



УДК 550.388.1

ПРОЯВЛЕНИЕ АВРОРАЛЬНОГО Е-СЛОЯ В ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ (ТРАНСАВРОРАЛЬНАЯ РАДИОТРАССА)

И. В. Крашенинников¹, В. Н. Шубин¹¹ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия

Анализируются экспериментальные результаты многочастотного наклонного радиозондирования ионосферы на меридиональной радиотрассе Норильск-Иркутск в период геомагнитной бури низкой интенсивности 22.09.2018 г. с максимальным значением индекса возмущенности $K_p \sim 5$. На основе модели ионосферы GDMI (Global Dynamic Model of the Ionosphere, ИЗМИРАН), учитывающей динамическое состояние базовых крупномасштабных структур авроральной ионосферы, показано как общее соответствие вариаций максимальных наблюдаемых частот - МНЧ 1F2 и расчетных - МПЧ 1F2, так и дано физическое объяснение зарегистрированному явлению полной блокировки прохождения радиоволн в ночных условиях ("blackout"). Основным фактором данного эффекта является наличие генерируемого высыпавшимися заряженными частицами сильно неоднородного в продольном сечении радиотрассы аврорального слоя E ионосферы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, АВРОРАЛЬНАЯ ИОНОСФЕРА, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, НАКЛОННОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

<https://elibrary.ru/hvsrdf>

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокоширотная ионосфера имеет более сложное строение, чем в средних широтах и, в частности, ее авроральная область характеризуется наличием крупномасштабных неоднородных структур, связанных с дополнительной ионизацией газов атмосферы потоком захваченных геомагнитным полем заряженных частиц солнечного ветра. Наиболее значительное увеличение электронной плотности происходит на высотах слоя E ионосферы – авроральный E-слой, интенсивность которого возрастает, а его локализация – полярный овал расширяется и его экваториальная граница смещается в более низкие широты с ростом геомагнитной возмущенности. Генерация аврорального E-слоя в ночных условиях, когда отсутствует регулярный слой E ионосферы, сопровождается оптическим свечением – авророй [Акасофу, 1971; Akasofu, 1989]. Наиболее энергичные частицы (протоны высоких энергий) могут доходить до высот классического слоя D (80-90 км) и приводить к его усилению в дневных или появлению в ночных условиях, что, как следствие, приводит к возрастанию поглощения проходящих радиоволн [Milan et al., 1996]. В обычных условиях бурь невысокой интенсивности критическая частота аврорального E-слоя ионосферы может

Электронная почта авторов для переписки:

Крашенинников Игорь Васильевич, e-mail: krash@izmiran.ru
Шубин Валентин Николаевич, e-mail: shubin@izmiran.ru



<https://elibrary.ru/hvsrdf>

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические
исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

составлять $\sim 3\text{--}4$ МГц, что измеряется как экспериментально радарными некогерентного рассеяния и ионозондами вертикального радиозондирования ионосферы, так и оценивается в теоретических моделях степени ионизации потоком частиц [Nikolaeva et al., 2021], и сравнимо со значениями критической частоты регулярного E-слоя ионосферы в дневных условиях. При очень сильных возмущениях плазменная частота в максимуме слоя E – f_oE_{avr} может достигать до 7–8 МГц.

Увеличение электронной плотности в нижней части ионосферы процессами дополнительной ионизации протонами и оседания электронов (электрон теряет свою энергию в результате упругих столкновений, но остается свободным) приводит, прежде всего, к увеличенному поглощению энергии волнового поля (дополнительное авроральное поглощение), что, как правило, указывается в качестве причины значительных ухудшений в работе радиотехнических систем, связанных с ионосферным прохождением радиоволн, и особенно проявляется для радиоволн декаметрового диапазона [Milan et al., 1996; Hunsucker and Hargreaves, 2003; Cameron et al., 2021]. Также увеличение электронной плотности на высотах E-слоя ионосферы приводит к изменению условий распространения радиоволн – дополнительной рефракции в среде, что, в частности, может проявляться в виде эффекта увеличения общего значения максимальной применимой частоты – МПЧ радиотрасс (максимального МПЧ парциальных мод за счет обобщенной (generalized) моды $1Eg$ ($1E_r + 1E_{avr}$), особенно в ночных условиях) [Milan et al., 1997]. В работе [Благовещенский, 2020] приводятся результаты морфологического анализа особенностей в формировании МПЧ на авроральных радиотрассах широтной направленности: Ловозеро-Певек (4200 км) и Диксон-Певек (2800 км) в зависимости от уровня геомагнитной активности (в условиях слабой и высокой возмущенности). В частности, отмечается наличие отражений от спорадического (аврорального) слоя E в данных НЗ ионосферы на трассе Диксон-Певек – МПЧ $1E_s$ во время возмущенного периода, что, по-видимому, свидетельствует о значительном росте электронной плотности в авроральном E-слое ионосферы и возможности его генерации на достаточно больших высотах, необходимых для прохождения 2800 км.

В данной работе представлены результаты анализа данных наклонного радиозондирования ионосферы на радиотрассе Норильск-Иркутск на интервале времени в 6 суток, охватывающего геомагнитную бурю невысокой интенсивности 22 сентября 2018 г. В магнитоспокойных условиях средняя точка данной радиотрассы лежит вне авроральной зоны. Во время ионосферных возмущений радиотрасса может пересекать главный ионосферный провал (ГИП) и полярный овал в меридиональном направлении (трансавроральная радиотрасса) и, соответственно, средняя точка может попасть в авроральную область ионосферы, что существенно изменяет условия прохождения радиоволн. Анализ экспериментальных данных проводился на основе модели ионосферы GDMI (Global Dynamic Model of the Ionosphere, ИЗМИРАН) – статистической (эмпирической) модели, учитывающей динамические изменения состава ионосферы вследствие изменения геомагнитной активности, и метода синтеза ионограмм НЗ в высоких широтах [Кица и др., 1993] на основе приближения геометрической оптики в магнитоактивной среде [Кравцов и Орлов, 1980] с показателем преломления в форме Эплтона-Хартри [Дэвис, 1973].

2. МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ

Модель ионосферы GDMI включает в себя динамическую модель слоя F2 – GDMF2 [Шубин и Деминов, 2019], где располагается главный ионосферный максимум, и которая в периоды геомагнитных возмущений демонстрирует большие и нерегулярные пространственно-временные вариации. Модель GDMI имеет базовый рабочий интервал в одни сутки и содержит модуль высокоширотной ионосферы: авроральный овал, главный ионосферный провал (ГИП) и авральный E-слой. Управляющими параметрами модели являются: интегральный индикатор солнечной активности (кумулятивный параметр F, определяемый на основе данных о потоке солнечного радиоизлучения F10.7 в текущий и предшествующие 28 дней) и интегральный индикатор геомагнитной активности – 3-х часовые индексы Kp (Ap) в текущем дне (прогнозные) и двух предшествующих днях (фактические). При работе с моделью в среднемесячном режиме используется оптимизированный среднемесячный индекс солнечной активности [Крашенинников и др., 2017] и фиксированное (медианное) значение уровня геомагнитной активности $Kp = 2$.

Используемый в модели GDMI подход к прогнозу $foF2$ может быть назван “аэрономическим”, поскольку в нем используются соотношения, следующие из теории формирования слоя F2, которые

связывают $NmF2$ с основными аэрономическими параметрами: нейтральным составом, температурой, скоростью ионно-молекулярных реакций для основного иона O^+ . Термин “динамическая модель” обозначает зависимость изменения электронной концентрации на средних, субавроральных и авроральных широтах от текущего уровня геомагнитной активности с учетом предыстории ее развития. Отличительной чертой модели является использование эмпирического подхода к созданию медианной (фоновой) модели $foF2$ для спокойных геомагнитных условий и ряда аэрономических поправок к ней, связанных с формированием главного ионосферного провала (ГИП), аврорального максимума ионизации, изменением температуры и состава термосферы. Все поправки зависят от изменяющихся геомагнитных условий, индикаторами которых являются 3-х часовые геомагнитные индексы Ap и Kp . Модели положения минимума ГИП и аврорального пика F2-слоя основаны на данных зондовых измерений плотности электронов спутником CHAMP с июля 2000 года по декабрь 2007 года на высотах от ~ 450 до ~ 350 км. С помощью ручной обработки данных каждого анализируемого витка спутника были определены географические координаты минимума ГИП. Затем по международной модели геомагнитного поля IGRF и полученным географическим широтам были определены исправленные геомагнитные широты минимума ГИП – ФМИТ и максимума аврорального пика ионизации – ФАВР. Модели ФМИТ и ФАВР представлены в виде аналитических зависимостей инвариантной широты минимума провала и аврорального пика критической частоты от местного солнечного времени, геомагнитной активности и географической долготы [Демин и др., 2021]. Главным отличием разработанной модели от модели IRI-2016 [Bilitza et al., 2017] является включение в $foF2$ поправок, связанных с формированием ГИП, аврорального пика $foF2$, изменением температуры и состава термосферы, генерации аврорального E-слоя – плазменной частоты в максимуме – f_oE_{avr} . Модель GDMI является развитием модели высокоширотной ионосферы ААНИИ – Беспрозванная и др. [Besprozvannaya et al., 1980].

На рисунке 1 представлены результаты применения модели GDMI к проявлению геомагнитной супербури 29-31 октября 2003 г. [Веселовский и др., 2004] в данных ионосферной станции ИЗМИРАН 29.10.2003 20:00 UT [Боярчук и др., 2005]. Синей пунктирной линией (рис. 1, левая панель) отображено положение экваториальной границы аврорального овала из чего следует, что ст. Москва (ИЗМИРАН) находится внутри области высыпания заряженных частиц солнечного ветра, что подтверждается фотографией полярного сияния в направлении восток-запад (хорошо видно направление геомагнитного поля – с юга на север, по которому движутся ионизирующие атмосферу частицы).

Процесс генерации аврорального слоя E в ночных условиях с очень высокой критической частотой – 6 МГц зафиксировал ионозонд “Парус” (правая верхняя панель) – отчетливо выражен основной, аналогичный классическому случаю с частотной зависимостью, след с начальной высотой ~ 120 км и сложная диффузная область отражений с большим запаздыванием, формируемая, по-видимому, отражениями от локальных неоднородностей электронной концентрации в слое. Такой вид радиофизического проявления соответствует теоретическим (модельным) представлениям о генерации аврорального слоя E [Milan et al., 1996]; модель AIM-E – E-Region Auroral Ionosphere Model] – рисунок 2А. Пример рассчитанного и измеренного высотных профилей электронной плотности ($N_e(h)$ -профили) относится к исследованиям радара некогерентного рассеяния EISCAT в Тромсё (широта $\sim 70^\circ$ N), входящего в состав оборудования европейского нагревного стенда.

Для этого же момента времени результат модели GDMI в сравнении с моделью IRI (International Reference Ionosphere) приведен на рисунке 2Б, и следует отметить два момента: а) в отличие от модели IRI модель GDMI показывает существование слоя E_{avr} даже в относительно спокойных геомагнитных условиях в точке, находящейся внутри полярного овала и б) величина модельной электронной плотности существенно отличается от значений на рисунке 2А. Также следует отметить особенности, связанные с выбором базовой функциональной зависимости по узловым точкам высотного профиля электронной плотности [Bilitza et al., 2017]: для стандарта IRI-профиля (представлен кривой красного цвета) характерно наличие широкой “долины” между слоями – авроральным E и F2, в то время как для варианта NeQuick – зависимость монотонна. С увеличением N_e в максимуме аврорального слоя E до экспериментального значения (рис. 2А) высотный профиль для IRI-эталона становится принципиально некорректным – имеет место резкий излом (рис. 2Б; модель GDMI – кривая красного цвета). Учитывая более реалистичное представление высотной зависимости IRI-стандартом в средних и субавроральных широтах, в дальнейшем будет использоваться комбинированное (зональное) разбиение по базовому варианту интерполяции – вне зоны полярного овала будет использоваться стандарт IRI, а внутри – NeQuick-тип профиля.

