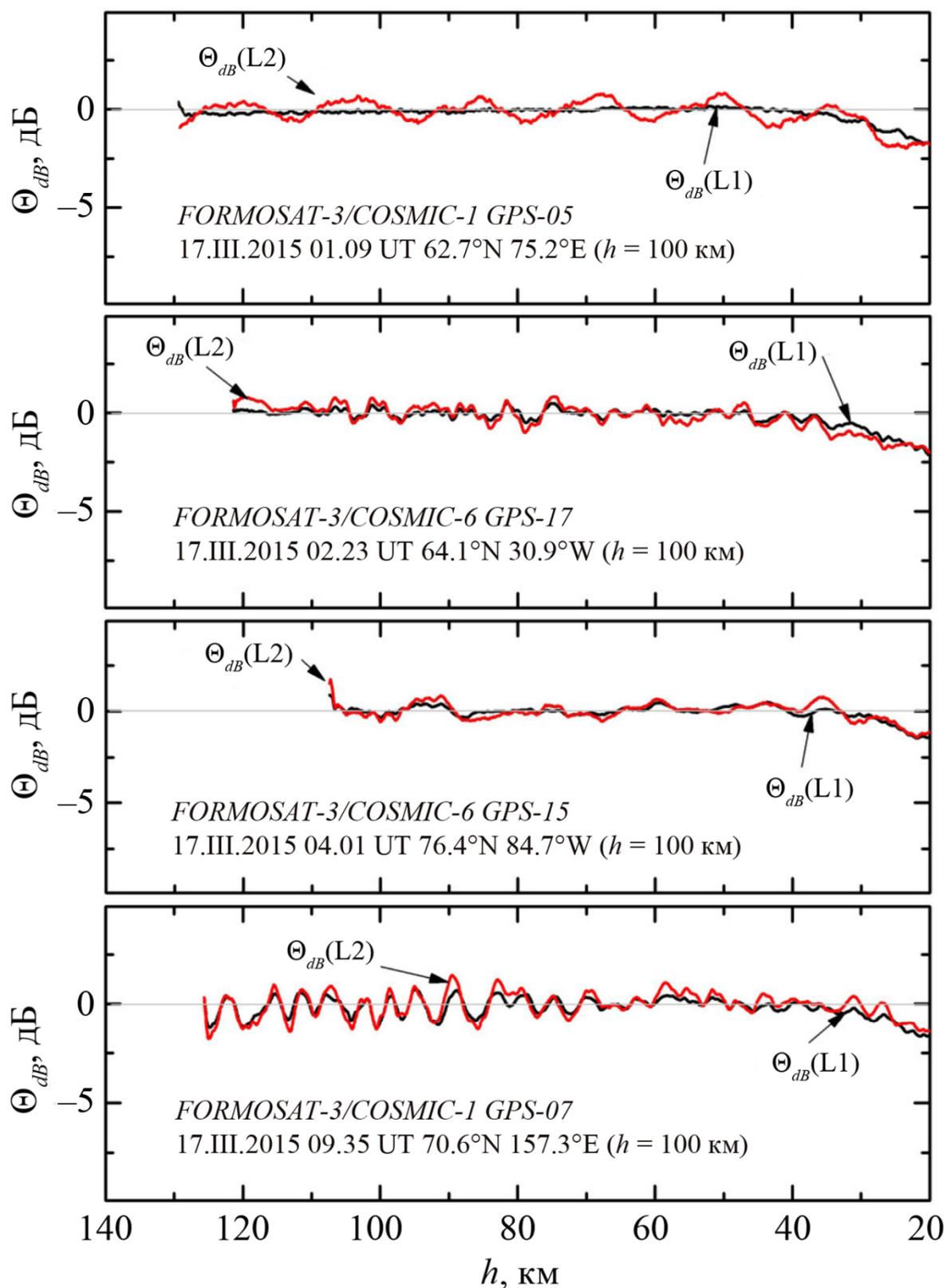


Рис. 2. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазонах L1 (черный цвет) и L2 (красный цвет) после фильтрации, полученные в сеансах радиозатменных измерений 17 марта 2015 года в ионосфере и атмосфере Земли

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).

