

УДК 551.51:551.501

РАДИОЗАТМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 22–23 ИЮНЯ 2015 ГОДА

© 2021 г. В. Н. Губенко^{1, *}, В. Е. Андреев^{1, **}, И. А. Кириллович^{1, ***},
Т. В. Губенко^{1, ****}, А. А. Павельев^{1, *****}, Д. В. Губенко^{1, *****}

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
г. Фрязино (Московская обл.), Россия

*e-mail: gubenko@fireras.ru, vngubenko@gmail.com

**e-mail: v.e.andreev@gmail.com

***e-mail: sabersecretmail@gmail.com

****e-mail: chif1989@gmail.com

*****e-mail: alxndr38@gmail.com

*****e-mail: mar4ello19922@gmail.com

Поступила в редакцию 27.02.2021 г.

После доработки 17.04.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Проанализированы результаты около ~100 сеансов зондирования высокоширотной (>65 °N) ионосферы Земли, проведенных 22–23 июня 2015 года на несущей GPS-частоте $f_1 = 1575.42$ МГц (диапазон $L1$, длина волны ~19.0 см) в радиозатменном эксперименте FORMOSAT-3/COSMIC. Корональные выбросы плазмы, достигшие магнитосферы Земли в этот период времени, спровоцировали сильную магнитную бурю класса $G4$ ($G4 = Kp - 4$), которая вызвала значительные флуктуации параметров радиоволн на трассах ионосферного зондирования: навигационные (GPS) спутники — низкоорбитальные (FORMOSAT-3/COSMIC) спутники. Показано, что ионосферные возмущения характеристик радиоволн обусловлены как геомагнитными условиями, так и активностью мощных рентгеновских вспышек во время измерений. Осуществлен поиск поглощения дециметровых радиоволн (длина волны ~19 см) на несущей GPS-частоте $f_1 = 1545.42$ МГц. По результатам анализа данных FORMOSAT-3/COSMIC, впервые обнаружено интегральное поглощение ~3 дБ дециметровых радиоволн на трассах зондирования в D - и E -областях высокоширотной ионосферы Земли.

DOI: 10.31857/S0016794021060067

1. ВВЕДЕНИЕ

В июне 2015 г. на Солнце имели место корональные выбросы массы (КВМ) в сторону Земли (один основной и несколько небольших выбросов). Это событие было зарегистрировано космическими аппаратами (три спутника Swarm A, B и C; аппарат ACE (*Advanced Composition Explorer*)) и ионосферными станциями [Reiff et al., 2016; Baker et al., 2016; Astafyeva et al., 2016, 2017; Mansilla, 2018; Yasyukevich et al., 2020]. Подход основного КВМ к магнитосфере Земли и его взаимодействие с ударной волной ожидалось 22 июня 2015 г. в ~18:36 UT после более слабого толчка в ~05:40 UT [Reiff et al., 2016], и данное событие сопровождалось сильными изменениями плотности протонов и скорости солнечного ветра, а также компонент (V_x , V_y , V_z) межпланетного магнитного поля (ММП) [Astafyeva et al., 2017]. Наиболее мощный выброс солнечной плазмы был зарегистрирован магнитометром аппарата ACE как скачок ММП

с ~10 до ~40 нТл. Прибор SWEPAM (*Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor*) отметил этот выброс регистрацией внезапного увеличения плотности протонов с ~20 до ~45 частиц/см³ с соответствующим повышением давления солнечного ветра до значений больше 50 нПа [Reiff et al., 2016]. Геомагнитные условия 22–23 июня 2015 г. во время бури (плотность протонов, скорость и давление солнечного ветра; компоненты V_x , V_y , V_z и угол вектора индукции ММП) подробно представлены на рис. 1 в работе [Reiff et al., 2016]. Индекс Бойля, связанный с направленной на юг составляющей ММП, послал “желтый сигнал” тревоги (Kp -индекс больше 4) 22 июня в 06:04 UT и “красной сигнал” тревоги (Kp -индекс равен 6 или больше) 22 июня в 18:34 UT как раз накануне столкновения основного выброса плазмы с ударной волной [Reiff et al., 2016, рис. 1d]. Используя данные спутников Swarm A, B и C, авторы работы [Astafyeva et al., 2016] проанализировали вариации

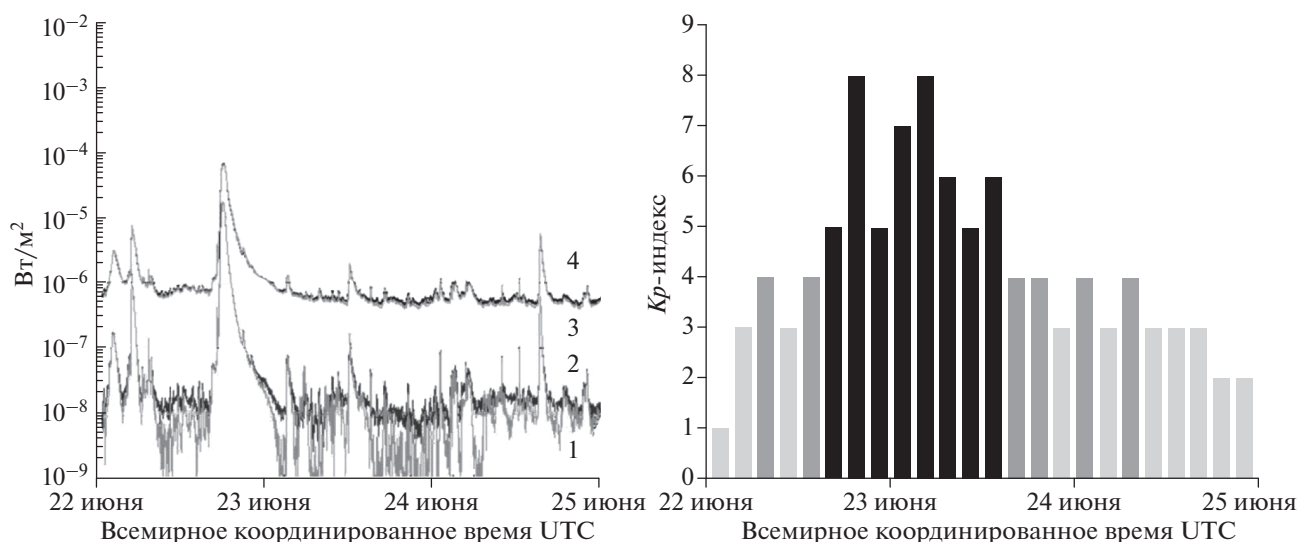


Рис. 1. Поток рентгеновского излучения (1-мин данные, левая панель), зарегистрированные 22–23 июня 2015 г. геостационарными космическими аппаратами GOES-13 и GOES-15 в диапазонах: 0.05–0.40 нм (1 – GOES-15; 2 – GOES-13) и 0.10–0.80 нм (3 – GOES-15; 4 – GOES-13). Значения планетарного Kp -индекса (3-часовые данные, правая панель) (URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>).