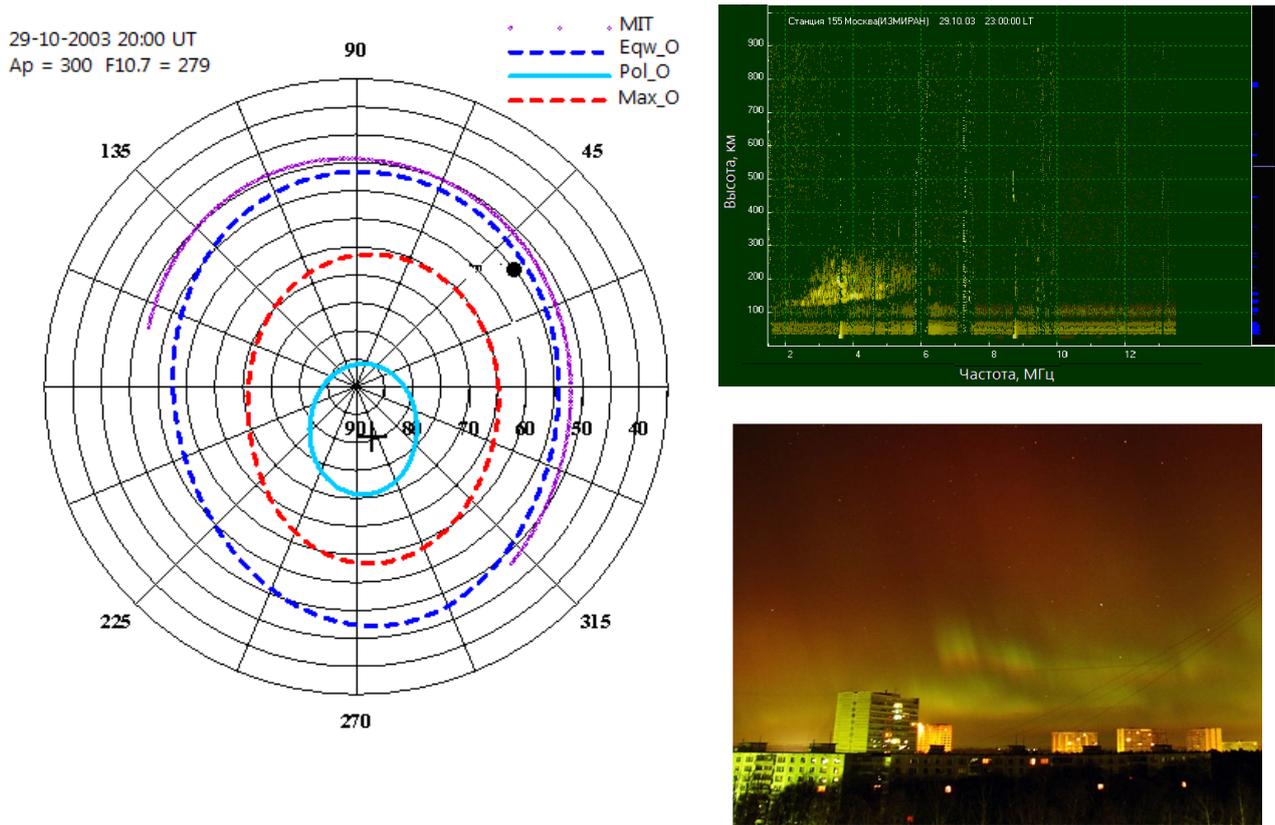


Рис. 1. Левая панель – пространственное положение глобальных крупномасштабных неоднородностей авроральной области ионосферы во время супербури 29-31 октября 2003 – 29.10.2003 20:00 UT по модели GDMI: ГИП (MIT) и полярный овал. Проявление аврорального E-слоя ионосферы на ионограмме ВЗ в ИЗМИРАН (положение станции отмечено жирной точкой на левой панели) 29.10.2003 20:00 UT (22:00 LT) (правая верхняя панель) и соответственно аврора над Москвой (Троицк) в направлении наблюдения восток-запад – правая нижняя панель

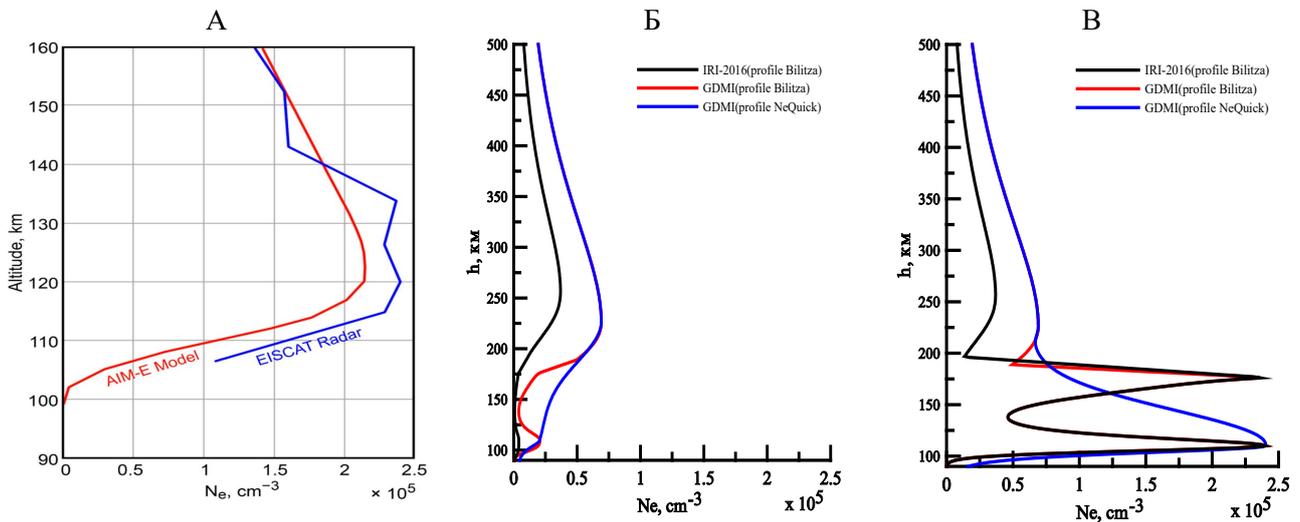


Рис. 2. Вертикальные профили концентрации электронов для 05 декабря 2007 г. 00:36:36 UT: 2А – модель AIM-E красная и данные радара некогерентного рассеяния EISCAT UHF синяя линия; 2Б – рассчитанные по моделям IRI-2016 (черная), GDMI (красная) с нижними профилями [Bilitza et al., 2017] и GDMI (синяя) линиями с профилем из NeQuick; 2В – профили электронной концентрации с NmE соответствующей данным радара в Тромсё

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Меридиональная исследовательская радиотрасса наклонного радиозондирования ионосферы ИСЗФ Норильск – Иркутск (2050 км), с использованием ЛЧМ технологии (линейно частотно модулированного сигнала), характеризующаяся высоким разрешением модовой структуры волнового поля, в спокойных условиях находится в субавроральной зоне, но во время геомагнитного возмущения экваториальная граница аврорального овала смещается к югу, и радиотрасса становится трансавроральной. Т.е. она может пересекать зону формирования аврорального E-слоя, что должно проявиться в изменении характера прохождения зондирующих радиоволн.

