

УДК 550.388.2

РЕАЛЬНЫЕ И РАСЧЁТНЫЕ ИОНОГРАММЫ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОТРАССАХ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 7–8 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА

*Д. В. Благовещенский*¹, *Г. А. Жбанков*², *О. А. Мальцева*^{2*}

¹ Санкт-Петербургский госуниверситет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург;
² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Ионограммы радиотрасс наклонного зондирования ионосферы Кипр—Ловозеро (Мурманская обл.) и Ловозеро—ст. «Горьковская» (Ленинградская обл.) анализируются с привлечением данных магнитометров и риометров. Рассматривается поведение максимальных наблюдаемых частот слоёв F_2 и E_s в период магнитной бури 07–08.09.2017. Данная буря имела специфическую структуру: её можно условно разделить на первую и вторую бури. Главные результаты работы сводятся к следующему. Проявление первой бури сопровождается существенным ростом поглощения и частым отсутствием сигналов на трассах, в то время как для второй бури характерны повышенные значения максимальной наблюдаемой частоты слоя E_s и наличие сигналов. На среднеширотной трассе Кипр—Ловозеро сигналы распространяются как модами $1F_2$, $2F_2$, $3F_2$, так и модами $2E_s$, $3E_s$. На субполярной трассе Ловозеро—станция «Горьковская» во время возмущения распространение сигналов происходит главным образом посредством отражения от очень интенсивного спорадического слоя E_s . Моделирование распространения коротких радиоволн с использованием модели IRI-2016, адаптированной к данным вертикального зондирования, впервые позволило получить соответствие с реальными ионограммами наклонного зондирования, в том числе в случаях наличия мод M и N , а также триплетов, в спокойных и возмущённых условиях.

ВВЕДЕНИЕ

Физика околоземного пространства, особенно с точки зрения космической погоды, в настоящее время привлекает значительное внимание исследователей. Космическая погода — это динамические, сильно меняющиеся характеристики околоземной среды, которая включает в себя Солнце, межпланетное пространство и систему магнитосфера—ионосфера—атмосфера. Неблагоприятные изменения космической погоды влияют на надёжность работы как космических аппаратов, так и различных систем связи, навигации, энергетических линий и т. д. Магнитосферные бури вызывают геомагнитные возмущения, следствием которых являются разнообразные процессы в ионосфере Земли, возбуждающие широкий спектр неоднородностей электронной концентрации. Однако физическая природа многих процессов ещё недостаточно изучена. Ионосферное возмущение продолжает оставаться наиболее сложным явлением в верхней атмосфере. При этом недостаточно внимания уделяется эффектам, возникающим при распространении электромагнитных волн различных диапазонов (от очень низких до высоких частот), хотя известно, что они реагируют на малейшие изменения состояния среды. Поэтому необходим анализ данных по всем возможным проявлениям солнечно-магнитосферно-ионосферных связей и их воздействию на распространение радиоволн в периоды возникновения бурь.

Вопросы распространения коротких волн в последнее время представляются актуальными не только с научной, но и с практической точки зрения [1]. В первую очередь они важны для

* mal@ip.rsu.ru

обоснованной организации коротковолновой радиосвязи [2] (например, при освоении Арктического шельфа), а также для решения проблем навигации и загоризонтной радиолокации. Учитывая современные технологические возможности, коротковолновая радиосвязь является серьёзной альтернативой спутниковой связи, особенно вследствие установленной в ходе исследований уязвимости спутниковых систем связи в военное время. Следует добавить, что последние годы характеризуются существенным развитием моделирования ионосферы и распространения радиоволн в ней на основе проверенных экспериментальных данных, проведением хорошо спланированных комплексных экспериментов и лучшей доступностью экспериментальных данных [1].

Моделирование характеристик ионосферного радиоканала необходимо осуществлять на временных интервалах от 30 мин до нескольких часов. Для станций дальней радиосвязи (коротковолновых радиостанций) предполагается разработать встроенные системы прогнозирования распространения коротких волн, основанные на моделях, которые корректируются по данным наклонного зондирования ионосферы. Особое внимание в этом плане необходимо уделять исследованию влияния геомагнитных возмущений на ионосферное распространение коротких радиоволн.

