

УДК 550.388.1

ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ПРОХОЖДЕНИЕ РАДИОВОЛН В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ

© 2024 г. И. В. Крашенинников*, В. Н. Шубин**

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

*e-mail: krash@izmiran.ru

**e-mail: shubin@izmiran.ru

Поступила в редакцию 27.02.2024 г.

После доработки 08.04.2024 г.

Принята к публикации 23.05.2024 г.

Анализируются экспериментальные результаты многочастотного наклонного радиозондирования ионосферы на меридиональной трансавроральной радиотрассе Норильск-Иркутск в период умеренной геомагнитной бури 22.09.2018 с максимальным значением индекса возмущенности $K_p \sim 5$. На основе глобальной динамической модели ионосферы (GDMI), учитывающей изменяющееся во времени состояние базовых крупномасштабных структур авроральной ионосферы (главный ионосферный провал, полярный овал и авроральный E -слой), показано общее соответствие вариаций максимальных наблюдаемых частот (МНЧ 1F2) и расчетных максимальных применимых частот (МПЧ 1F2) в динамике геомагнитного возмущения. Дано физическое объяснение зарегистрированному явлению полной блокировки прохождения радиоволн в ночных условиях ("blackout"). Основным фактором проявления данного эффекта является наличие генерируемого высыпаящимися заряженными частицами сильно неоднородного в продольном сечении радиотрассы аврорального слоя E ионосферы. В дневных условиях наличие такого E -слоя приводит к более слабому эффекту деградации следов кратных отражений на ионограммах наклонного радиозондирования ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, авроральная ионосфера, распространение радиоволн, наклонное радиозондирование ионосферы.

DOI: 10.31857/S0016794024060064, EDN: QONOWS

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 аврорального слоя E ионосферы, интенсивность которого возрастает, а его локализация полярный овал расширяется, и граница овала смещается на 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 условиях умеренных геомагнитных бурь критическая частота аврорального E -слоя ионосферы может составлять в ночное время ~2–3 МГц, что измеряется как экспериментально радарными некогерентного рассеяния и ионозондами вертикального радиозондирования ионосферы, так и оценивается в теоретических моделях ионизации потоком частиц [Nikolaeva et al., 2021], и сравнимо со значениями критической частоты регулярного E -слоя ионосферы в дневных усло-

виях. При экстремальных возмущениях плазменная частота в максимуме аврорального слоя E может достигать до 6–7 МГц, и этот слой становится более протяженным по высоте (полутолщина может превышать 30 км), чем в естественных условиях фотоионизации солнечной радиацией (~ 10 км) [Брюнелли и Намгаладзе, 1988].

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. Это, как правило, указывается в качестве причины значительных ухудшений в работе радиотехнических систем, связанных с ионосферным прохождением радиоволн, и особенно проявляется для радиоволн декаметрового диапазона [Milanetal., 1996; Hunsucker and Hargreaves, 2003; Cameron et al., 2022]. Увеличение электронной плотности на высотах E -слоя ионосферы приводит также к изменению условий распространения радиоволн. В частности, к появлению дополнительной рефракции в среде, что может проявляться в виде эффекта общего увеличения максимальной применимой частоты (МПЧ) радиотрасс (за счет возрастания МПЧ моды 1E), особенно в ночных условиях [Milanetal., 1997], когда слой $F2$ сильно ослаблен.

Целью данной работы является анализ данных наклонного радиозондирования ионосферы на радиотрассе Норильск-Иркутск на интервале времени в 6 суток, охватывающего умеренную геомагнитную бурю 22 сентября 2018 г. [Куркин и др., 2022], в частности, исследование эффекта полной блокировки прохождения радиоволн в ночных возмущенных условиях. Предварительные результаты анализа представлены в работе [Крашенинников и Шубин, 2024]. В магнитоспокойных условиях средняя точка данной радиотрассы меридиональной направленности лежит вне авроральной зоны (субавроральная локализация). Во время ионосферных возмущений, по мере смещения экваториальной границы аврорального овала к югу, радиотрасса может пересекать главный ионосферный провал (ГИП) и полярный овал и, соответственно, средняя точка может попасть в авроральную область ионосферы, что существенно изменяет условия прохождения радиоволн. Радиотрасса становится трансавроральной. Анализ экспериментальных данных проводился на основе модели ионосферы GDMI (Global Dynamic Model of the Ionosphere, ИЗМИРАН) и метода синтеза ионограмм наклонного

радиозондирования ионосферы (НЗ) в высоких широтах [Кища и др., 1993], используя приближение 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, как базовый элемент, динамическую модель GDMF2 слоя $F2$ [Шубин и Деминов, 2019], которая в периоды геомагнитных возмущений демонстрирует большие и нерегулярные пространственно-временные вариации. Модель GDMI имеет рабочий интервал в одни сутки и содержит модуль высокоширотной ионосферы, описывающий авроральный овал, главный ионосферный провал [Деминов и Шубин, 2018] и авроральный E -слой [Деминов др., 2021]. Управляющими параметрами модели являются интегральные индексы солнечной и геомагнитной активности. Солнечная активность задается в виде кумулятивного параметра F , определяемого на основе данных о потоке солнечного радиоизлучения $F10.7$ в текущий день и 27 дней предшествующих ему. Индикатор геомагнитной активности представляет собой 3-х часовые индексы: ар, K_p в текущем дне (прогнозные и оценочные реальные) и в 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 $K_p = 2$.