В работе [Куркин и др., 2022] представлены результаты наклонного радиозондирования на данной радиотрассе с 19.09.2018 по 24.09.2018, включающие в себя интервал ионосферной бури невысокой интенсивности (21–22.09.2018, $A_p \sim 27$). Из представленных в статье данных можно выделить несколько выраженных эффектов ионосферного возмущения: а) уменьшение МПЧ 1F2 в околополуденное время (отрицательная фаза бури, рис. 3), б) полное блокирование прохождения радиоволн через ионосферу в ночных условиях (эффект “blackout” – с 17:30 UT 22.09.2018 г. по 00:00 UT 23.09.2018 г., рис. 3) и отсутствие следов кратных мод (2F2 и выше, рис. 5, верхние панели) в дневных условиях. На рисунке 3 представлены суточные зависимости максимально наблюдаемой частоты – МНЧ 1F2 (точками черного цвета), максимально применимой частоты – МПЧ 1F2, рассчитанной в модели GDM1 для среднемесячных (кривая 0, серый цвет), в гелиогеофизических условиях конкретных дней (кривая 1, синий цвет) и поведение гелиогеофизических факторов F10.7 и A_p -индекса с 19.09.2018 г. по 24.09.2018 г. В спокойные дни с 19.09.2018 г. по 21.09.2018 г. наблюдается постепенный рост максимальных значений МНЧ 1F2 (хорошо видно в локально околополуденное время), хотя уровень потока солнечного радиоизлучения – F10.7 и A_p -индекс практически постоянны. Геомагнитное возмущение началось в ночь с 21.09.2018 г. на 22.09.2018 г. резким изменением A_p -индекса. Заметные изменения условий распространения радиоволн на экспериментальной радиотрассе начались около 02:30 UT 22.09.2018 г., через ~4.5 ч после начала главной фазы бури, что выразилось в снижении МНЧ 1F2 на ~ 4 МГц (~15%) относительно предыдущего дня (~ 2.5 МГц относительно среднемесячного фона), и в течение дневных часов они оставались пониженными на ~ 15–20%. На следующую ночь – 22.09.2018 г. с 17:30 UT наступила блокировка (эффект “blackout”) прохождения диагностического излучения на радиотрассе и продолжалась до 00:00 UT 23.09.2018 г. В последующие сутки хорошо наблюдается восстановление состояния ионосферы, выражающееся в росте дневных значений МНЧ 1F2 (МПЧ 1F2), практически, до предбуревого уровня – на 19.09.2018 г.

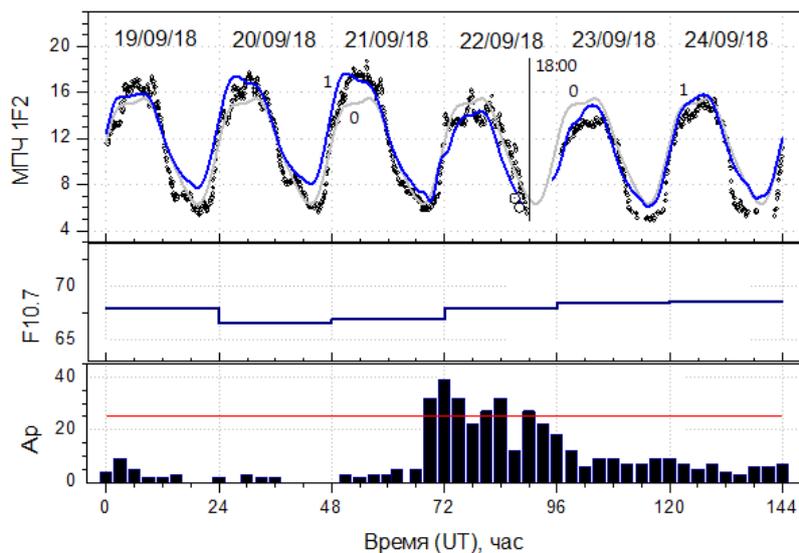


Рис. 3. Временной ход МПЧ 1F2 на трансавроральной радиотрассе Норильск–Иркутск 19.09.2018 г.– 24.09.2018 г.: полые кружочки – экспериментальные значения, кривая 0 – среднемесячные и кривая 1 – суточные зависимости для модели ионосферы GDM1. Нижние панели отражают временную зависимость гелиогеофизических данных: F10.7 и A_p -индекса. Красной линией отмечен пороговый уровень, разделяющий спокойное и возмущенное состояние геомагнитного поля

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты характеристик наклонного радиозондирования ионосферы: МПЧ (как точка смыкания семейства нижнеугловых и верхнеугловых лучей, рис. 5), ионограммы НЗ (рис. 5), оценки энергетических параметров прохождения радиоволн выполнялись на основе базовых уравнений геометрической оптики [Кравцов, Орлов, 1980] для среды с лучепреломлением, задаваемой моделью ионосферы в двумерно-неоднородном приближении.