Детальный обзор публикаций по моделированию ионосферы и распространению радиоволн приведён в работе [4]. В ней представлены результаты экспериментальных и модельных исследований распространения коротких волн в периоды геомагнитных возмущений, включая одно из сильнейших возмущений в октябре 2003 года, по данным наклонного зондирования на огромной территории от Англии до Магадана. Отличительной чертой этих исследований является использование сети зондов, излучающих сигналы с линейной частотной модуляцией. Показана роль аврорального овала и среднеширотного провала в создании условий для боковых отклонений сигналов от плоскости большого круга с аномально большими задержками. Даны примеры ионограмм, по которым можно диагностировать наличие таких сигналов. Такие условия были смоделированы с учётом отражений от овала и провала и рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях в окрестности южной кромки овала.

В работе [5] были продолжены эксперименты в той же долготной зоне, что и в работе [4], но с опорным пунктом в Ростове-на-Дону. Одним из самых примечательных явлений при распространении сигналов является образование z -образного возмущения на луче Педерсена дистанционно-частотной характеристики наклонного зондирования. В работе [4] такие отражения уже наблюдались и были приписаны реакции на прохождение акустико-гравитационных волн, детальное изучение этого явления проведено в работе [5]. На всех рассмотренных трассах почти всегда наблюдались квазипериодические вариации максимальной наблюдаемой частоты, амплитуда которых в дневное время могла достигать 2 МГц. Моделирование проводилось на основе модели IRI-2001 с учётом эффективного числа солнечных пятен $W_{\text{эф}}$. Перемещающееся ионосферное возмущение моделировалось наложением гармонической волны на фоновое распределение. Разница между рассчитанными и измеренными максимальными частотами не превышала 12%. Показано, что z -отражения действительно вызываются движением перемещающегося ионосферного возмущения, но условия его образования являются довольно жёсткими. Авторы работы [6] наблюдали аномальные (боковые) сигналы с задержками порядка $1 \div 2$ мс относительно прямого сигнала на трассе Магадан—Ростов-на-Дону. Для интерпретации результатов были привлечены механизмы распространения боковых сигналов за счёт боковой рефракции радиоволн на областях с повышенной электронной концентрацией и за счёт их рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях. Подчёркивается, что рассеяние радиоволн происходит на мелкомасштабных неоднородностях, сопровождающих крупномасштабные структуры.

В основном моделирование распространения радиоволн проводится на основе модели IRI, однако в некоторых работах дополнительно привлекаются и другие модели. Так, в работе [7]

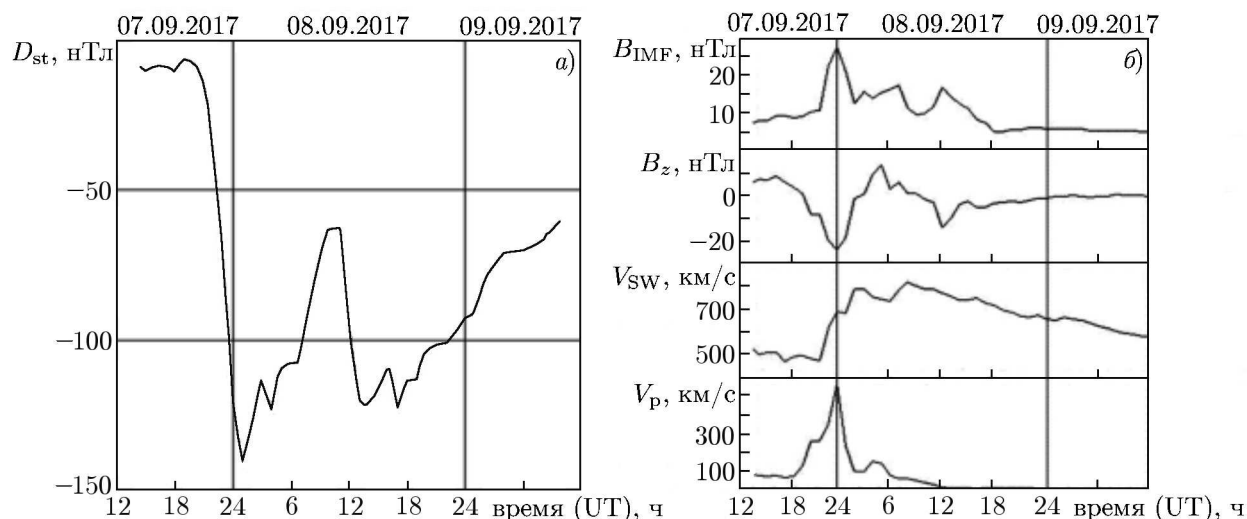


Рис. 1. Вариации параметров, характеризующих геомагнитную активность в период магнитной бури 7–8 сентября 2017 года