Используемый в GDMI подход к прогнозу ключевого параметра главного ионосферного максимума — $foF2$ (плазменная частота в максимуме слоя $F2$) может быть назван “аэрономическим”, поскольку в нем используются соотношения, следующие из теории формирования $F2$ -слоя ионосферы. Они связывают $foF2$ через электронную плотность в максимуме — $NmF2$ ($f_n \approx \sqrt{80.6 N_e}$, где f_n — в Гц, а N_e — эл/м³) с основными аэрономическими параметрами: нейтральным составом, температурой, скоростью ионно-молекулярных реакций для основного иона O^+ . Термин “динамическая модель” обозначает зависимость изменения концентрации электронов 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 (вблизи полярной границы ГИП), 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 (“провала” ионизации) 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 ~ 350 до ~ 450 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 – ФМТ и максимума аврорального пика ионизации – ФАВР. Модели ФМТ и ФАВР представлены в виде аналитических зависимостей инвариантной широты минимума провала и аврорального пика критической частоты слоя $F2$ ионосферы 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 плазменную частоту слоя $F2$ поправок, связанных с формированием ГИП, аврорального пика $foF2$, изменением температуры и состава термосферы, генерации аврорального E -слоя (плазменной частоты в максимуме – foE_{avr}). Модель GDMI является развитием мо-

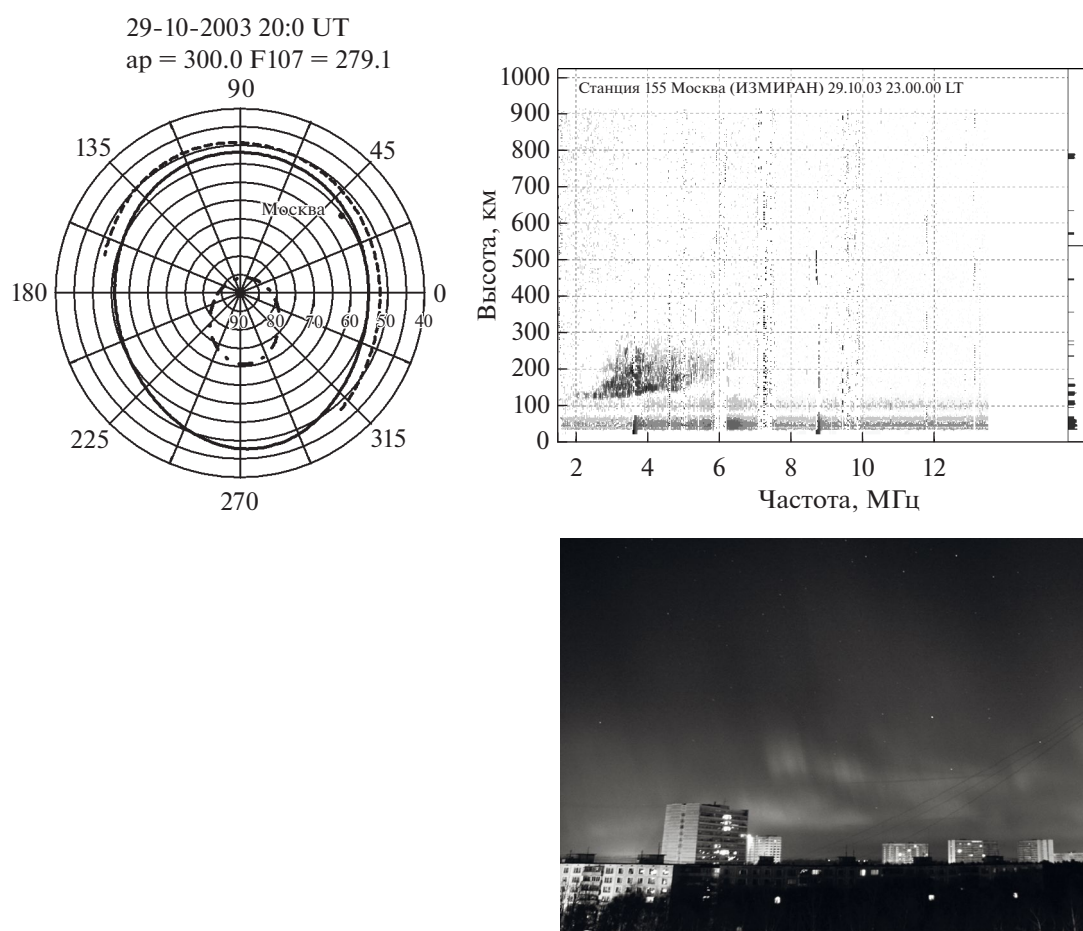


Рис. 1. На левой панели по модели GDMI представлено пространственное положение глобальных крупномасштабных неоднородностей авроральной области ионосферы во время супербури 29.10.2003 20:00 UT. Экваториальная граница овала – кривая 0, положение минимума ГИП – кривая 1 (МТ); положение ст. ИЗМИРАН отмечено жирной точкой. Проявление аврорального E -слоя ионосферы на ионограмме ВЗ ст. ИЗМИРАН 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.

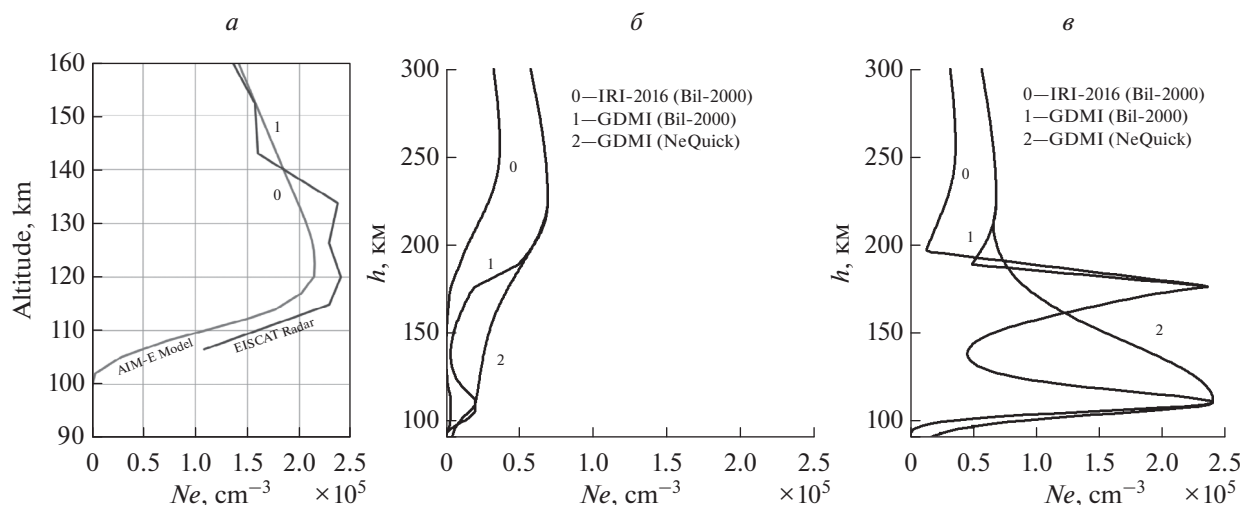


Рис. 2. Вертикальные профили концентрации электронов 05 декабря 2007 г. 00:36:36 UT: (а) модель AIM-E — кривая 0, данные радара некогерентного рассеяния EISCAT UHF — кривая 1; (б) — вертикальные профили концентрации электронов, рассчитанные по моделям IRI-2016 — кривая 0, GDMI с профилем [Bilitza et al., 2000] — кривая 1 и GDMI с профилем NeQuick — кривая 2; (в) — вертикальные профили моделей IRI-2016, GDMI и NeQuick электронной концентрации с NmE , соответствующей данным радара в Тромсё.