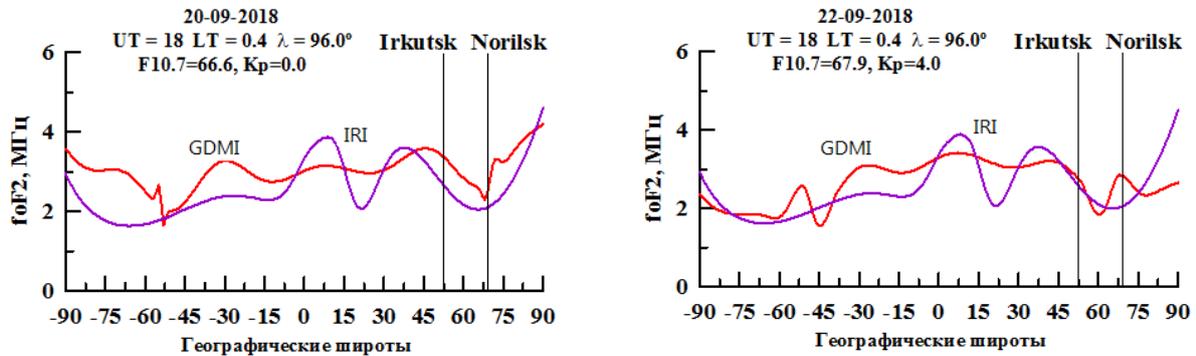


Рис. 4. Положение ГИП и аврорального овала в широтной зависимости foF2 по долготе средней точки радиотрассы Норильск – Иркутск в спокойных условиях 20.09.2018 г. (левая панель) и во время ионосферной бури 22.09.2023 г. (правая панель) в модели GDMI на 18:00 UT. Фиолетовым цветом показан широтный разрез в модели IRI.

Для рассматриваемого случая: в спокойных условиях (20.09.2018 г.) ГИП (главный ионосферный провал) по модели GDMI находится на широте Норильска, а в возмущенных (22.09.2018 г.) – смещается к середине радиотрассы (рис. 4, правая панель), где представлена широтная зависимость критической частоты foF2 для долготы средней точки радиотрассы. Соответственно смещается и полярный овал, в котором и формируется авроральный E-слой. Для сентября 2018 г., года низкой солнечной активности, сглаженные значения числа солнечных пятен – Rms и потока радиоизлучения – Fms составляют 6.5 и 70 и рассчитанные значения среднемесячной МПЧ 1F2 представлены кривой 0 (серого цвета), а рассчитанные для гелиогеофизических условий конкретных дней – кривой 1 (синий цвет) на рисунке 3. Хорошо заметен рост локальных околополуденных значений МПЧ 1F2 с 19.09 по 21.09 как в эксперименте, так в расчетных значениях

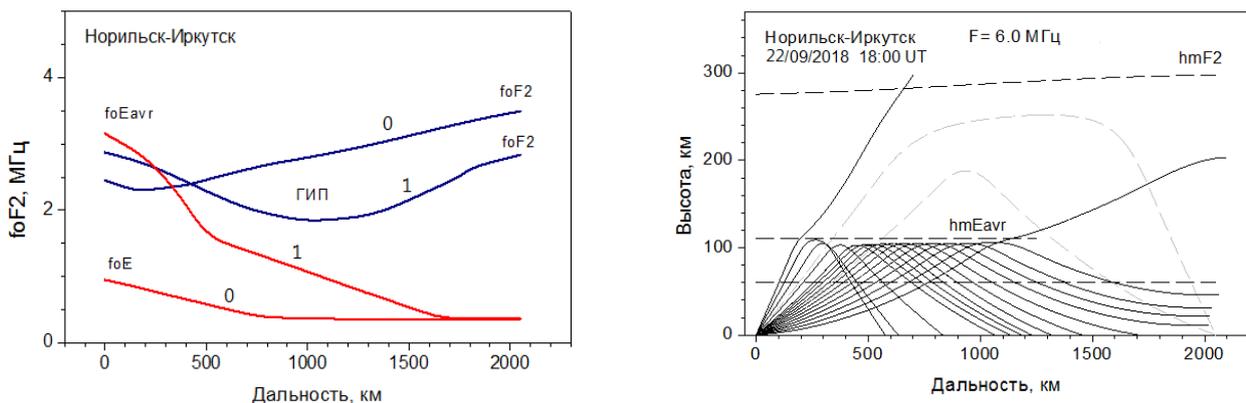


Рис. 5. Левая панель – положение ГИП и аврорального слоя E ионосферы в спокойных условиях (20.09.2018 г. 18:00 UT, кривые 0) и в возмущенных (22.09.2018 г. 18:00 UT, кривые 1). Правая панель – лучевые траектории для частоты 6 МГц в модели GDMI, иллюстрирующие эффект “blackout” на радиотрассе наклонного радиозондирования Норильск – Иркутск во время ионосферной бури

по модели GDM1. Также имеет место существенное расхождение среднемесячных и посуточных результатов, особенно в полуденное время – рассчитанные с учетом дневных гелиогеофизических условий МПЧ 1F2 значительно лучше соответствуют экспериментальным данным и дневная динамика отражает инерционные свойства ионосферы. Однако в ночных условиях наблюдается систематическое расхождение расчетных и экспериментальных значений МПЧ 1F2 – экспериментальные данные ниже расчетных и ближе к среднемесячным результатам.

Модельные расчеты показывают наличие интервала времени, когда блокируется прохождение зондирующего излучения на радиотрассе – 18:00 – 23:00 UT 22.09.2018 г. (рис. 3). В целом, расчетный интервал несколько меньше, чем наблюдается в эксперименте, но важно, что модель GDM1, в отличие от модели IRI, принципиально описывает такую неординарную ситуацию. Более детально состояние ионосферы на время 18:00 22.09.2018 г. отображается на рисунке 5, левая панель как функция расстояния от Норильска. Кривыми с индексом 0 представлены продольные зависимости foF2 и foE – плазменные частоты в максимумах слоев F2 и E. Хорошо видны две особенности распределения электронной плотности в ионосфере: наличие ГИП в слое F2 с минимумом в области средней точки радиотрассы и сильная продольная неоднородность аврорального вклада в слое E. Анализ на основе лучевых расчетов показывает (рис. 5, правая панель), что блокировка прохождения связана с наличием аврорального слоя E, генерируемого ионизирующим действием заряженных частиц солнечного ветра. Траектории нижнего и верхнего лучей для невозмущенных условий показаны пунктирными, а реальная ситуация с экранирующим действием аврорального E-слоя – сплошными линиями. Хорошо видно, что для полной блокировки (не только моды 1F2) важен не только фактор достаточно высокой величины ионизации, но и сильный продольный градиент электронной плотности на высотах E-слоя, приводящий к формированию механизма “рикошетирующих” (проходящих над земной поверхностью) лучевых траекторий, и, соответственно, не попадающих в область расположения приемного пункта.