ции электронной плотности (N_e) и вертикального ПЭС (полного электронного содержания) для верхней части ионосферы на высотах ~ 460 км (Swarm A и C) и ~ 530 км (Swarm B) в начальной и главной фазах магнитной бури 22–23 июня 2015 г. Они обнаружили значительное дневное усиление вертикального ПЭС и N_e на всех широтах в начальной фазе бури (~ 19 – 21 UT 22 июня) и в конце главной фазы бури (~ 03 – 05 UT 23 июня).

Приход основного КВМ к магнитосфере Земли 22 июня в $\sim 18:36$ UT практически совпал по времени с мощными всплесками рентгеновского излучения ($\sim 18:00$ UT – время максимальных потоков рентгеновских лучей), которые были зарегистрированы геостационарными спутниками GOES-13 и -15 (рис. 1, левая панель). Из рис. 1 видно, что максимальные величины потоков в диапазонах 0.05–0.40 и 0.10–0.80 нм превышают их фоновые значения на ~ 3 и ~ 2 порядка, соответственно. На правой панели рис. 1 представлены значения планетарного Kp -индекса, характеризующие геомагнитные условия в период шторма 22–23 июня 2015 года, которые были взяты из архива данных о космической погоде (URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>).

Радиозондирование атмосферы и ионосферы Земли с помощью линий связи спутник–спутник, когда используются высокоорбитальные (GPS/ГЛОНАСС) и низкоорбитальные спутники, ранее проводилось в различных сочетаниях, например: GPS – MICROLAB, GPS – GRACE, GPS/ГЛОНАСС – METOP, GPS – CHAMP,

GPS – FORMOSAT-3/COSMIC и другие. Подробный анализ полученных экспериментальных результатов проведен в работах [Яковлев и др., 2014; Горбунов, 2017; Yakovlev et al., 2019]. Для глобального исследования атмосферы и ионосферы Земли в радиозатменных экспериментах миссии FORMOSAT-3/COSMIC используются сигналы навигационных спутников GPS, расположенных на орбитах с высотой ~ 20.2 тыс. км над поверхностью Земли. Приемники, которые установлены на шести малых спутниках FORMOSAT-3/COSMIC (высота их орбит ~ 800 км), регистрируют эйконал (фазовый путь) и мощность радиоволн на двух несущих GPS-частотах $f_1 = 1575.42$ МГц (диапазон $L1$, длина волны ~ 19.0 см) и $f_2 = 1227.6$ МГц (диапазон $L2$, длина волны ~ 24.4 см) как функции времени. Вертикальная скорость перигея радиолуча при заходах спутников FORMOSAT-3/COSMIC за планету равна ~ 2 км/с. Эта величина во много раз превышает характерные скорости движения слоев в ионосфере и атмосфере Земли. Поскольку типичная продолжительность радиозатменного сеанса составляет около 2 мин, то спутниковая радиоголограмма содержит практически мгновенное изображение состояния окружающей среды в исследуемой области. Используя известные баллистические данные спутников и анализируя изменения эйконала (или фазы) сигнала можно определить прицельный параметр лучевой траектории и угол рефракции радиолуча. Далее, разными методами, основанными на применении преобразования Абея, определяются вертикальные профили электронной плотности в

ионосфере и показателя преломления в нейтральной атмосфере Земли [Liou et al., 2007]. Этот метод является традиционным методом восстановления характеристик зондируемой среды, который использует приближение геометрической оптики (ГО) без учета дифракционных эффектов. В геометрической оптике вертикальное разрешение определяется тем минимальным расстоянием по вертикали, на котором Френелевские объемы двух физических лучей не пересекаются друг с другом и они становятся различимыми. Таким образом, вертикальное разрешение ГО-метода соответствует размеру (диаметру $d_f = 2r_f$) первой зоны Френеля $d_f = 2r_f = 2(\lambda D)^{1/2} \sim 1.5$ км, где $\lambda \sim 20$ см — длина волны зондирующего сигнала, $D \sim 3090$ км — расстояние от спутника FORMOSAT-3/COSMIC до атмосферного лимба планеты. При вычислении величины D мы учли, что средний радиус Земли равен ~ 6370 км, а высота перигея радиолуча в ионосфере составляет ~ 100 км.

Исследования мелкомасштабных структур в высоких широтах ионосферы Земли представляют большой практический интерес для радиосвязи и навигации, а также они важны для анализа динамики космической погоды. Известно, что спорадические E -слои являются очень тонкими и плотными слоями повышенной ионизации в ионосфере Земли на высотах от ~ 90 до ~ 120 км. Теория формирования спорадических E -слоев в средних широтах с помощью сдвига ветра подтверждена многими исследованиями. В высоких широтах планеты механизм ветрового сдвига не столь эффективен как в средних широтах из-за того, что здесь магнитное поле направлено почти вертикально к местному горизонту. Поэтому, горизонтальная структура плазмы в E - и D -областях авроры определяется пространственным распределением солнечных источников высыпания частиц [Gubenko et al., 2018].

Мы использовали радиозатменные измерения для изучения спорадических E -слоев в ионосфере Земли. Параметры ионосферных слоев определялись путем анализа вертикальных профилей вариаций эйконала и интенсивности принимаемого сигнала. Это позволило оценить пространственное смещение спорадических E -структур относительно перигея лучевой траектории, определить углы наклона слоев относительно местного горизонта и найти фактические высоты слоев [Pavelyev et al., 2012, 2015]. Используя наклонные спорадически E -слои в качестве детектора, мы разработали новый метод восстановления характеристик мелкомасштабных внутренних волн в ионосфере планеты [Gubenko et al., 2018; Gubenko and Kirillovich, 2019, 2020]. Этот метод основан на том, что внутренняя волна, распространяющаяся через изначально горизонтальный спорадиче-

ский E -слой, приводит к повороту его плоскости ионизации параллельно фазовому фронту волны. Разработанный метод позволяет изучать взаимосвязи между внутренними волнами и спорадическими E -структурами в ионосфере, а также существенно расширяет возможности традиционного радиозатменного мониторинга атмосферы и ионосферы Земли [Gubenko et al., 2018; Gubenko and Kirillovich, 2019, 2020].