дели высокоширотной ионосферы ААНИИ [Besprozvannaya et al., 1980].

На рис. 1 представлены результаты применения модели GDMI во время экстремально сильной геомагнитной бури 29–31 октября 2003 г. [Веселовский и др., 2004] по данным ионосферной станции ИЗМИРАН 29.10.2003 20:00 UT [Боярчук и др., 2005]. Сплошной линией на левой панели рис. 1 отображено положение экваториальной границы аврорального овала из чего следует, что ст. Москва (ИЗМИРАН) находится внутри области высыпания заряженных частиц солнечного ветра (аврорального овала). Это подтверждается фотографией полярного сияния в проекции восток-запад, на которой хорошо видно направление геомагнитного поля с юга на север, по которому движутся ионизирующие атмосферу частицы (нижняя правая панель на рис. 1). Процесс генерации аврорального слоя E в ночных условиях с очень высокой критической частотой 6 МГц зафиксировал ионозонд “Парус” (правая верхняя панель на рис. 1). Отчетливо виден выраженный основной, аналогичный классическому случаю с частотной зависимостью след с начальной действующей высотой ~ 120 км и сложная диффузная область отражений с большим запаздыванием, которая формируется, по-видимому, как отражениями от локальных неоднородностей (турбулентности) электронной концентрации в слое, так и из-за большой толщины самого слоя.

Такой вид радиофизического проявления соответствует теоретическим представлениям о генерации аврорального слоя E — модель AIM-E (E -Region Auroral Ionosphere Model) [Nikolaeva et al., 2021]. Пример рассчитанного в данной модели и измеренного радаром некогерентного рассеяния EISCAT в Тромсё (широта $\sim 70^\circ$ N) высотных профилей электронной плотности $Ne(h)$ для 05 декабря 2007 г. 00:36:36 UT на высотах E -слоя ионосферы представлен на рис. 2а. Для этих же условий на рис. 2б приведены результаты расчета вертикального профиля электронной концентрации по моделям IRI-2016 [Bilitza et al., 2017] и GDMI с параметрами: дневные индексы — $Ap = 2$, $F107 = 75$ и 3-х часовой $Kp = 2$. Следует отметить, что в отличие от IRI-2016 модель GDMI показывает существование слоя E_{avr} даже в относительно спокойных геомагнитных условиях в точке, находящейся внутри полярного овала, хотя величина модельной электронной плотности NmE_{avr} существенно отличается от значений, приведенных на рис. 2а. Также следует отметить особенности, связанные с выбором функциональной зависимости по узловым точкам высотного профиля электронной плотности. Для профиля Bil2000 [Bilitza et al., 2000] в IRI-2016 характерно наличие широкой “долины” между слоями E и $F2$, в то время как в профиле класса NeQuick [Nava et al., 2008] электронная концентрация с высотой изменяется монотонно. С искусственным увеличением Ne в максимуме слоя E до экспериментального значения авроральной иониза-

ции (рис. 2а) использование высотного профиля класса Bil-2000 становится принципиально некорректным, т.е. имеет место резкий излом как в модели IRI2016, так и в GDMI (рис. 2в). Поэтому в дальнейшем анализе данных радиозондирования ионосферы будем использовать комбинированное (зональное) разбиение высотного профиля электронной концентрации в модели GDMI. Вне зоны аврорального овала на субавроральных и средних широтах будет использоваться профиль Bil-2000, а внутри профиль NeQuick.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Меридиональная исследовательская радиотрасса наклонного радиозондирования (НЗ) ионосферы ИСЗФ Норильск–Иркутск (2050 км) в спокойных условиях находится в субавроральной и среднеширотной зонах. Регистрация ионограмм НЗ выполнялась с использованием ЛЧМ технологии радиозондирования (линейно-частотный модулированный сигнал), для которой характерно высокое разрешение модовой струк-

туры волнового поля. Во время геомагнитного возмущения экваториальная граница аврорального овала смещается к югу, и радиотрасса может пересекать ее в области отражения зондирующих волн. Т.е. она становится существенно трансавроральной, что должно проявиться в изменении характера прохождения радиоволн и структуре ионограмм НЗ. 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 умеренной ионосферной бури (21–22.09.2018, максимальный индекс $ap \sim 35$ нТл) [Yermolaev and Yermolaev, 2010]. Подробное описание динамики гео- и гелиофизических индексов в рассматриваемый период дано в [Куркин и др., 2022].