моделирование перемещающегося ионосферного возмущения, приводящего к z -образным перегибам на луче Педерсена на дистанционно-частотной характеристике, проводилось не только с использованием модели ионосферы IRI, адаптированной с помощью экспериментальных данных, но и глобальной (физической) модели ионосферы и плазмосферы (с заданием импульса термосферного ветра). Была выявлена роль локального изменения высоты максимума слоя F_2 , h_{mF_2} , объясняемого воздействием термосферного ветра, для чего достаточно превышения его скорости над фоновой на 25 м/с. В работе [3] дополнительно использовалась физическая модель GSM TIP. В работе [8] исследовано поведение ионосферных параметров (критической частоты f_oF_2 , высоты максимума h_{mF_2} и максимальной наблюдаемой частоты) на трассах Магадан–Иркутск и Норильск–Иркутск в сентябре 2005 года и декабре 2006 года (период с низкой солнечной активностью). В периоды основных фаз магнитных бурь наблюдались волновые возмущения с периодами 2–4 ч. Эти возмущения сопровождалось изменениями величины h_{mF_2} в пределах 40–100 км и частоты f_oF_2 до 1,5–2,0 МГц, приводя к соответствующим вариациям максимальной наблюдаемой частоты. Возмущения связывались с акустико-гравитационными волнами, генерируемыми в авроральной зоне и распространяющимися в экваториальном направлении. Среди особенностей поведения ионосферы в декабре 2006 года отмечены сильные положительные возмущения на всех станциях вертикального зондирования и постоянное наличие слоя E_s на ионограммах для обеих трасс. В работе [9] представлены результаты наблюдений с октября 2015 года по март 2016 года. Основной упор сделан на модификацию аппаратуры и наблюдения крупномасштабных неоднородностей на трассах Норильск–Торы, Магадан–Торы и Хабаровск–Торы. Средняя относительная амплитуда крупномасштабных неоднородностей изменялась от 7,2% до 27,4%, их средние периоды — от 1,5 до 3,4 часа.

Целью данной работы является исследование специфики воздействия ионосферного возмущения магнитной бури 7–8 сентября 2017 года на распространение декаметровых радиоволн по данным ионограмм наклонного зондирования ионосферы. В отличие от работ [3–9], исследование относится к европейской части России и к периоду, характеризующемуся низкой солнечной активностью. Он повторяет период 11-летней давности, когда проявились новые особенности поведения ионосферы, не отражённые эмпирическими моделями. Анализ ионограмм проводился на двух радиотрассах наклонного зондирования с использованием данных магнитометров и риометров.

Главной задачей является рассмотрение поведения минимальных наблюдаемых частот слоёв F_2 и E_s за период протекания бури. При этом естественно ожидать, что условия распространения радиоволн в спокойных и возмущённых условиях будут отличаться. Далее, представляет интерес смоделировать условия распространения радиоволн по модовой структуре и характеру самих сигналов во время бури.

1. ХАРАКТЕР ИССЛЕДУЕМОЙ БУРИ



Рис. 2. Схема радиотрасс наклонного зондирования ионосферы, использованных в эксперименте

в 01:00 и 14:00 UT, что совпадает с положением минимумов индекса D_{st} . Скорость солнечного ветра резко возрастает с развитием первой бури, но для второй бури данный эффект отсутствует. Резкий рост потока протонов также имеет место только для первой бури. Таким образом, существует определённое отличие в характере поведения параметров для первой и второй бурь. Поэтому в принципе можно ожидать и определённых отличий в характере воздействия первой и второй бурь на ионосферу и распространение радиоволн. Эти отличия будут оценены качественно и количественно.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Как указывалось выше, цель данной работы — установить особенности условий распространения радиоволн на двух трассах наклонного зондирования во время специфической геомагнитной бури 7–8 сентября 2017 года. Первая трасса Кипр—Ловозеро (Мурманская обл.) имеет длину 3 600 км, является среднеширотной и частично субполярной. Вторая трасса Ловозеро—ст. «Горьковская» (Ленинградская обл.) имеет длину 900 км, является высокоширотной и полностью субполярной. Схема радиотрасс представлена на рис. 2; можно видеть, что для рассматриваемых трасс $LT = UT + 3$ ч. Конечные точки трасс имеют следующие координаты: Кипр ($35,00^\circ$ с. ш., $34,00^\circ$ в. д.), Ловозеро ($67,97^\circ$ с. ш., $35,02$ в. д.), ст. «Горьковская» ($60,27^\circ$ с. ш., $29,38^\circ$ в. д.).