Изучение эффектов поглощения радиоволн в ионосфере Земли очень важно для обеспечения бесперебойной работы систем радиосвязи и навигации. Возможность определения поглощения в атмосфере и ионосфере планеты обсуждалась ранее в публикациях [Liou et al., 2007; Pavelyev et al., 2009, 2015; Wickert et al., 2004]. Используя анализ высотных вариаций амплитуды и фазы радиозатменного сигнала (диапазон $L1$, длина волны ~ 19.0 см), авторы работы [Pavelyev et al., 2015] обнаружили интегральное поглощение от ~ 1 до ~ 4 дБ дециметровых радиоволн ниже уровня ~ 15 км в земной тропосфере. Однако, в настоящее время радиозатменные данные о поглощении дециметровых радиоволн на несущих GPS-частотах (длины волн ~ 19.0 и ~ 24.4 см) в ионосфере Земли отсутствуют.

В данной работе, мы анализируем радиозатменные измерения эйконала и мощности сигналов, принимаемых спутниками FORMOSAT-3/COSMIC, с целью поиска поглощения дециметровых радиоволн (диапазон $L1$, длина волны ~ 19 см) в высокоширотной ионосфере Земли во время магнитной бури в июне 2015 года.

2. ОТБОР СЕАНСОВ РАДИОЗАТМЕННОЙ СПУТНИКОВОЙ МИССИИ FORMOSAT-3/COSMIC И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В данном исследовании, в качестве исходной информации для анализа, используются результаты обработки (Level 1b и 2) радиозатменных измерений миссии FORMOSAT-3/COSMIC, полученные в тайваньском центре обработки данных (<http://tacc.cwb.gov.tw>). Для решения поставленной задачи, из большой базы данных FORMOSAT-3/COSMIC были отобраны ~ 100 сеансов радиозатменных измерений, проведенных в период с 22 по 23 июня 2015 года. Отобранные сеансы измерений были выполнены на широтах от $\sim 65^\circ$ N до $\sim 88^\circ$ N и охватывали интервал высот от ~ 50 до ~ 110 км. Каждый из анализируемых сеансов содержал зависимости эйконала и мощности сигнала (диапазон $L1$) от высоты перигея луча (Level 1b), а также имел вертикальный профиль электронной плотности (Level 2). Точность восстановления электронной плотности составляет $\sim 10^4$ см $^{-3}$,

а ее значения даются с шагом по вертикали 2.5 км (оценка вертикального разрешения). Частота дискретизации измерений 50 Гц соответствует временному разрешению 0.02 с для данных об эйконе и мощности сигнала. Обработка этих измерений включала сглаживание экспериментальных данных по пятнадцати точкам методом скользящего среднего. Принимая во внимание частоту дискретизации 50 Гц и вертикальную скорость луча ~2 км/с, находим, что интервал сглаживания данных составляет ~0.6 км. Поскольку эта величина существенно меньше вертикального разрешения (~1.5 км) ГО-метода, то данные после их сглаживания сохраняют всю информацию о мелкомасштабной структуре по вертикали в ионосфере Земли.

Основной целью работы является изучение возмущений в *E*- и *D*-областях высокоширотной ионосферы Земли во время сильной геомагнитной бури путем использования радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC в период с 22 по 23 июня 2015 года. С учетом влияния на ионосферу геомагнитных условий и потоков рентгеновского излучения, указанный период можно разделить на три временных интервала. Первый интервал, начинающийся 22 июня в 00:00 UT и заканчивающийся в 16:30 UT того же дня, представляет собой спокойный геомагнитный период, окончание которого предшествует началу (~16:30 UT, рис. 1) мощных всплесков рентгеновских лучей и приходу (~18:36 UT) основного КВМ к магнитосфере Земли. Этот спокойный период характеризуется небольшими фоновыми значениями потоков рентгеновского излучения и низкой геомагнитной активностью с минимальными изменениями характеристик ММП [Reiff et al., 2016]. Второй временной интервал (начало – 22 июня в 16:30 UT, конец – 23 июня в 02:00 UT) является периодом мощных ионосферных возмущений, вызванных как главной фазой магнитной бури, так и мощными всплесками потоков рентгеновского излучения. Третий временной интервал (с 02:00 UT по 24:00 UT 23 июня) характеризуется незначительными флуктуациями эйконала и мощности сигнала в сеансах зондирования ионосферы Земли. Начало этого интервала совпадает по времени с моментом окончания мощных рентгеновских всплесков (рис. 1, левая панель). Здесь мы наблюдаем резкое уменьшение плотности протонов до ~5–10 см⁻³ с соответствующим понижением давления до ~5–10 нПа [Reiff et al., 2016; Astafyeva et al., 2017]. Начиная с этого момента времени, компонента *B_z* ММП резко уменьшается до значения –27 нТл и остается отрицательной вплоть до ~05:30 UT 23 июня [Astafyeva et al., 2017]. Проведенный анализ показывает, что третий временной интервал является спокой-

ным периодом без интенсивных флуктуаций радиоволн при ионосферном зондировании, хотя значения планетарного *K_p*-индекса в этот период были заметными (рис. 1, правая панель). Следует отметить, что значительная часть сеансов изобранных для анализа была проведена в пределах первого и третьего временных интервалов. Для этих сеансов измерений, возмущения вертикальных профилей нормированной мощности сигнала на трассах зондирования в *E*- и *D*-областях в ионосфере Земли являются незначительными и их типичные примеры будут рассмотрены ниже на рис. 2.