Эффект деградации кратных отражений на ионограммах НЗ, по всей видимости, также связан с большой продольной неоднородностью электронной плотности на рассматриваемой радиотрассе, а также с увеличением поглощения, связанного с генерацией аврорального E-слоя в дополнение к естественной электронной концентрации на высотах 110-120 км. На рисунке 6 представлены результаты регистрации ионограмм НЗ в дневное время [Куркин и др., 2022]: в спокойный день 20.09.2018 г. 14:23 LT и в возмущенных условиях – 22.09.2018 г. 12:18 LT. В первом случае в данных радиозондирования хорошо выражен след двукратного отражения от ионосферы – моды 2F2 с наличием нижнелучевых и верхнелучевых компонент (рис. 6, левая верхняя панель). В период ионосферного возмущения в модовой структуре волнового поля кратные отражения полностью отсутствуют (рис. 6, правая верхняя панель). Аналогичные примеры можно видеть и в [Благовещенский, 2020] для радиотрассы Диксон-Певек

Синтезированные ионограммы в модели GDM1 для соответствующих моментов времени приведены на нижних панелях. Модовая структура волнового поля для слоя F2 в спокойных условиях (рис. 6, левая нижняя панель) довольно хорошо соответствует структуре экспериментальной ионограммы, в частности, МПЧ 1F2 очень близки по значениям. Также видно характерное проявление влияния слоя F1 в следе общего отражения от слоя F ионосферы. Аналогичная ситуация и с кратным отражением – частотный след расчетной моды 2F2 соответствует эксперименту, в частности, МПЧ 2F2 практически совпадают. Наиболее заметное различие состоит в том, что в экспериментальных данных совершенно отсутствуют следы отражения от слоя E – моды 1E и 2E. Наименьшая частота, на которой регистрируется зондирующий сигнал, составляет ~ 8 МГц и это, очевидно, обусловлено столкновительным поглощением, поскольку теоретически следы существуют и на более низких частотах, в том числе, и для слоя F2. Отсутствие следов отражения от слоя E ионосферы объясняется двумя причинами [Куркин и др., 2022]: географическим фактором – наличием возвышенности вблизи пункта излучения (Норильск), препятствующей излучению с углами близкими к нулевым (мода 1E), и, практически, полным поглощением в E-слое при двукратном его прохождении (мода 2E) [Крашенинников, 2018; Крашенинников и Шубин, 2020]. В возмущенный день структура синтезированных следов кратных отражений кардинально меняется (рис. 6, правая нижняя панель) – след отражения от F-области рассыпается на фрагменты из-за сильной продольной неоднородности среды. Базовыми факторами, определяющими амплитуду волнового поля, являются пространственная расходимость и потери энергии волны посредством упругих столкновений электронов с ионами и нейтральными молекулами газов, и они определяют нижнюю границу диапазона прохождения радиоволн через ионосферу [Дэвис, 1973; Крашенинников, 2018; Крашенинников и Шубин, 2020;