Обе трассы включают в себя общий пункт Ловозеро, расположенный на исправленной геомаг-

нитная буря 7–8 сентября 2017 года обладала специфической структурой. В преобладающем числе случаев во время магнитных бурь индекс D_{st} имеет единственный минимум; во время рассматриваемой бури индекс D_{st} имел два минимума примерно одинаковой интенсивности (см. рис. 1а). Разнесение по времени между минимумами составляло около 13 ч, первый минимум имел место примерно в 01:00 UT, а второй — в 14:00 UT 8 сентября 2017 года. Следовательно, исследуемую бурю можно условно разделить на две части: первая и вторая бури. На рис. 1б для рассматриваемой бури по спутниковым данным системы [10] приведены вариации четырёх параметров: величины межпланетного магнитного поля V_{IMF} и его B_z -компоненты, скорости солнечного ветра V_{SW} и потока протонов V_p . Из рис. 1 можно видеть, что величина V_{IMF} во время обеих бурь возрастает, при этом для первой бури возрастание сильнее. Значения B_z -компоненты достигают минимума примерно

нитной широте $63,6^\circ$. Поскольку эта широта близка к широте 65° , где зарождаются магнитные возмущения, то можно ожидать, что здесь будет иметь место существенное влияние рассматриваемой бури на характер распространения волн на обоих направлениях. На исследуемых трассах использовалась аппаратура наклонного зондирования ионосферы, разработанная в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте. Сеансы зондирования проводились круглосуточно с интервалом в 15 мин, однако в данной работе для большей наглядности будут использованы часовые значения. Полученные ионограммы наклонного зондирования анализировались для трёх дней — 6 сентября (спокойный день, $\Sigma K = 15$), 7 сентября (возмущённый день, $\Sigma K = 29$) и 8 сентября (сильно возмущённый день, $\Sigma K = 49$). Спокойный день выбран как опорный для сравнения его ионограмм с ионограммами двух возмущённых дней.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В данном разделе описывается поведение двух основных параметров распространения радиоволн: максимальной наблюдаемой частоты при отражении сигналов от слоя F_2 (МНЧ- F_2) или от слоя E_s (МНЧ- E_s). Максимальная наблюдаемая частота — очень важный параметр, поскольку в практике коротковолновой радиосвязи, как известно, оптимальная рабочая частота (ОРЧ) на трассе выбирается исходя из простого соотношения $ОРЧ = 0,85$ МНЧ.

3.1. Результаты по дням с различным уровнем геомагнитных возмущений

3.1.1. Спокойный день 6 сентября 2017 года

На рис. 3а представлены вариации максимальной наблюдаемой частоты для радиотрасс Кипр—Ловозеро и Ловозеро—ст. «Горьковская». Отражения сигналов от слоя F_2 и от спорадического слоя E_s имеют место почти круглосуточно. Из рис. 3а видно следующее. Магнитометр обсерватории Ловозеро демонстрирует отсутствие заметного возмущения. Быстрый рост H -компоненты в 12:00 UT даёт перепад всего в 100 нТл, что говорит об очень слабом возмущении, практически об его отсутствии. Однако в 12:00 UT риометр в обсерватории Соданкюла (Финляндия), расположенном недалеко от обсерватории Ловозеро (см. рис. 2), показывает всплеск поглощения до уровня 2 дБ. Этот всплеск вызван резким ростом потока X -лучей в 12:00 UT и потока энергичных протонов (по данным спутника GOES-15 за 6 сентября 2017 года [11]). Всплеск поглощения обуславливает отсутствие сигналов на ионограммах обеих трасс в 12:00 UT.

Трасса Кипр—Ловозеро имеет длину 3600 км. При такой длине на трассе могут распространяться моды $1F_2$, $2F_2$, $3F_2$ и так далее. Однако распространение с отражением от слоя E_s одним скачком происходить не может, т. к. оно имеет место только для радиотрасс, не превышающих 2000 км, и поэтому здесь наблюдаются моды $2E_s$ и $3E_s$. Анализ ионограмм наклонного зондирования показывает, что на данной трассе могут присутствовать также комбинированные моды. Например, первый скачок от слоя F_2 и ещё один скачок (второй) от слоя E_s . Это так называемая комбинированная мода типа $N(F-E)$. Другой комбинированной модой, где первый скачок является отражением от слоя F_2 с дальнейшим отражением от слоя E_s сверху и далее второй скачок вызван отражением от слоя F_2 , является мода типа $M(F-E-F)$ [12]. Далее, общий ход МНЧ- F_2 в спокойное время имеет классический характер: происходит её рост от утра к полудню и затем её спад к вечеру. Значения МНЧ- E_s возрастают от утра к полудню, но ближе к вечеру варьируются в широких пределах, скорее всего из-за нестабильности спорадического слоя E_s в средних широтах.