В работах [Яковлев и др., 2014; Gubenko et al., 2018; Gubenko and Kirillovich, 2019] показано, что существует связь между мощностью (P_L) принимаемого на низкоорбитальном спутнике радиозатменного сигнала, рефракционным ослаблением радиоволн (X) и ускорением (a_ψ) эйконала (фазового пути ψ):

$$1 - X(t) = ma_\psi = md^2\psi/dt^2, \quad (1)$$

$$m = r_\psi / (dp_0/dt)^2, \quad r_\psi = L_L L_G / L_0,$$

где p_0 – прицельный параметр радиолуча, L_L и L_G – расстояния от приемника (L) и передатчика (G) до точки перигея луча соответственно, L_0 – расстояние от передатчика до приемника по прямой [Яковлев и др., 2014]. На рисунке 2 представлены типичные высотные профили нормированной мощности сигнала (P), измеренные спутником FORMOSAT-3/COSMIC-6 до главной фазы геомагнитной бури 22 июня 2015 г., и профили рефракционного ослабления (X), восстановленные из данных об эйконе сигнала с использованием выражения (1). Анализируемые сеансы радиозатменных измерений в ионосфере Земли были выполнены 22 июня 2015 г. в 12:19 UT (верхняя панель) и 14:08 UT (нижняя панель) в спокойный геомагнитный период (первый временной интервал), накануне мощных всплесков рентгеновских лучей и перед прибытием основного КВМ к магнитосфере планеты. Кривые, показанные на рис. 2, были получены путем сглаживания экспериментальных данных по пятнадцати точкам с использованием метода скользящего среднего. Как было рассмотрено выше, интервал сглаживания данных равен ~0.6 км, хотя вертикальное разрешение ГО-метода составляет ~1.5 км. Для нахождения безразмерной величины P , мощность P_L принято на спутнике FORMOSAT-3/COSMIC-6 сигнала нормировалась на среднее значение мощности (P_0) радиоволн на высотах более 300 км, т.е. $P = P_L/P_0$. Номера низкоорбитальных (FORMOSAT-3/COSMIC) и навигационных (GPS) спутников, дата и время проведения сеанса измерений, а также координаты (широта и долгота) зон-

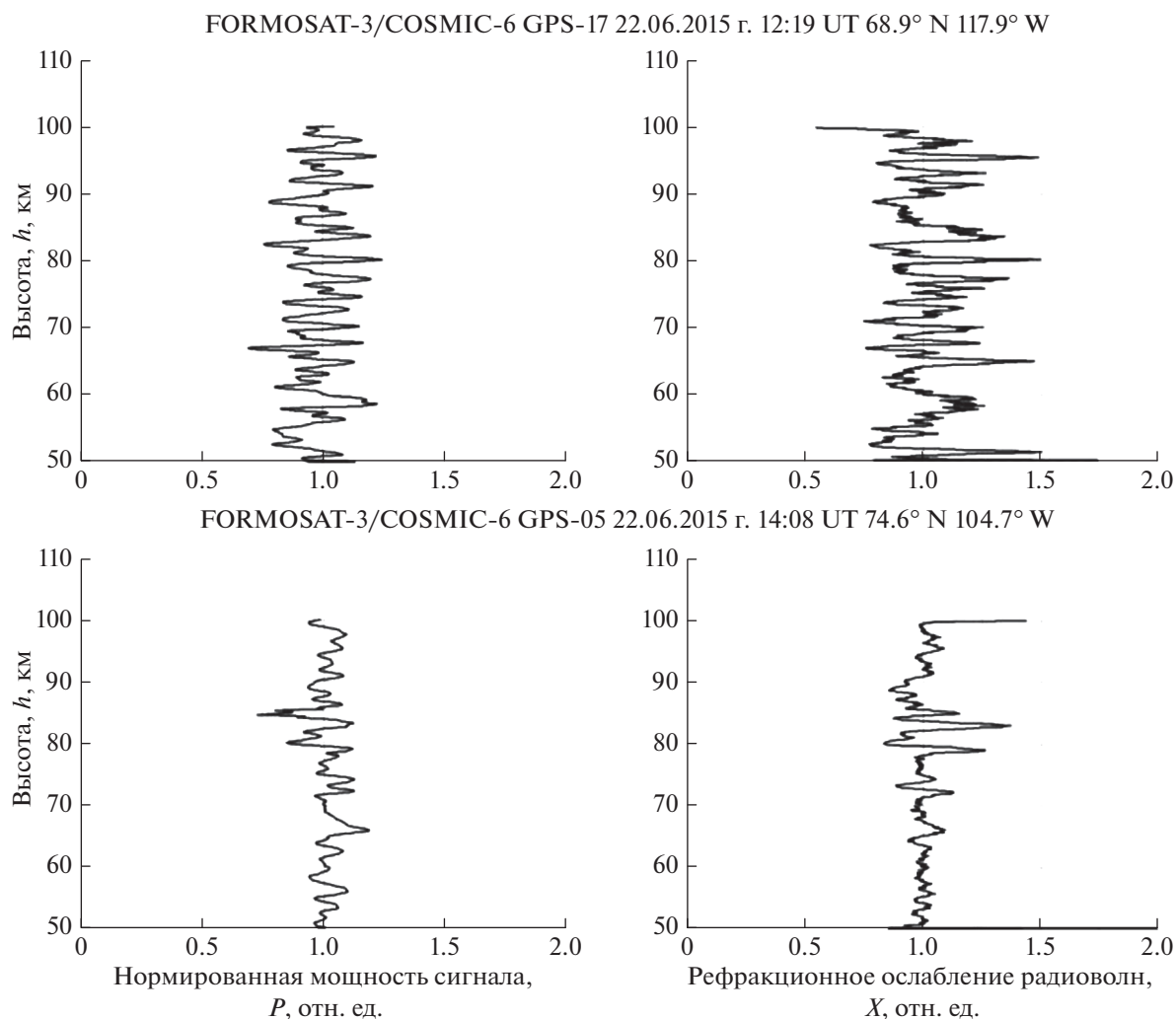


Рис. 2. Высотные профили нормированной мощности сигнала (P), измеренные спутником FORMOSAT-3/COSMIC-6 накануне главной фазы магнитной бури 22 июня 2015 г., и профили рефракционного ослабления (X), восстановленные из данных об эйконе.