Из представленных в статье данных можно выделить несколько хорошо выраженных эффектов в результатах радиозондирования ионосферы, связанных с ионосферным проявлением геомагнитной бури — ионосферной бурей, наиболее ярко и динамично проявляющейся в области $F2$ ионосферы [Danilov and Laštovička, 2001]. Временные зависимости МНЧ 1F2 (точками черного

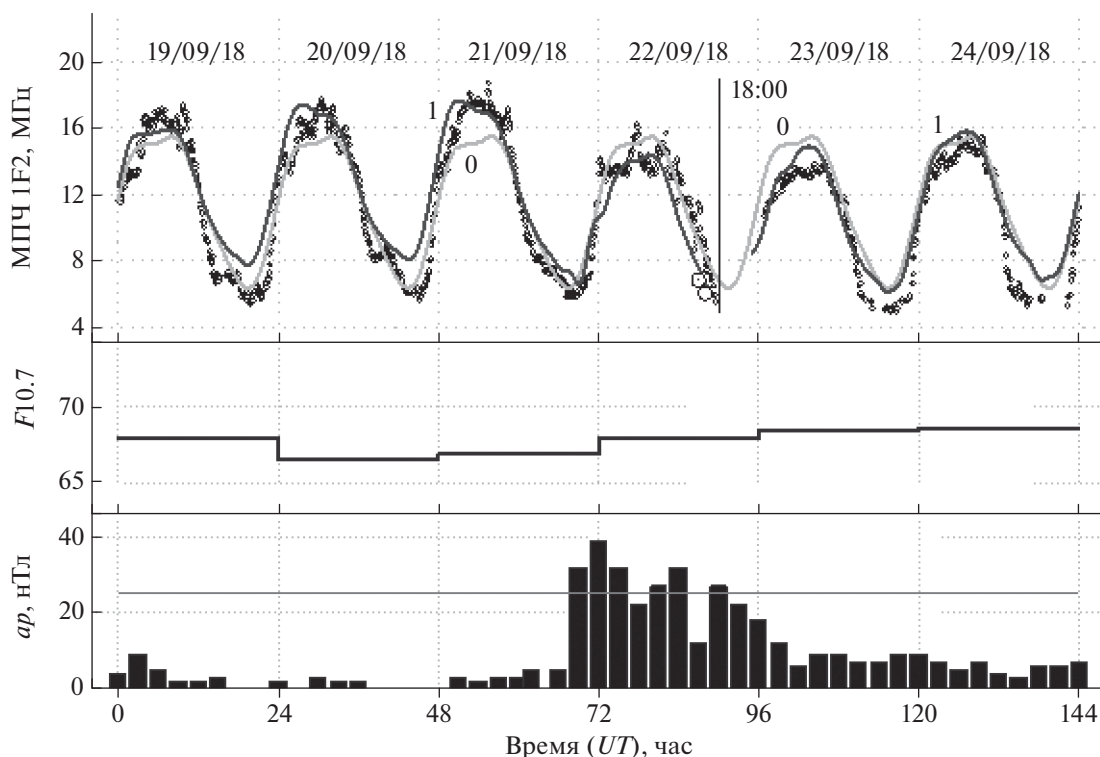


Рис. 3. Временной ход МПЧ 1F2 на трансавроральной радиотрассе Норильск–Иркутск 19.09.2018 – 24.09.2018: полые кружочки — экспериментальные значения, кривая 0 — среднемесячные и кривая 1 — суточные зависимости для модели ионосферы GDMI. Нижние панели отражают временную зависимость гелиогеофизических данных: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

цвета) и МПЧ 1F2 для среднемесячных данных (кривая 0), и в гелиогеофизических условиях конкретных дней (кривая 1), представлены на рис. 3 (верхняя панель). В локальное околополуденное время 22.09.2018 наблюдается существенное уменьшение экспериментальных значений, что физически соответствует отрицательной фазе ионосферной бури, характеризующейся возрастанием высоты максимума слоя $F2$ и, соответственно, обеднением электронной плотности внутри слоя. В ночных условиях наблюдается полное блокирование прохождения радиоволн через ионосферу (эффект “blackout” с 17:30 UT 22.09.2018 по 00:00 UT 23.09.2018) и отсутствие следов кратных мод (рис. 6, верхние панели) в дневных условиях 22.09.2018. Поведение гелиогеофизических факторов — $F10.7$ и ap -индекса с 19.09.2018 — 24.09.2018 приведено на нижних панелях. В спокойные дни с 19.09.2018 по 21.09.2018 наблюдается постепенный рост максимальных значений МНЧ 1F2 в локальное околополуденное время, хотя уровень потока солнечного радиоизлучения $F10.7$ и 3-х часовой ap -индекс практически постоянны на всем интервале регистрации. Заметные изменения условий распространения радиоволн на экспериментальной радиотрассе начались около 02:30 UT 22.09.2018, через ~ 4.5 ч после начала главной фазы бури, что выразилось в снижении МНЧ 1F2 на ~ 4 МГц ($\sim 15\%$) относительно предыдущего дня (~ 2.5 МГц относительно среднемесячного фона). В течение дневных часов 22.09.2018 она оставалась пониженной на $\sim 20\%$ со значительными вариациями. На следующую ночь 22.09.2018 с 17:30 UT наступила блокировка (эффект “blackout”) прохождения диагностического излучения на радиотрассе, которая продолжалась до 00:00 UT 23.09.2018. В последующие

сутки хорошо наблюдается восстановление состояния ионосферы, выражающееся в росте максимальных дневных значений МНЧ 1F2, практически, до предбурового уровня 19.09.2018.

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты характеристик наклонного радиозондирования ионосферы: МПЧ (как точки смыкания семейства нижнеугловых и верхнеугловых лучей, рисунок 6), ионограммы НЗ, оценки энергетических параметров прохождения радиоволн выполнялись на основе базовых уравнений геометрической оптики [Кравцов и Орлов, 1980] для среды, задаваемой моделью ионосферы высоких широт: СМИ-88 в [Кища и др., 1993] и GDMI в данном случае.

Как видно из рис. 4, где представлены широтные зависимости критической частоты $foF2$ для долготы средней точки радиотрассы, в спокойных условиях 20.09.2018 главный ионосферный провал в модели GDMI находится на широте Норильска (левая панель рис.4), а в геомагнитно-возмущенный день 22.09.2018 смещается на более низкие широты (правая панель рис.4). Соответственно смещается и полярный овал, в котором и формируется авроральный E -слой. Для сентября 2018 г., года низкой солнечной активности, сглаженные среднемесячные значения числа солнечных пятен $Rms=6.5$ и поток радиоизлучения $Fms=70$. Рассчитанные значения среднемесячной МПЧ 1F2 представлены кривой 0, а в реализации для гелиогеофизических условий конкретных дней кривой 1 на рис. 3. Хорошо заметен рост дневных значений МПЧ 1F2 в магнитоспокойный интервал с 19.09 по 21.09 как в экс-