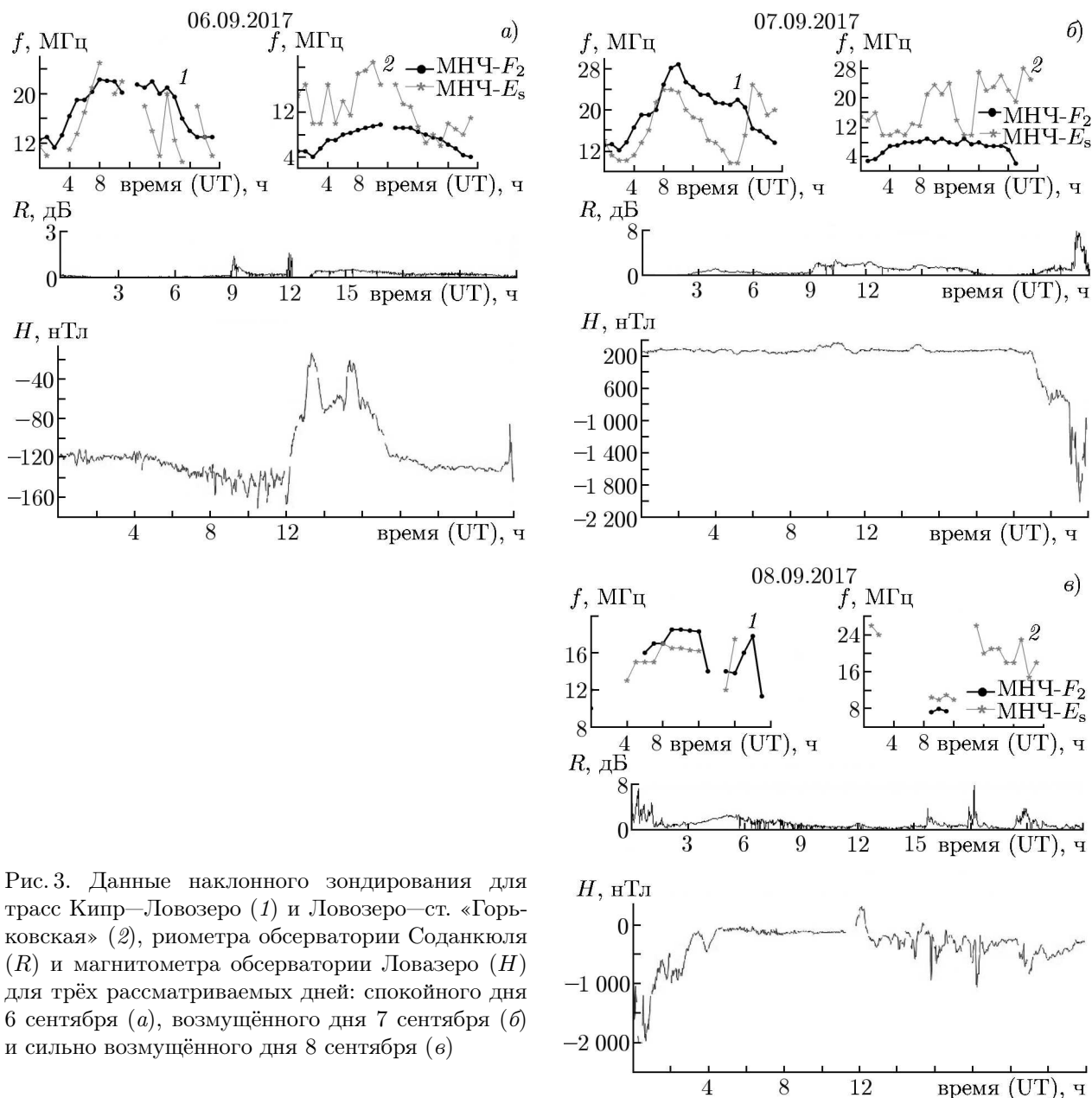


Рис. 3. Данные наклонного зондирования для трасс Кипр—Ловозеро (1) и Ловозеро—ст. «Горьковская» (2), риометра обсерватории Соданкюля (R) и магнитометра обсерватории Ловазеро (H) для трёх рассматриваемых дней: спокойного дня 6 сентября (а), возмущённого дня 7 сентября (б) и сильно возмущённого дня 8 сентября (в)