дируемой области показаны над каждой частью рис. 2. Для оценки уровня флуктуаций в анализируемых профилях мощности $P(h)$, мы использовали величину S4-индекса, которая определяется как стандартное отклонение, нормированное на среднюю мощность сигнала [Yasyukevich et al., 2020]. Было найдено, что значения S4-индекса для анализируемых на рис. 2 профилей $P(h)$ составляют ~18% (верхняя панель) и ~10% (нижняя панель). Анализ показал, что профили мощности $P(h)$ и рефракционного ослабления $X(h)$ для сеансов, относящихся к первому интервалу (спокойный геомагнитный период), демонстрируют слабые возмущения в E - и D -областях (50–100 км) высокоширотной ионосферы Земли. Так, значения S4-индекса не превышали ~20% для всех профилей мощности $P(h)$, которые получены из сеансов радиозатменных измерений, выполненных внутри первого временного интервала.

По результатам анализа радиозатменных данных трудно определить начало магнитной бури. Следует отметить, что флуктуации мощности $P(h)$ и рефракционного ослабления $X(h)$ радиозатменного сигнала сильно увеличиваются с момента начала мощных всплесков (~16:30 UT 22 июня, рис. 1) рентгеновского излучения в ионосфере Земли. Известно, что мощный и резкий всплеск потока рентгеновских лучей может быть меткой времени для исследования солнечных вспышек [Носке, 2008]. Спутники GOES-13 и GOES-15, расположенные на геостационарных орбитах, непрерывно измеряют солнечные потоки рентгеновского излучения в двух диапазонах длин волн: первый диапазон — от 0.05 до 0.40 нм и второй — от 0.10 до 0.80 нм. Из рисунка 1 можно видеть, что резкое увеличение потоков рентгеновского излучения (в ~1000 раз для диапазона от 0.05 до 0.40 нм,

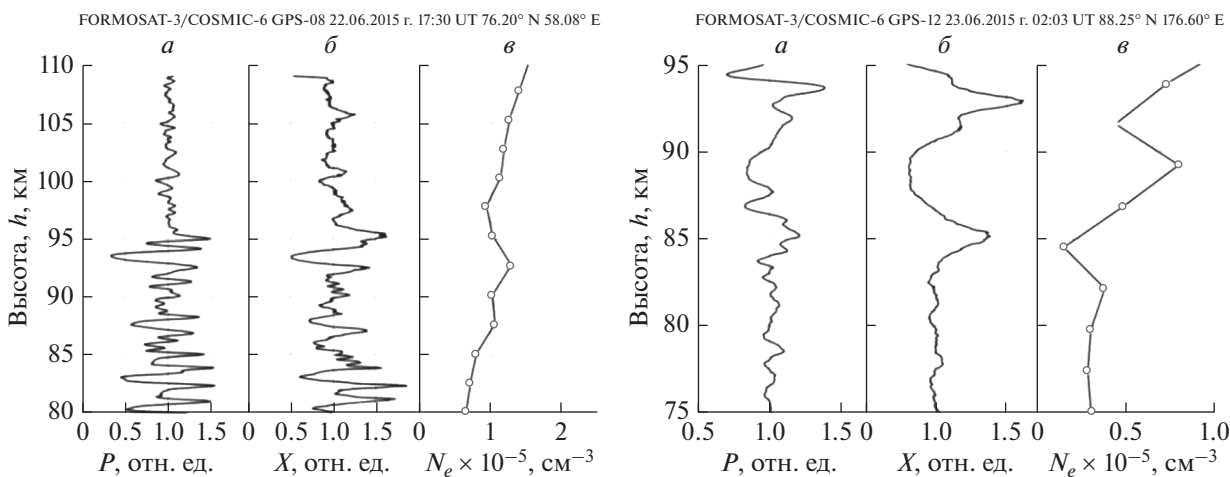


Рис. 3. Высотные профили нормированной мощности – $P(h)$, рефракционного ослабления – $X(h)$ и плотности электронов – $N_e(h)$, полученные из радиозатменных данных спутника FORMOSAT-3/COSMIC-6 в 17:30 UT 22 июня 2015 года в ионосферной области с координатами 76.2° N; 58.08° E (слева), и в 02:03 UT 23 июня 2015 года в районе с координатами 88.25° N; 176.6° E (справа).

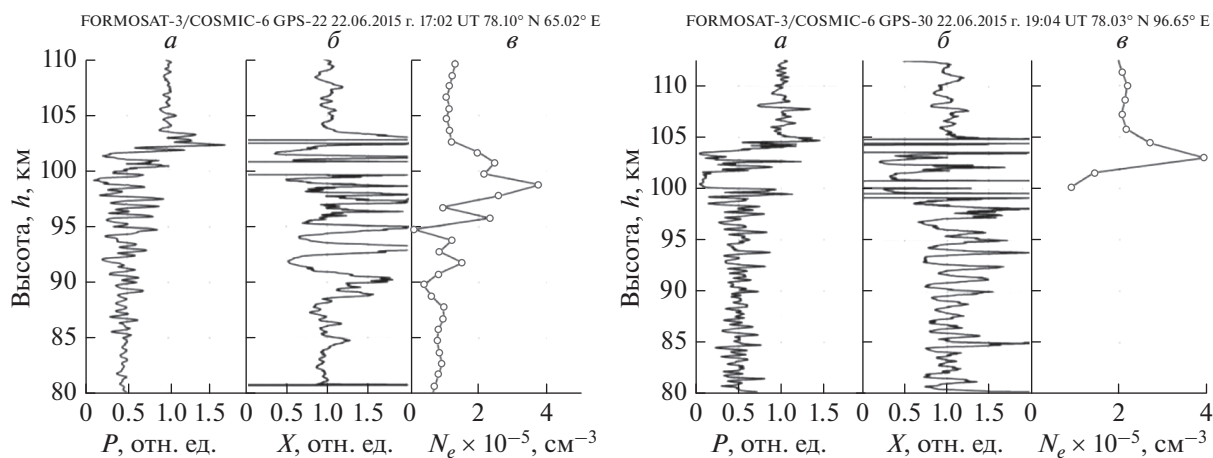


Рис. 4. Высотные профили нормированной мощности – $P(h)$, рефракционного ослабления – $X(h)$ и плотности электронов – $N_e(h)$, полученные из радиозатменных измерений спутника FORMOSAT-3/COSMIC-6 в 17:02 UT 22 июня 2015 г. в ионосферном районе с координатами 78.1° N; 65.02° E (слева), и в 19:14 UT 22 июня 2015 г. в районе с координатами 78.03° N; 96.65° E (справа).