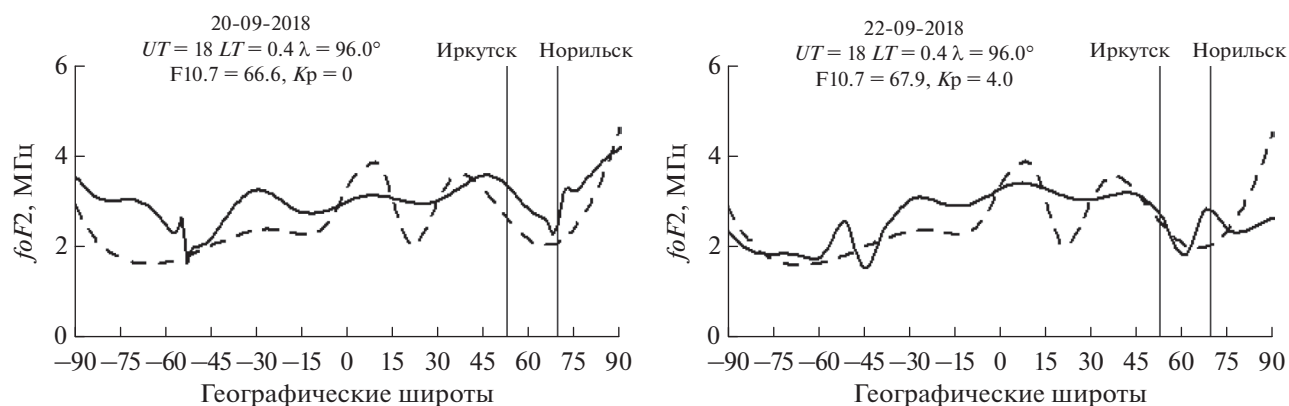


Рис. 4. Положение ГИП и аврорального овала в широтной зависимости $foF2$ по долготе средней точки радиотрассы Норильск — Иркутск в спокойных условиях 20.09.2018 (левая панель) и во время ионосферной бури 22.09.2023 (правая панель) в модели GDMI на 18:00 UT. Модель GDMI — сплошная, IRI — пунктирная кривая.

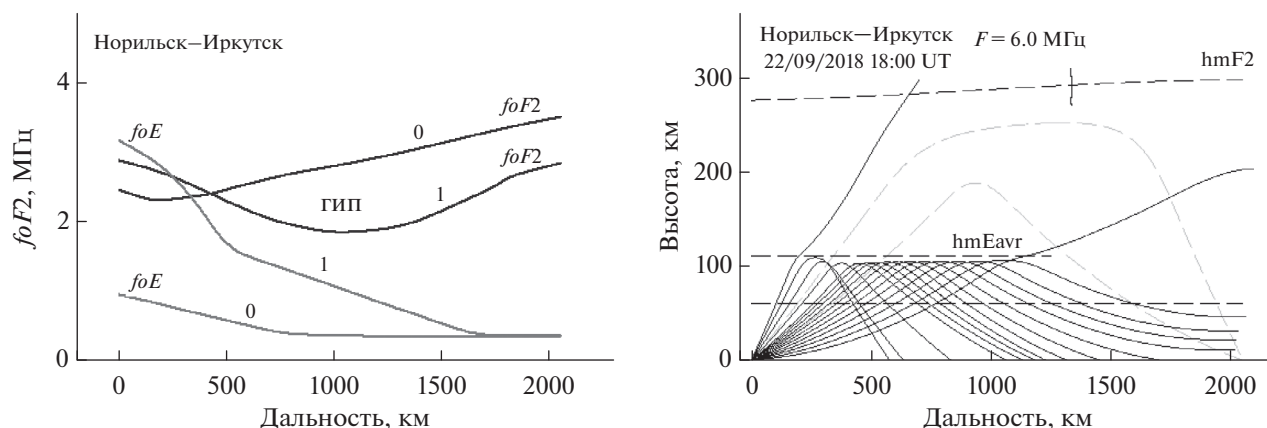


Рис. 5. Левая панель — положение ГИП и аврорального слоя E ионосферы в спокойных условиях (20.09.2018 18:00 UT, кривые 0) и в возмущенных (22.09.2018 18:00 UT, кривые 1). Правая панель — лучевые траектории для частоты 6 МГц в модели GDM1, иллюстрирующие эффект “blackout” на радиотрассе наклонного радиозондирования Норильск — Иркутск во время ионосферной бури.

перименте, так и в расчетных значениях по модели GDM1, а также существенное расхождение среднемесячных и посуточных результатов, особенно в локальное полуденное время. Рассчитанные с учетом текущих гелиогеофизических условий МПЧ 1F2 значительно лучше соответствуют экспериментальным данным в целом, а суточная динамика отражает инерционные свойства ионосферы. Однако в ночных условиях наблюдается некоторое расхождение расчетных и экспериментальных значений МПЧ 1F2. Экспериментальные результаты ниже модельных оценок и ближе к среднемесячным данным моделирования.

Модельные расчеты с текущими гелиогеофизическими данными подтверждают наличие интервала времени, когда блокируется прохождение зондирующего излучения модой 1F2 на радиотрассе, а именно с 18:00 по 23:00 UT 22.09.2018 (рис. 3, кривая 1). В целом, расчетный интервал блокировки несколько меньше, чем наблюдается в эксперименте, но важно, что модель GDM1 позволяет принципиально описать такую неординарную ситуацию, причем, только в режиме с текущими гелиогеофизическими данными. В среднемесячном режиме расчетов данный эффект отсутствует.