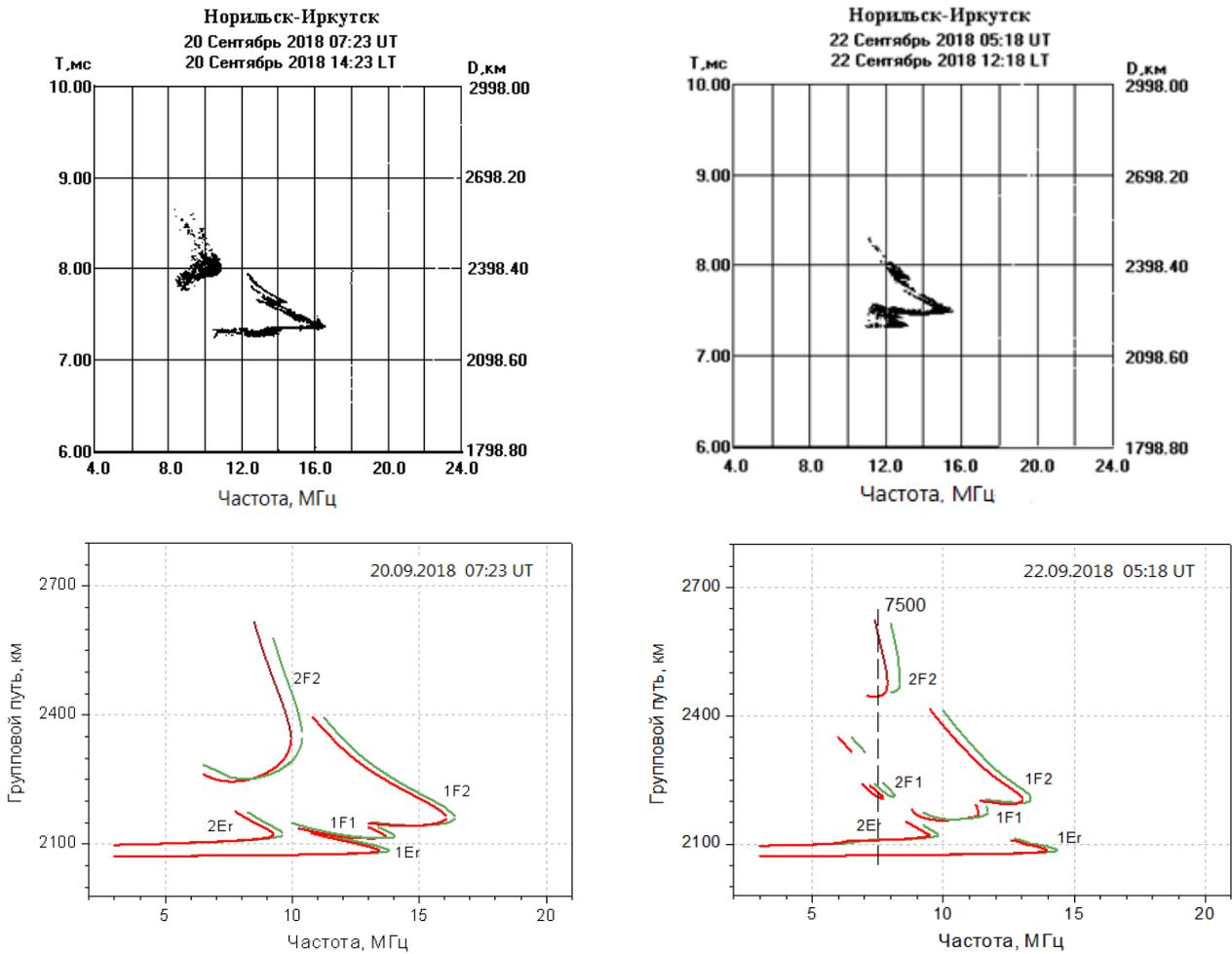


Рис. 6. Ионограммы наклонного радиозондирования ионосферы в локальное околополуденное время: в спокойных геомагнитных условиях – 20.09.18 г. 07:23 UT и во время геомагнитной бури – 22.09.18 г. 05:18 UT: экспериментальные (верхняя панель) и синтезированные в модели GDMI (нижняя панель)

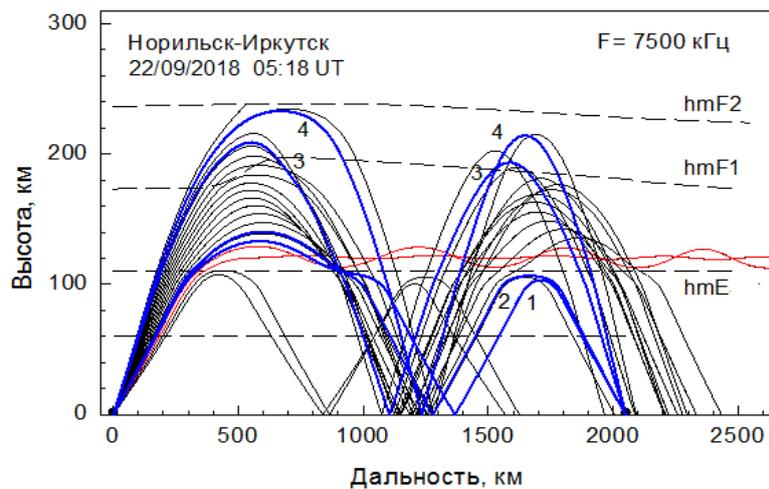


Рис. 7. Лучевые траектории формирования мод двукратного отражения от слоя F2 во время геомагнитной бури – 22.09.18 г. 05:18 UT: кривые 1 и 2 соответствуют моде 2F1, а 3 (нижнеугловая компонента) и 4 (верхнеугловая компонента) – моде 2F2. Красным цветом выделены лучевые траектории волнового поля, захваченного в E-F волноводный канал.

Ruck and Themens, 2021]. Качественно параметр волновой расходимости можно оценить по физическим свойствам функции группового пути на выбранной частоте моды – чем больше величина группового пути и больше абсолютное значение его производной по частоте, тем больше величина пространственного ослабления и, соответственно, меньше амплитуда волнового поля. Это обстоятельство хорошо видно из экспериментальных ионограмм на рисунке 6. Для всех модельных фрагментов структуры кратного отражения от ионосферы характерно наличие обоих факторов по отношению к спокойным условиям (рис. 6, нижние панели), что и определяет их снизившуюся энергетику из-за роста расходимости (лучевая картина формирования фрагментов следа моды 2F2 на частоте 7500 кГц приведена на рисунке 7). Как следствие, в совокупности с возросшим поглощением из-за дополнительной электронной плотности в E-слое (авроральное поглощение проходящих мод), что отмечалось и в [Milan et al., 1997] и [Благовещенский, 2020] даже для суббурь, объясняет отсутствие следов кратных отражений на ионограмме H3 (рис. 6, верхняя правая панель). Количественная оценка соотношения амплитуд волнового поля в задаче с изотропным излучением для мод 2F2 и 2E (частота 7500 кГц, рис. 6, левая панель) дает величину $\sim 1/2$, что показывает малую вероятность формирования следа моды 2F2.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целом, анализ данных радиозондирования на радиотрассе Норильск – Иркутск, пересекающей главный ионосферный провал (ГИП) и авроральный овал во время ионосферного возмущения 21.09-22.09.2018 г. показал, в частности, что модель GDMI позволяет понять и принципиально смоделировать основные особенности динамики особой точки ионограммы H3 – МПЧ 1F2 как в спокойных условиях, так и в процессе развития ионосферной бури. Так, в частности, модель достаточно хорошо отражает динамику изменения МПЧ 1F2 ото дня ко дню в околополуденное время как в спокойный период, так и в фазах развития бури и послебуревоего восстановления. Позволяет принципиально объяснить формирование эффекта “blackout” из-за наличия сгенерированного в ночных условиях аврорального E-слоя, хотя и в несколько меньших временных границах полной блокировки прохождения радиоволн. Возможной причиной может быть несколько заниженная величина модельной электронной плотности, что отмечалось выше в сравнительном анализе с результатами радара некогерентного рассеяния и физической моделью AIM-E – рисунок 2а, б. Модель GDMI дает существенно меньшее значение для плазменной частоты в максимуме аврорального слоя E, чем модель AIM-E и показывает эксперимент. Но здесь следует учитывать, что и эксперимент, и расчеты в физической модели [Nikolaeva et al., 2021] E_{avg} представлены в один момент времени, а статистическая модель GDMI является усредненной для интервала времени в три часа, как формируются индексы геомагнитной возмущенности. Тем не менее, то обстоятельство, что временной интервал существования эффекта полного блокирования прохождения радиоволн на исследуемой трансавроральной радиотрассе, рассчитанный по модели GDMI, меньше экспериментального, действительно может указывать на систематически несколько заниженную электронную плотность в авроральном E-слое. Другим проблемным обстоятельством модели GDMI на данном этапе является задача корректного построения высотного профиля электронной плотности в глобальном масштабе – зональный характер базовой функции $N_e(h)$ -профиля, в частности, не обеспечивает физически обоснованного плавного перехода на границах зон и в этом аспекте модель нуждается в развитии.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных мониторинга условий прохождения радиоволн методом многочастотного наклонного радиозондирования показал, что основной причиной полной блокировки прохождения зондирующих радиоволн на трансавроральной радиотрассе Норильск – Иркутск в ночное время в условиях геомагнитного возмущения небольшой интенсивности является наличие сильно неоднородного аврорального слоя E, возникающего под ионизирующим действием заряженных частиц солнечного ветра. Совокупность факторов сильной продольной неоднородности электронной плотности и увеличения поглощающих свойств ионосферной плазмы на высотах E-слоя ионосферы объясняет деградацию следов кратных отражений в дневных возмущенных условиях.