и в ~ 100 раз для диапазона от 0.10 до 0.80 нм) происходит 22 июня в течение короткого промежутка времени 16:30–18:00 UT. Момент рентгеновского всплеска $\sim 18:00$ UT 22 июня четко определяется по времени максимума потока рентгеновского излучения. Анализ данных показывает, что электронная плотность N_e в ионосфере Земли увеличивается до значений $\sim 10^5$ см^{-3} и больше в тех радиозатменных сеансах, в которых время проведения измерений практически совпадает со временем наиболее мощного всплеска рентгеновского излучения ($\sim 18:00$ UT, рис. 1, 3 и 4).

Два вертикальных профиля $P(h)$ и $X(h)$, показанных на рис. 3, были получены из радиозатменных измерений, проведенных 22 июня в 17:30 UT (слева, второй временной интервал) и 23 июня в 02:03 UT (справа, третий интервал) в высокоширотной ионосфере Земли. Измерения, относящиеся к профилям в левой части рис. 3, были проведены спустя ~ 1 час после начала ($\sim 16:30$ UT) мощных всплесков рентгеновских лучей и за ~ 1 ч до прихода ($\sim 18:36$ UT) основного КВМ к магнитосфере планеты. Эти измерения подвержены влиянию только рентгеновских всплесков, а влияние на них геомагнитных условий главной фазы

бури отсутствует. Найдено, что значение S4-индекса для анализируемых вариаций $P(h)$, показанных на рис. 3 (слева, панель *a*), составляет ~28% на высотах (~80–100 км) зоны перехода из E- в D-область высокоширотной ионосферы Земли.

Изолированный спорадический E-слой с вертикальным размером ~2.0 км, наблюдаемый на высоте перигея радиолуча ~93.7 км (рис. 3, слева, панель *a*), имеет типичную U-образную форму, о которой сообщалось ранее в работе [Zeng and Sokolovskiy, 2010], с осцилляциями (эффекты волновой оптики) выше и ниже области дефокусировки, вызванными интерференцией прямого и преломленного лучей на границах слоя. Мы видим, что результаты восстановления ГО-методом рефракционного ослабления $X(h)$ (рис. 3, слева, панель *b*) хорошо соответствуют значениям мощности $P(h)$, но без осцилляций на границах слоя. Данные компьютерного моделирования [Zeng and Sokolovskiy, 2010] и радиозатменных исследований [Gubenko et al., 2018; Gubenko and Kirillovich, 2019, 2020; Pavelyev et al., 2012, 2015] показывают, что высотное положение максимума электронной плотности в ионосферном слое практически совпадает с положением минимума рефракционного ослабления зондирующего сигнала. Во время радиозатменного зондирования ионосферы Земли волновой вектор параллелен плоскости ионизации спорадического E-слоя. Тогда распространение радиоволн через центральную его часть (максимум электронной плотности) приводит к сильной дефокусировке лучей, а прохождение волн через края слоя – к их фокусировке. Очевидно, что вертикальное разрешение (~2.5 км) профиля электронной плотности (рис. 3, слева, панель *b*) недостаточно для описания структуры тонкого слоя в ионосфере, поскольку высота минимума рефракционного ослабления (~93.7 км) не совпадает с высотой максимума электронной плотности (~92.5 км) и отличается от нее на величину ~1.2 км.

Два других профиля $P(h)$ и $X(h)$ на рис. 3 (справа, панели *a* и *b*), полученные из измерений на границе между вторым и третьим временными интервалами, демонстрируют очень малые возмущения на трассах зондирования ионосферы, что указывает на ее спокойное состояние и отсутствие какого-либо влияния геомагнитных условий и всплесков рентгеновских лучей. Найдено, что значение S4-индекса для вариаций мощности $P(h)$ на высотах ~75–95 км (рис. 3, справа, панель *a*) составляет менее ~10%. Из данных на рис. 3 видно, что на высотах больше 83 км в ионосфере Земли наблюдается слоистая структура с вертикальным размером ~8 км. Этот изолированный ионосферный слой имеет типичную U-образную форму, причем высота максимума электронной

плотности (~89.0 км) равна высоте минимума рефракционного ослабления радиоволн, что подтверждает результаты ранее проведенных исследований [Gubenko et al., 2018; Gubenko and Kirillovich, 2019, 2020; Pavelyev et al., 2012, 2015].

Вертикальные профили $P(h)$ и $X(h)$ на рис. 4 были получены из радиозатменных измерений, проведенных 22 июня в 17:02 UT (слева, второй интервал) и 19:14 UT (справа, второй интервал) в высокоширотной ионосфере Земли. Измерения, относящиеся к профилям в левой части рис. 4, были проведены спустя ~0.5 ч после начала мощных всплесков рентгеновских лучей и за ~1.5 ч до прихода основного KBM к магнитосфере планеты. Эти измерения могут быть подвержены влиянию всплесков рентгеновского излучения, а воздействие на них геомагнитных условий главной фазы бури отсутствует. Отметим, что два сеанса радиозатменных измерений, представленных на рисунках 3 (слева) и 4 (слева), практически совмещены во времени и в пространстве. Разделение во времени и в пространстве между сеансами измерений было небольшим и составляло менее ~30 мин и около ~200 км, соответственно. Прием радиоволн в сеансах измерений проводился на одном и том же низкоорбитальном спутнике FORMOSAT-3/COSMIC-6, а передатчики сигналов находились на разных навигационных спутниках GPS-08 (рис. 3) и GPS-22 (рис. 4). Расчет показывает, что в этих двух сеансах трассы зондирования в ионосфере Земли были расположены достаточно близко друг к другу. Так угол расхождения трасс в пункте приема сигналов на спутнике FORMOSAT-3/COSMIC-6 составляет всего лишь ~3.73°, что приводит к расхождению трасс на ~200 км у лимба планеты и на ~1900 км вблизи орбит навигационных спутников GPS-08 и GPS-22. Тем не менее, наблюдаются драматические отличия в поведении профилей $P(h)$ и $X(h)$ для рассматриваемых здесь сеансов измерений. Уровень флуктуаций на высотах от ~80 до ~100 км для профиля $P(h)$ на рис. 4 существенно выше, чем для его аналога на рис. 3. Отличительной особенностью зондирования района с координатами 78.1° N и 65.02° E является то, что средняя мощность сигнала падает до ~0.5 (–3 дБ) на высоте ~90 км и с уменьшением высоты остается на том же уровне (рис. 4). Вертикальные профили электронной плотности и ее максимальные значения ~1.3 × 10⁵ см⁻³ (рис. 3, слева, панель *b*) и ~3.9 × 10⁵ см⁻³ (рис. 4, слева, панель *b*) также сильно различаются для указанных измерений.