Более детально состояние ионосферы на время 18:00 UT для 20.09.2018 и 22.09.2018 представлено на левой панели рис. 5. Кривые с индексом “0” отражают продольные по радиотрассе зависимости $foF2$ и foE для спокойных условий 20.09.2018, а с индексом “1” — для возмущенных 22.09.2018. Хорошо видны две особенности распределения электронной плотности в ионосфере в момент времени формирования эффекта

“blackout” (кривые 1): наличие ГИП в слое $F2$ с “дном” в области средней точки радиотрассы и сильная продольная неоднородность foE из-за присутствия авроральной компоненты в ионизации слоя E ионосферы. Анализ на основе лучевых расчетов для частоты 6 МГц показывает (рис. 5, правая панель), что блокировка прохождения связана именно с наличием аврорального слоя E . Траектории нижнего и верхнего лучей моды 1F2 для невозмущенных условий с уверенной регистрацией ионограммы НЗ показаны пунктирными, а реальная ситуация с экранирующим действием аврорального E -слоя сплошными линиями. Хорошо видно, что для полной блокировки прохождения радиоволн важен не только фактор достаточно высокой величины ионизации на высотах E -слоя ионосферы, но и сильный продольный градиент электронной плотности авроральной составляющей, приводящий к формированию механизма “рикошетирующих” (проходящих в точке разворота над земной поверхностью) лучевых траекторий. Следует отметить локализованный характер эффекта блокировки — в других точках земной поверхности прохождение, пусть и частичное, вполне может осуществляться. Глобальная блокировка, по-видимому, может иметь место только при очень сильных геомагнитных возмущениях, затрагивающих и D -область ионосферы, и определенной геометрии положения точки излучения к экваториальной границе аврорального овала.

Эффект деградации кратных отражений на ионограммах НЗ в дневных возмущенных условиях (рис. 6), по всей видимости, также связан с продольной неоднородностью электронной плотно-

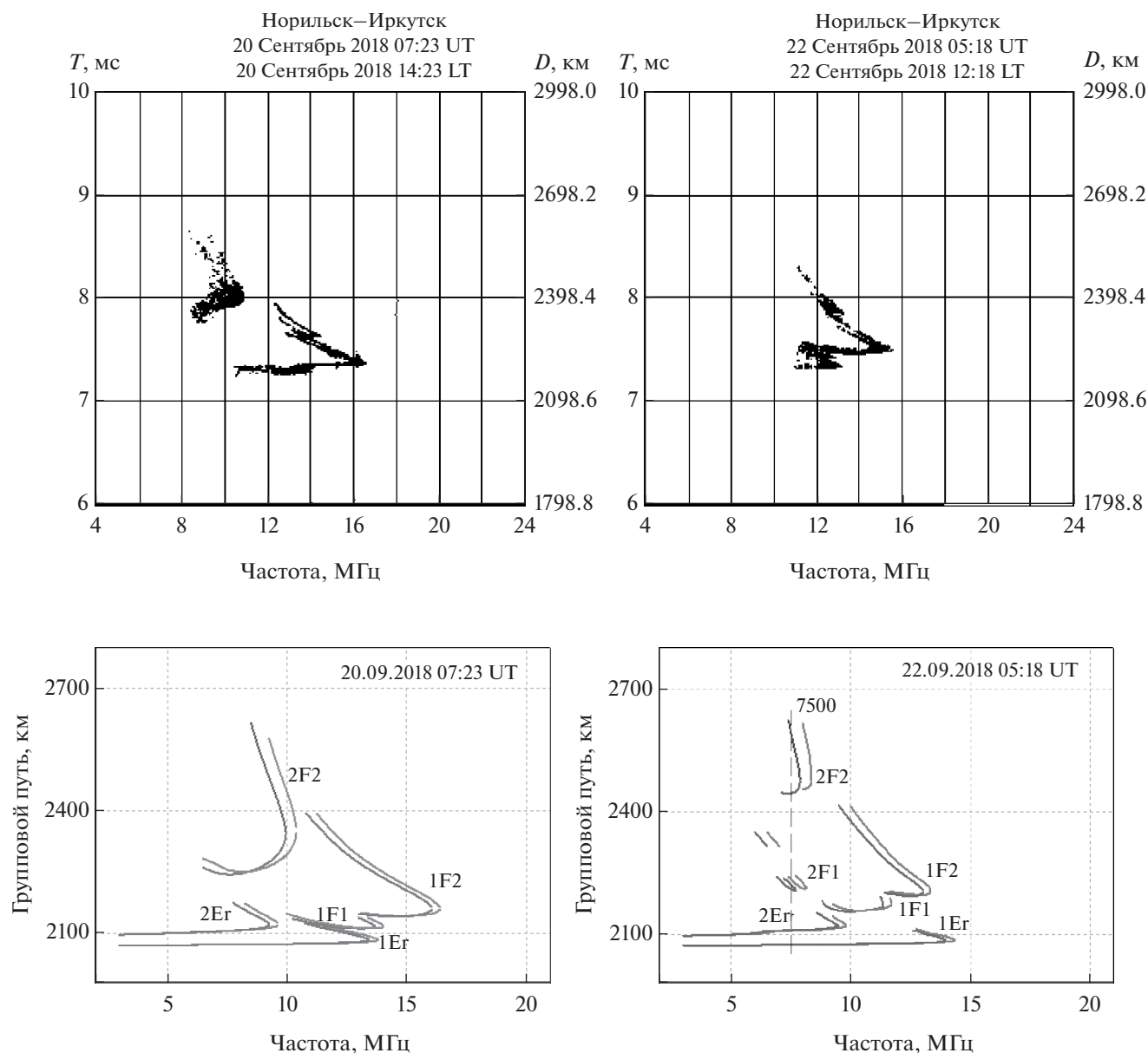


Рис. 6. Ионограммы наклонного радиозондирования ионосферы в локальное околополуденное время в спокойных геомагнитных условиях 20.09.18 07:23 UT и во время геомагнитной бури 22.09.18 05:18 UT — экспериментальные (верхняя панель) и синтезированные в модели GDM (нижняя панель).

сти на рассматриваемой радиотрассе. Вторым фактором может быть увеличение поглощения на первом скачке при прохождении зондирующих радиоволн, наиболее значимо испытывающему наличие авроральной составляющей в *E*-слое в дополнение к естественной электронной концентрации на высотах 110–120 км.