Благодарности. Данные наклонного зондирования на трассе Норильск-Иркутск получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckprf.ru/ckp/3056>).

ЛИТЕРАТУРА

- *Акасофу С.И.* Полярные и магнитосферные суббури // Издательство “Мир”, Москва, 1971. 320 с.
- *Благовещенский Д.В.* Особенности распространения ВЧ-радиоволн на авроральных трассах при различной геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрномия, 2020. Т. 60. № 3. С. 355-364.
- *Боярчук К.А., Иванов-Холодный Г.С., Коломийцев О.П. и др.* Отклик среднеширотной ионосферы Земли на экстремальные события на Солнце в октябре–ноябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэрномия, 2005. Т. 45. № 1. С. 84–91.
- *Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др.* Солнечные и гелиосферные явления в октябре – ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космические исследования, 2004. Т. 42. №5, С.456.
- *Деминов М.Г., Шубин В.Н., Бадин В.И.* Модель критической частоты E-слоя для авроральной области // Геомагнетизм и аэрномия, 2021. Т. 61. № 5. С.610–617. DOI: 10.31857/S0016794021050059.
- *Дэвис К.* Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
- *Кица П.В., Крашенинников И.В., Лукашкин В.М.* Моделирование многочастотного распространения КВ-сигналов в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия, 1993. Т. 33. № 1. С. 158-162.
- *Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.* Геометрическая оптика неоднородных сред, М., “Наука”, 304 с., 1980.
- *Крашенинников И. В., Павлова Н. М., Ситнов Ю. С.* Модель IRI в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия, 2017. Т. 57. № 6. С. 774-782.
- *Крашенинников И.В.* Модель IRI в задаче оценки энергетических характеристик волнового поля в ионосферном распространении радиоволн// Гелиогеофизические исследования, 2018. № 17. С. 1-6.
- *Крашенинников И.В., Шубин В.Н.* Частотная зависимость энергетических параметров волнового поля на предельной дальности односкачкового распространения радиоволн в условиях низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия, 2020. Т. 60. № 2. С. 220-228.
- *Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А.* Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн // Геомагнетизм и аэрномия, 2022. Т. 62. № 2. С. 245-256. DOI: 10.31857/S0016794022020110
- *Шубин В. Н., Деминов М.Г.* Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия, 2019. Т. 59. № 4. С. 461–473.
- *Akasofu S.I.* The dynamic aurora // Scientific American (ISSN 0036-8733), 1989. V. 260. P. 90-97. DOI: 10.1038/scientificamerican0589-90.
- *Besprozvannaya A. S., Shirochkov A. V. and Shchuka T. I.* The dynamics of the high latitude ionospheric E region // J. atmos. Terr. Phys., 1980. V. 42. P. 115-123. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(80\)90071-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(80)90071-9).
- *Bilitza, D., Altadill, D., Truhlik, V., Shubin, V., Galkin, I., Reinisch, B., Huang, X.* International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather, 2017. V.15. P. 418–429. DOI: 10.1002/2016SW001593.
- *Cameron T.G., Fiori R.A.D., Warrington E.M. et al.* Characterization of high latitude radio wave propagation over Canada // Jour. of Atm. Solar–Terr. Phy., 2021. V. 219. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105666>.
- *Hunsucker, R. D., Hargreaves J. K.* The High-Latitude Ionosphere and its Effects on Radio Propagation // Cambridge University Press, New York, 2003. 617 p. DOI:/10.1017/CBO9780511535758.
- *Milan S. E., Jones T. B. and Warrington E. M.* Enhanced MUF propagation of HF radio waves in the auroral zone // J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 1997. V. 59. No. 2. P. 237-248.
- *Milan S. E., Jones T. B., Lester M., Warrington E. M., Reeves G. D.* Substorm correlated absorption on a 3200 km transauroral HF propagation path // Ann. Geophys., 1996. V. 13, P. 182-190.
- *Nikolaeva V., Gordeev E., Sergienko T. et all.* AIM-E: E-Region Auroral Ionosphere Model // Atmosphere, 2021. 12, 748. <https://doi.org/10.3390/atmos12060748>
- *Ruck J.J.; Themens D.R.* Impacts of auroral precipitation on HF propagation: A hypothetical over-the- horizon radar case study // Space Weather, 2021. 19. e2021SW002901. DOI:10.1029/2021SW002901.

MANIFESTATION OF THE AURORAL E-LAYER IN IONOSPHERIC RADIOSOUNDING DATA UNDER LOW-INTENSITY GEOMAGNETIC STORM CONDITIONS (TRANS-AURORAL RADIOPATH)

Krashennnikov I. V., Shubin V. N.

We analyze the experimental results of multifrequency oblique radio sounding of the ionosphere at the meridional radio path Norilsk-Irkutsk during a low-intensity geomagnetic storm on 22/09/2018 with the disturbance index magnitude $Kp \sim 5$. Based on the ionosphere model GDMI (Global Dynamic Model of the Ionosphere, IZMIRAN), which takes into account the dynamic state of basic large-scale structures of the auroral ionosphere, we investigated the general correspondence between maximum observed frequencies on the path – MOF 1F2 and calculated maximum usable frequencies – MUF 1F2 variations. Physical explanation for the recorded phenomenon of complete blocking the radio wave passage in night conditions ("blackout") and the multi hop tracks disappearance in the day conditions was given. The main factor of these effects is a presence of auroral E-layer, generated by charged particles of the solar wind, strongly inhomogeneous in longitudinal section of the radio path.

KEYWORDS: IONOSPHERE, IONOSPHERIC MODELS, RAY TRAJECTORIES, GEOMAGNETIC DISTURBANCES