Мы полагаем, что возможной причиной для таких существенных различий является локальный характер мощных потоков рентгеновских лучей во время измерений. Это может приводить: (*a*) – к избыточной ионизации в отдельных райо-

нах ионосферы Земли и появлению горизонтальных градиентов; (б) – к невыполнению условия локальной сферической симметрии среды при ее зондировании; (в) – к многолучевости и нарушению условий геометрической оптики. Аргументом в пользу вышеприведенного пункта (а) является сильное различие вертикальных профилей электронной плотности для указанных сеансов радиозатменных измерений. На нарушение условий геометрической оптики и многолучевость может указывать очевидное несоответствие между измеренным профилем мощности $P(h)$ и профилем рефракционного ослабления $X(h)$, восстановленным ГО-методом из данных об эйконале (рис. 4, слева, панели а и б).

Измерения, относящиеся к радиозатменным профилям в правой части рис. 4, выполненные 22 июня в 19:14 UT (второй интервал), демонстрируют сильные ионосферные возмущения, обусловленные влиянием, как главной фазы магнитной бури, так и мощных потоков рентгеновского излучения. Как видно из представленных данных, при радиозондировании данного района (78.03° N; 96.65° E) полярной шапки Земли (луч опускается сверху вниз), сначала мощность дециметровых радиоволн понижается до уровня ~0.1 (-10 дБ) на высотах от 101.5 до 90.3 км, затем увеличивается до ~0.5 (-3 дБ), и далее продолжает оставаться на том же уровне при уменьшении высоты. Анализ двух профилей рефракционного ослабления $X(h)$ на рис. 4 (панели б) показывает, что среднее значение $\langle X \rangle$ равно $\langle X \rangle = 1.0$ (0 дБ). Это значит, что регулярное рефракционное ослабление радиоволн в сеансах измерений на высотах больше 50 км практически отсутствует. Поэтому мы полагаем, что наблюдаемое на рис. 4 ослабление средней мощности $\langle P(h) \rangle$ сигнала может быть связано с поглощением радиоволн в нижней ионосфере Земли во время геомагнитной бури.

В работе [Горбунов, 2017] упоминалось о небольшом атмосферном поглощении (до -1 дБ) радиоволн, которое можно заметить на GPS-частотах по данным радиозатменных измерений. Поглощение радиоволн в полярной шапке, вызванное частицами солнечного ветра (протонами с энергией в десятки МэВ), и авроральное поглощение, связанное с высыпанием электронов с энергией 20–100 кэВ, являются характерной особенностью высокоширотной ионосферы Земли, часто наблюдаемой во время геомагнитных бурь. В период направленных на Землю солнечных вспышек, которые проявляются в виде резкого усиления потоков рентгеновского излучения, ионосферные возмущения обнаруживают себя повышенным уровнем ионизации в D- и E-областях [Брюнелли и Намгаладзе, 1988].

Поглощение сигналов диапазона L1 было надежно обнаружено нами в двух сеансах (рис. 4) радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC в E- и D-областях высокоширотной ионосферы Земли. В одном из них интегральное ослабление мощности радиоволн достигало величины -10 дБ, а затем возвращалось на уровень -3 дБ (справа, панель а). В другом сеансе измерений оно было равно -3 дБ (слева, панель а). Используя вертикальные профили интегрального поглощения сигнала и решая обратную задачу, можно определить высотные профили коэффициента поглощения (Z) радиоволн и оценить эффективное число столкновений (ν) электрона в единицу времени в нижней ионосфере Земли [Колосов и др., 1969].

Поглощение радиоволн в ионосфере Земли обусловлено столкновениями электронов с ионами и нейтральными молекулами. По этой причине часть энергии, сообщаемая электромагнитным полем электронам, расходуется на увеличении энергии хаотического движения частиц плазмы и приводит к ее нагреву. При каждом ударе электрон в среднем передает иону или молекуле импульс $m\mathbf{dr}/dt$, где $d\mathbf{r}/dt$ – упорядоченная скорость электронов под действием поля. Если ν – эффективное число соударений электрона в секунду, то за единицу времени его импульс изменяется на величину $m\nu d\mathbf{r}/dt$. Изменение импульса электрона за счет соударений эквивалентно действию некоторой силы трения.

Полагая, что частота радиоволн $\omega = 2\pi f$ удовлетворяет неравенству $\omega^2 \gg \nu^2$, в работе [Колосов и др., 1969] была получена следующая оценка коэффициента поглощения Z радиоволн:

$$Z = \frac{e^2 N_e \nu}{\pi m c f^2} = 2.70 \times 10^{-3} \frac{N_e \nu}{f^2}, \quad [Z] = \text{см}^{-1}, \quad (2)$$

где m – масса электрона, e – заряд электрона, c – скорость света, величина N_e выражена в см^{-3} , ν – в с^{-1} , f – в Гц. Если поток радиоволн, при их распространении через ионосферу, испытывает поглощение, то нормированная мощность P сигнала в пункте приема будет равна [Колосов и др., 1969]:

$$P = \exp \left[- \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} Z ds \right] = \exp \left[\frac{-2.70 \times 10^{-3}}{f^2} \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} N_e \nu ds \right]. \quad (3)$$

В этом выражении интегрирование от h_{\min} до h_{\max} производится вдоль траектории зондирующего радиолуча. Как видно из формулы (2), для оценки

параметра ν нужно знать вертикальный профиль коэффициента поглощения и распределение электронной концентрации по высоте. Решение обратной задачи о поглощении мощности сигнала с помощью выражения (3) позволяет определить вертикальный профиль коэффициента поглощения радиоволн $Z(h)$. Далее, используя имеющиеся профили $N_e(h)$ (рис. 4, панели ν) и полученные из решения обратной задачи зависимости $Z(h)$, с помощью формулы (2) легко найти вертикальный профиль параметра ν в нижней ионосфере Земли.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены обработка и анализ ~100 сеансов радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC, выполненных во время магнитной бури 22–23 июня 2015 года в высокоширотной ионосфере Земли. Показано, что ионосферные возмущения характеристик радиоволн обусловлены как геомагнитными условиями, так и активностью мощных рентгеновских вспышек во время измерений. Для сеансов радиозатменных измерений, проведенных после начала (16:30 UT 22 июня) мощных всплесков рентгеновского излучения или во время главной фазы геомагнитной бури, характерны повышенные уровни ионизации в D - и E -областях ионосферы планеты. Здесь, максимальные величины электронной плотности превышают $\sim 1.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ и могут достигать значений $\sim 3.9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (рис. 3 и 4).