На рис. 6 представлены результаты регистрации ионограмм НЗ в локальное дневное время [Куркин и др., 2022]: в спокойном дне 20.09.2018

14:23 LT и возмущенном 22.09.2018 12:18 LT. В первом случае в данных радиозондирования хорошо выражен след двукратного отражения от ионосферы — моды 2F2 с наличием нижнелучевых и верхнелучевых компонент волнового поля (рис. 6, левая верхняя панель). В период ионосферного возмущения в модовой структуре волнового поля кратные отражения полностью отсутствуют (рис. 6, правая верхняя панель). Синтезированные ионограммы приведены на нижних панелях. Частотная зависимость модовой струк-

туры волнового поля для слоя $F2$ в спокойных условиях (рис. 6, левая нижняя панель) довольно хорошо соответствует структуре экспериментальной ионограммы НЗ, в частности, МНЧ 1F2 и МПЧ 1F2 в обоих случаях очень близки по значениям. Также видно характерное проявление влияния слоя $F1$ на след, сформированный при отражении от слоя F ионосферы в целом. Аналогичная ситуация и с кратным отражением. Частотный след рассчитанной моды 2F2 хорошо выражен и соответствует эксперименту, в частности, МНЧ 2F2 и 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 (мода 2F2) и это, главным образом, обусловлено поглощением, сильно возрастающим при уменьшении частоты, поскольку теоретически следы существуют и на более низких частотах, в том числе, и при отражении от слоя $F2$. Отсутствие следов отражения от слоя E ионосферы на ионограммах НЗ объясняется двумя причинами [Куркин др., 2022]: географическим фактором — дальностью радиотрассы, превышающей 2000 км, и наличием возвышенности вблизи пункта излучения (Норильск), экранирующей излучение с углами близкими к нулевым (мода 1E). Отсутствие моды 2E является общим случаем и определяется практически полным поглощением волнового поля в E -слое при двукратном отражении [Крашенинников, 2018; Крашенинников и Шубин, 2020] даже в спокойных условиях. В возмущенный день структура синтезированных следов кратных отражений кардинально меняется (рис. 6, правая нижняя панель). След двукратного отражения от F -области фрагментируется из-за сильной продольной неоднородности среды, в частности, вследствие возрастания благоприятных условий для захвата волнового поля в межслоевой EF канал.

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 декаметровых радиоволн через ионосферу [Дэвис, 1973; Крашенинников и Шубин, 2020; Ruck and Themens, 2021]. Параметр пространственной расходимости можно оценить по свойствам функции группового пути на выбранной частоте моды в задаче с граничными условиями — чем больше величина группового пути и больше его производная по частоте в абсолют-

ном значении, тем больше величина ослабления и, соответственно, меньше амплитуда волнового поля. Это обстоятельство хорошо видно из синтезированных ионограмм на рис. 6. Для всех синтезированных фрагментов в структуре кратного отражения от ионосферы в возмущенных условиях характерно как общее увеличение группового пути мод, так и характера изменчивости от частоты по отношению к спокойным условиям (рис. 6, нижние панели), что подтверждается и количественными оценками коэффициента переноса излучения — K_d^t при учете пространственной расходимости [Кравцов и Орлов, 1980]

$$K_d^t = \frac{1}{\sqrt{J}}, \quad J = \frac{nda}{n_0 da_0},$$

где da_0 и da — начальное и конечное сечения лучевой трубки, n — показатель преломления, J — лучевая расходимость. Даже для наиболее благоприятной ситуации нулевой производной группового пути по частоте для номинала 7500 кГц в нижнелучевой ветви следа 2F2 (отмечено на рис. 6, правая панель) он меньше, чем в спокойных условиях (рис. 6, левая панель): $0.348\text{e-}03$ и $0.468\text{e-}03$ соответственно. Т.е. в возмущенных условиях расходимость волнового поля возрастает, что естественно в условиях возрастающей неоднородности среды. Более сложная ситуация с ослаблением волнового поля, связанного с частотой соударений электронов. В возмущенных условиях в модели GDMI кроме увеличения продольной неоднородности на высотах E -слоя возрастает также и высота максимума слоя $F2$ — $hmF2$, что обуславливает более крутые ветви лучевых траекторий в задаче с граничными условиями и приводит к возрастанию углов выхода и прихода зондирующих волн. В примере ионограмм — рис. 6 такое возрастание для моды 2F2 составляет $\sim 10^\circ$. Следовательно, уменьшаются участки прохождения в слое E ионосферы. Так для номинала 7500 кГц коэффициенты переноса волнового поля для фактора поглощения в возмущенных и спокойных условиях равны: $0.386\text{e-}01$ и $0.884\text{e-}02$ соответственно. В целом, получается, что амплитуда волнового поля в возмущенных условиях для данного номинала в ~ 3 раза превышает аналогичный уровень для спокойных условий, что, в принципе, сравнимо по порядку величины. Учитывая, что в эксперименте спокойного дня (рис. 6, левая верхняя панель) след для данного номинала отсутствует, можно заключить, что вероятность его появления невелика и в реализации 22.09.2018 05:18 UT. В реальных условиях расчета энергетических параметров волнового поля кроме фундаментальных факторов ионосферного распространения радиоволн нужно учитывать и до-

полнительные аспекты системы радиозондирования ионосферы: антенны, эффективную мощность, частотную полосу излучения и уровень фонового электромагнитного шума.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целом, анализ данных радиозондирования на радиотрассе Норильск-Иркутск, пересекающей ГИП и авроральный овал во время ионосферного возмущения 21–22.09.2018 показал, в частности, что модель GDMI позволяет понять и принципиально смоделировать основные особенности условий распространения радиоволн как в магнитоспокойных условиях, так и в процессе развития ионосферной бури низкой (слабой) интенсивности. Модель достаточно хорошо отражает динамику особой точки ионограммы H3 – МПЧ 1F2 в суточном масштабе, в частности, наиболее наглядно в локальное околополуденное время, как в спокойный период, так и в фазах развития бури и после бурового восстановления. Кроме этого, модель GDMI позволяет принципиально объяснить формирование эффекта “blackout” из-за наличия, сгенерированного в ночных условиях аврорального E -слоя, хотя и в несколько меньших временных границах блокировки прохождения радиоволн. Наиболее вероятной причиной может быть несколько заниженная величина модельной электронной плотности аврорального E -слоя, что также отмечалось выше для случаев:

а) сравнительного анализа результатов измерений радара некогерентного рассеяния и теоретического представления физической моделью AIM-E – рис. 2а и 2б;

б) по данным ионозонда ст. Москва (рис. 1), для которого GDMI значение f_oE_{avg} равняется 1.5 МГц, что значительно меньше наблюдаемого – 6 МГц.