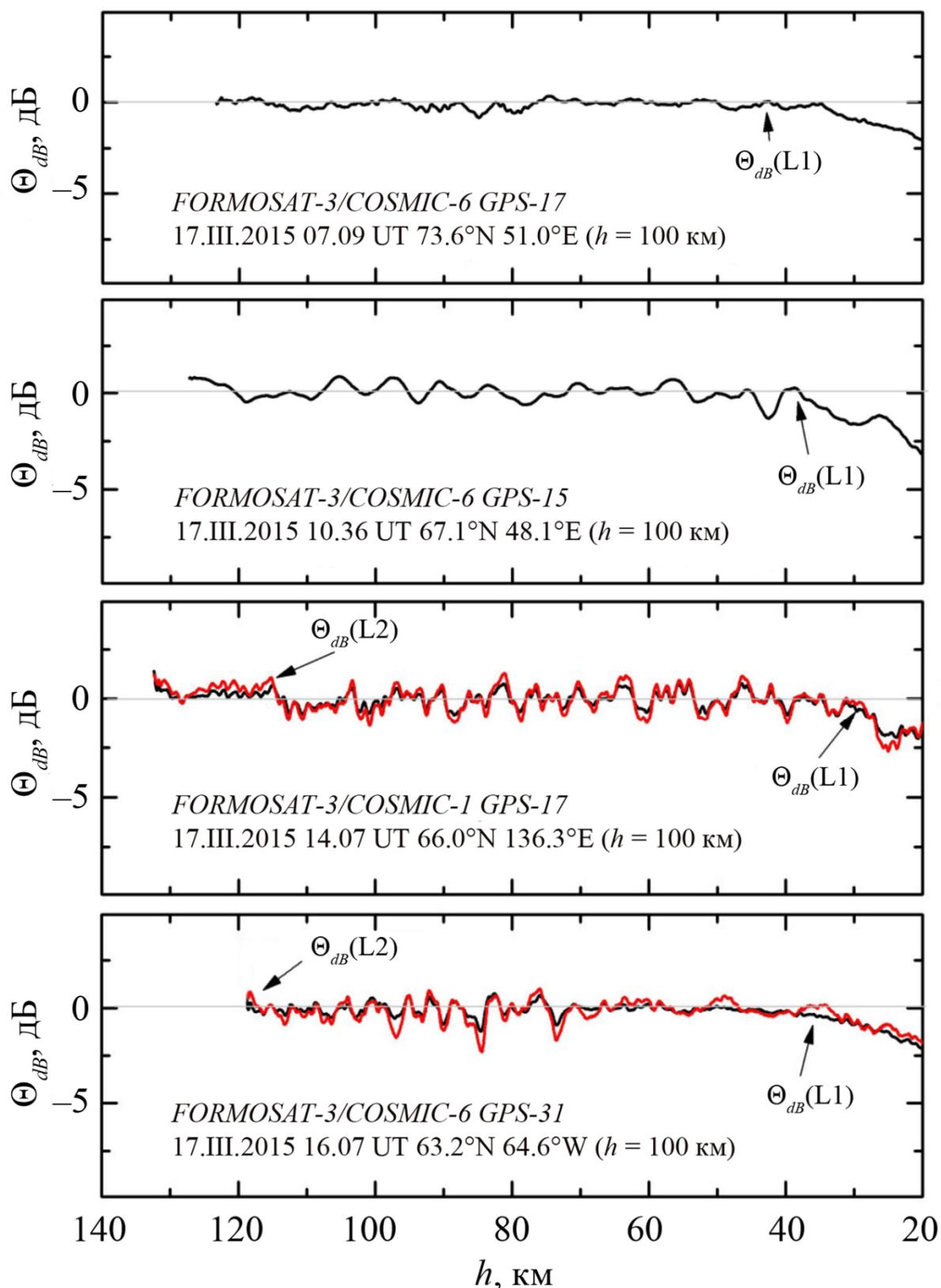


Рис. 3. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазонах L1 (черный цвет) и L2 (красный цвет) после фильтрации, полученные 17 марта 2015 года в сеансах радиозатменных измерений спутников *FORMOSAT-3/COSMIC* во время главной фазы магнитной бури