Осуществлен поиск поглощения дециметровых радиоволн (длина волны ~ 19 см) на несущей GPS-частоте $f_1 = 1545.42$ МГц. По результатам анализа данных FORMOSAT-3/COSMIC, впервые обнаружено поглощение радиоволн дециметрового диапазона в D - и E -областях высокоширотной ионосферы Земли. Установлено, что абсолютная величина интегрального поглощения на трассах радиозатменного зондирования составляет ~ 3 дБ в интервале высот ~ 50 – 90 км, а в некоторых случаях достигает ~ 10 дБ на уровнях от ~ 90 до ~ 95 км. Практическая значимость изучения эффектов поглощения радиоволн в D - и E -областях ионосферы связана с обеспечением бесперебойной работы систем космической радиосвязи и навигации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания и поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 19-02-00083 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 518 с. 1988.

– Горбунов М.Е. Радиозатменное зондирование атмосферы. Гл. 4 в книге: Динамика волновых и обменных процессов в атмосфере. М.: ГЕОС, С. 407–457. 2017.

– Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 155 с. 1969.

– Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: ЛИБРОКОМ, 208 с. 2014.

– 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 Space. V. 68. P. 1309. 2016.

<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0526-x>

– 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 // J. Geophys. Res. V. 122. P. 1–27. 2017.

<https://doi.org/10.1002/2017JA024174>

– Baker D.N., Jaynes A.N., Turner D.L. et al. A telescopic and microscopic examination of acceleration in the June 2015 geomagnetic storm: Magnetospheric Multiscale and Van Allen Probes study of substorm particle injection // Geophys. Res. Lett. V. 43. P. 6051–6059. 2016.

<https://doi.org/10.1002/2016GL069643>

– 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 // Adv. Space Res. V. 61. P. 1702–1716. 2018.

<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. V. 5. P. 98–108. 2019.

<https://doi.org/10.12737/stp-53201912>

– Gubenko V.N., Kirillovich I.A. Association of inclined sporadic E-layers and small-scale atmospheric waves in Earth's ionosphere // Cosmic Res. V. 58. P. 139–149. 2020.

<https://doi.org/10.1134/S0010952520030028>

– Hocke K. Oscillations of global mean TEC // J. Geophys. Res. V. 113. A04302. 2008.

<https://doi.org/10.1029/2007JA012798>

– Liou Y.-A., Pavelyev A.G., Liu S.-F., Pavelyev A.A., Yen N., Huang C.-Y., Fong C.-J. FORMOSAT-3/COSMIC GPS radio occultation mission: preliminary results // IEEE T. Geosci. Remote. V. 45. P. 3813–3826. 2007.

– Mansilla G.A. Ionospheric response to the magnetic storm of 22 June 2015 // Pure and Applied Geophys. V. 175. P. 1139–1153. 2018.

<https://doi.org/10.1007/s00024-017-1741-5>

– Pavelyev A.G., Liou Y.A., Wickert J., Gubenko V.N., Pavelyev A.A., Matyugov S.S. New applications and advances of the GPS radio occultation technology as recovered by analysis of the FORMOSAT-3/COSMIC and CHAMP database / New Horizons in Occultation Research: Studies in Atmosphere and Climate / Steiner A., Pirscher B.,

- Foelsche U., Kirchengast G. (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. P. 165–178. 2009.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-00321_9
- Pavelyev A.G., Liou Y.-A., Zhang K., Wang C.S., Wickert J., Schmidt T., Gubenko V.N., Pavelyev A.A., Kuleshov Y. Identification and localization of layers in the ionosphere using the eikonal and amplitude of radio occultation signals // Atmos. Meas. Tech. V. 5. P. 1–16. 2012.
<https://doi.org/10.5194/amt-5-1-2012>
- Pavelyev A.G., Liou Y.-A., Matyugov S.S., Pavelyev A.A., Gubenko V.N., Zhang K., Kuleshov Y. Application of the locality principle to radio occultation studies of the Earth's atmosphere and ionosphere // Atmos. Meas. Tech. V. 8. P. 2885–2899. 2015.
<https://doi.org/10.5194/amt-8-2885-2015>
- Reiff P.H., Daou A.G., Sazykin S.Y. et al. Multispacecraft observations and modeling of the 22/23 June 2015 geomagnetic storm // Geophys. Res. Lett. V. 43. P. 7311–7318. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2016GL069154>
- Wickert J., Pavelyev A.G., Liou Y.A., Schmidt T., Reigber C., Igarashi K., Pavelyev A.A., Matyugov S. Amplitude scintillations in GPS signals as a possible indicator of ionospheric structures // Geophys. Res. Lett. V. 31. L24801. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2004GL020607>
- Yakovlev O.I., Matyugov S.S., Pavelyev A.A. Results of studying the daytime polar ionosphere by the radio occultation method on satellite-to-satellite paths // Radiophysics and Quantum Electronics. V. 62. P. 174–182. 2019.
<https://doi.org/10.1007/s11141-019-09965-y>
- Yasyukevich Y., Vasilyev R., Ratovsky K., Setov A., Globa M., Syrovatskii S., Yasyukevich A., Kiselev A., Vesnin A. Small-scale ionospheric irregularities of auroral origin at mid-latitudes during the 22 June 2015 magnetic storm and their effect on GPS positioning // Remote Sens. V. 12. P. 1579. 2020.
<https://doi.org/10.3390/rs12101579>
- Zeng Z., Sokolovskiy S. Effect of sporadic E cloud on GPS radio occultation signal // Geophys. Res. Lett. V. 37. L18817. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2010GL044561>