Модель GDMI дает меньшие значения для плазменной частоты в максимуме аврорального слоя E , чем показывают приведенные данные экспериментальных измерений. Но здесь следует учитывать, что и эксперимент, и расчеты в теоретической модели AIM-E [Nikolaeva et al., 2021] и результаты в супербурю 29.11.2003 представлены в один момент времени, а эмпирическая модель GDMI является усредненной для интервала времени в три часа, как формируются индексы геомагнитной возмущенности. Тем не менее, то обстоятельство, что временной интервал эффекта полной блокировки прохождения радиоволн на исследуемой трансавроральной радиотрассе, рассчитанный по модели GDMI, меньше экспериментального, действительно может указывать

также на несколько заниженную электронную плотность в авроральном E -слое. Другими проблемными обстоятельствами модели GDMI на данном этапе являются:

а) фактор наиболее вероятного высотного положения аврорального E -слоя (возможно в зависимости от индекса геомагнитной возмущенности) и

б) корректное построение высотного профиля электронной плотности в глобальном масштабе – зональный характер базовой функции высотного профиля N_e не обеспечивает физически обоснованного плавного перехода на границах зон.

Следовательно, в этих аспектах 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 продольной неоднородности авроральной компоненты электронной плотности, общего увеличения поглощающих свойств ионосферной плазмы на высотах E -слоя ионосферы и особенностей ионосферного распространения радиоволн объясняет деградацию следов кратных отражений в дневных возмущенных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Это исследование было поддержано бюджетным финансированием института.

Никакие дополнительные гранты для осуществления этого исследования не были получены.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.И. Полярные и магнитосферные суббури // М: Мир, 320 с. 1971.
- 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 аэрономия. Т. 45. № 1. С. 84—91. 2005.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы // М: Наука, 527 с., 1988.
- Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре—ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космич. исслед. Т. 42. №5. С. 456—488. 2004.
- Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 366—373. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030070>
- Деминов М.Г., Шубин В.Н., Бадин В.И. Модель критической частоты E-слоя для авроральной области // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 5. С. 610—617. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021050059>
- Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 502 с. 1973.
- Кица П.В., Крашенинников И.В., Лукашкин В.М. Моделирование многочастотного распространения КВ-сигналов в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 31. № 1. С. 158—162. 1993.
- 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 аэрономия. Т. 57. № 6. С. 774—782. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0016794017060050>
- 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 аэрономия. Т. 60. № 2. С. 220—228. 2020. <https://doi.org/10.31857/S001679402002008X>
- Крашенинников И.В., Шубин В.Н. Проявление аврорального E-слоя в данных радиозондирования ионосферы в условиях геомагнитной бури низкой интенсивности (трансавроральная радиотрасса) // Гелиогеофизические исслед. Т. 42. С. 29—39. 2024.
- Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 2. С. 245—256. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020110>
- Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 4. С. 461—473. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0016794019040151>
- Akasofu S.I. The dynamic aurora // Sci. Am. (ISSN 0036-8733). V. 260. P. 90—97. 1989.
- Besprozvernaya A.S., Shirochikov A.V. and Shchuka T.I. The dynamics of the high latitude ionospheric E region // J. Atmos. Terr. Phys. V. 42. P. 115—123. 1980. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(80\)90071-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(80)90071-9)
- Bilitza D., Radicella S., Reinisch B., Adeniyi J., Mosert M., Zhang S., Obrou O. New B0 and B1 models for IRI // Adv. Space Res. V.25. N. 1. P. 89—95. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00902-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00902-3)
- 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. V.15. P. 418—429. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016SW001593>
- Cameron T.G., Fiori R.A.D., Warrington E.M. et al. Evaluation of the effect of sporadic-E on high frequency radio wave propagation in the Arctic // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 228. 105826. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105826>
- Danilov A.D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 2. № 3. P. 209—224. 2001.
- Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The High-Latitude Ionosphere and its Effects on Radio Propagation // Cambridge University Press. New York. 617 p. 2003. <https://doi.org/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. V. 59. N. 2. P. 237—248. 1997. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(96\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00031-4)
- Nava B., Conson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 70 N. 15. P. 1856—1862. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.015>
- Nikolaeva V., Gordeev E., Sergienko T. et al. AIM-E: E-Region Auroral Ionosphere Model // Atmosphere, 12. 748. 2021. <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. 19. e2021SW002901. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021SW002901>
- Yermolaev Yu.I. and Yermolaev M.Yu. Solar and Interplanetary Sources of Geomagnetic Storms: Space Weather Aspects // Izv. Atmos. Ocean Phys. V. 46. N. 7. P. 799—819. 2010.

Influence of Large-Scale Auroral Inhomogeneities on the Radio Waves Passage under Conditions of Moderate Geomagnetic Storm

I. V. Krasheninnikov^{1, *}, V. N. Shubin^{1, **}

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, the Ionosphere, and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Troitsk, Russia*

^{*}*e-mail: krash@izmiran.ru*

^{**}*e-mail: shubin@izmiran.ru*

We analyze the experimental results of multi-frequency oblique radio sounding of the ionosphere on the meridional transauroral radio path Norilsk-Irkutsk during the moderate geomagnetic storm on September 22, 2018 with a maximum value of the disturbance index $K_p \sim 5$. Based on the Global Dynamic Model of the Ionosphere (GDMI) ionosphere model, which takes into account the dynamic state of the basic large-scale structures of the polar ionosphere: the main ionospheric trough (GIP), polar oval and auroral E -layer, general correspondence of maximum observed frequencies (MOF 1F2) and calculated maximum usable frequencies (MUF 1F2) variations in the geomagnetic disturbance dynamics is shown. A physical explanation is given for the recorded phenomenon of complete blocking the radio waves transmission in local night conditions ("blackout"). The main factor of this effect manifestation is a presence of the auroral layer E in the ionosphere, generated by precipitating charged particles, highly inhomogeneous in the longitudinal section of the radio path. Under daytime conditions, the presence of auroral component in the E -layer leads to a weaker effect of degradation the multiple reflections traces on oblique radio sounding ionograms.

Keywords: ionosphere, auroral ionosphere, radio wave propagation, oblique radio sounding of the ionosphere.