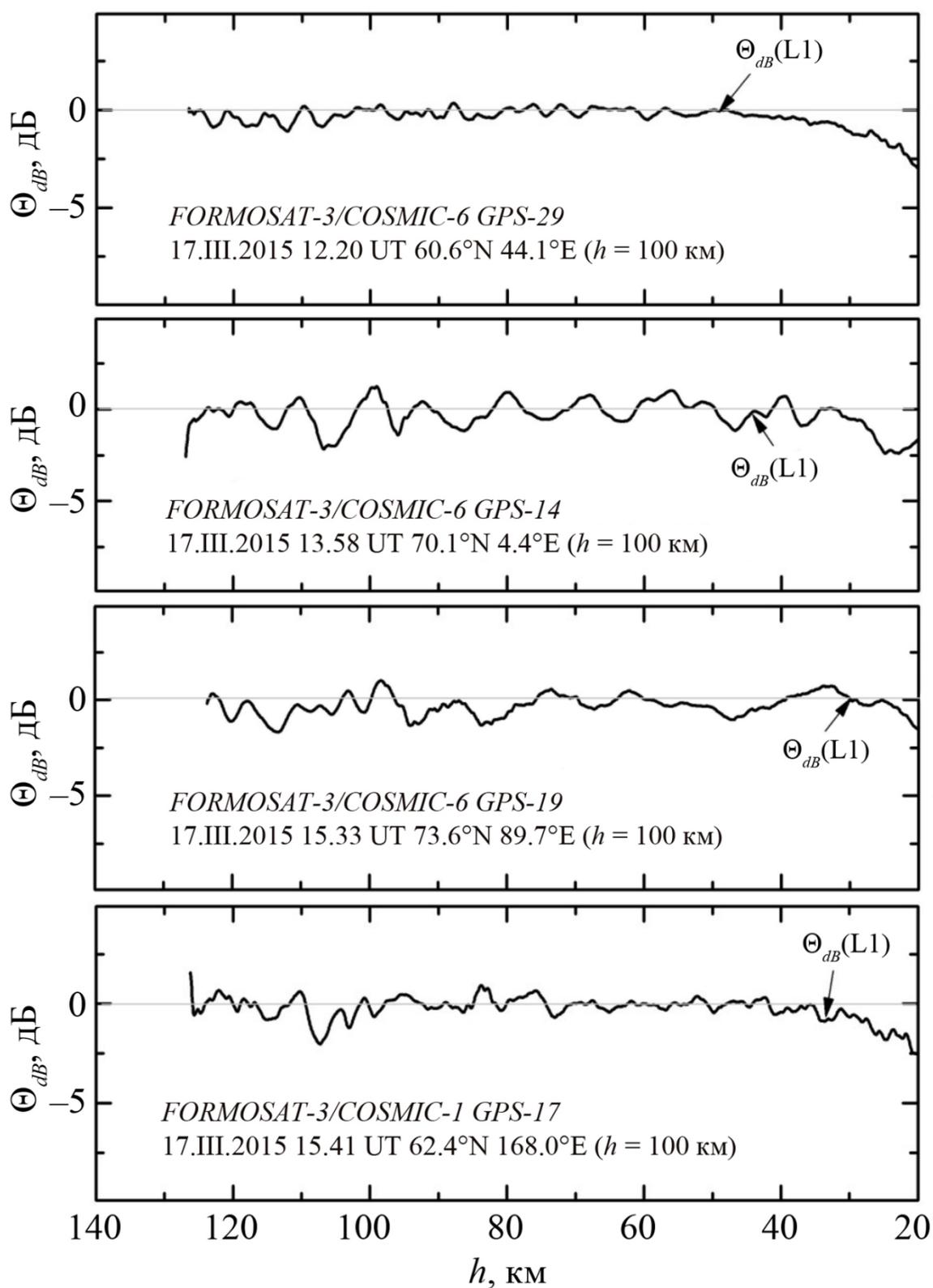


Рис. 4. Вертикальные профили нормированной мощности Θ_{dB} сигналов в диапазоне L1 после фильтрации, полученные 17 марта 2015 года в четырех сеансах радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC в высокоширотной ионосфере и атмосфере Земли во время второй ступени главной фазы бури

Ранее, при анализе радиозатменных измерений, проведенных во время бури в июне 2015 года было установлено, что абсолютная величина интегрального поглощения 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, 15]. Таким образом, мы видим, что во время аналогичной бури в марте 2015 года таких мощных ионосферных возмущений не было зафиксировано по данным анализа радиозатменных измерений. Объяснение причин этого требует дальнейших исследований.

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., 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>.
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., 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>.
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 аэрномия*. 2016. Т. 56. № 5. С. 591–605, <https://doi.org/10.7868/S0016794016040179>.
14. Reiff P.H., Daou A.G., Sazykin S.Y., Nakamura R., Hairston M.R., Coffey V., Chandler M.O., Anderson B.J., Russell C.T., Welling D., Fuselier S.A., Genestreti K.J. Multispacecraft observations and modeling of the 22/23 June 2015 geomagnetic storm // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. P. 7311–7318, <https://doi.org/10.1002/2016GL069154>.
15. 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 аэрномия*. 2021. Т. 61. № 6. С. 713–722, <https://doi.org/10.31857/S0016794021060067>.
16. Astafyeva E., Zakharenkova I., Alken P. Prompt penetration electric fields and the extreme topside ionospheric response to the 22–23 June 2015 geomagnetic storm as seen by the Swarm constellation // *Earth, Planets and Space*. 2016. V. 68(1). 152, <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0526-x>.
17. Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J.D., Doornbos E., van den Ijssel J. Ionospheric and Thermospheric Effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling // *Journal of Geophysical Research*. 2017. V. 122. P. 1–27, <https://doi.org/10.1002/2017JA024174>.
18. Astafyeva E., Zakharenkova I., Hozumi K., Alken P., Coïsson P., Hairstonand M.R., Coley W.R. Study of the equatorial and lowlatitude electrodynamic and ionospheric disturbances during the 22–23 June 2015 geomagnetic storm using ground-based and spaceborne techniques // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2018. V. 123. P. 2424–2440, <https://doi.org/10.1002/2017JA024981>.
19. 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. V. 1632. No. 1. 012008, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1632/1/012008>.
20. 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 V. 1991. No. 1. 012006, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1991/1/012006>.
21. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А. Вариации параметров радиоволн в высокоширотной ионосфере Земли на трассах спутник–спутник во время геомагнитной бури 22–23.VI.2015 // *Космические исследования*. 2021. Т. 59. №3. С. 191–195, <https://doi.org/10.31857/S0023420621030055>.