На трассе Ловозеро—ст. «Горьковская» с длиной 900 км для значений МНЧ- F_2 также наблюдается классический суточный ход, обычный для спокойных условий. Значения МНЧ- E_s максимальны в районе полудня (10:00 UT). Комбинированные моды отсутствуют.

3.1.2. Возмущённый день 7 сентября 2017 года

Основные результаты для 07.09.2017 представлены на рис. 3б. Магнитометр обсерватории Ловозеро показывает, что до 21:00 UT день был практически спокойным. В 21:00 UT началась мощная магнитная буря, для которой величина H -компоненты достигла минимального отрицательного значения $H_{\min} = -1900$ нТл в 23:30 UT. Уровень поглощения по риометру в обсерватории Соданкюля достиг максимума $A = 8$ дБ также в 23:30 UT. Поскольку уровень поглощения

достаточно высок, сигналы на ионограммах для двух трасс (верхняя панель) после 23:30 UT отсутствуют.

На трассе Кипр—Ловозеро, как видно из рис. 3б, с 00:00 до 18:00 UT наблюдались условия распространения сигналов, характерные для спокойного интервала. После 18:00 UT произошло резкое повышение значений МНЧ- E_s до 20÷25 МГц. Вообще говоря, подобный факт объясняется ростом критических частот слоя E_s в высоких широтах за несколько часов до начала развития магнитной бури. Во время бури после 23:30 UT имело место полное поглощение сигналов на трассе.

На высокоширотной трассе Ловозеро—ст. «Горьковская» с 00:00 до 21:00 UT распространение посредством отражения от слоя F_2 происходило в спокойных условиях. И только с началом возмущения и резким ростом поглощения с 21:00 до 24:00 UT отражение сигналов на трассе прекратилось. Вариации моды, связанной с отражением от слоя E_s , с 00:00 до 15:00 UT также характерны для спокойных условий, как на рис. 3а. Однако после 15:00 UT произошёл резкий рост значений МНЧ- E_s до 25 МГц, что также соответствовало росту МНЧ- E_s за несколько часов до начала бури. После 23:30 UT отражения от спорадического слоя исчезли из-за интенсивного поглощения.

3.1.3. Сильно возмущённый день 8 сентября 2017 года

Для 08.09.2017 результаты представлены на рис. 3в. Согласно данным магнитометра обсерватории Ловозеро магнитное поле в течение дня испытывало существенные вариации. В ночные часы с 00:00 до 03:00 UT продолжалось мощное возмущение, начавшееся накануне. Минимальное значение H -компоненты достигало $H_{\min} = -1900$ нТл в 00:40 UT. К моменту 04:30 UT возмущение закончилось, но в 12:00 UT возник новый всплеск в виде положительного возмущения $H = +450$ нТл. Этот всплеск по времени совпал с началом второй бури, определённым по индексу D_{st} (см. рис. 1). В соответствии с рис. 1 следовало бы ожидать проявление начала второй бури и в H -компоненте в 12:00 UT, но этого не произошло. Вместо интенсивного спада величины H , наподобие ночного в 00:40 UT, произошло несколько сравнительно небольших спадов: минимумы в 15:50 UT ($H_{\min} = -800$ нТл), 18:15 UT ($H_{\min} = -900$ нТл) и 21:00 UT ($H_{\min} = -500$ нТл). В этом принципиальное отличие второй бури в послеполуденном секторе от первой в полуночном секторе 8 сентября 2017 года. Риометрические данные показывают, что уровень поглощения имеет повышенные значения ночью в 00:00 и 01:00 UT и утром с 03:00 до 09:00 UT. Ровно в полдень, в момент начала второй бури, также фиксировался подъём уровня поглощения. И, наконец, во второй половине 8 сентября 2017 года имели место заметные всплески поглощения в моменты времени, точно соответствующие моментам минимумов H -компоненты магнитного поля.

На трассе Кипр—Ловозеро можно видеть существенные отличия в распространении сигналов по сравнению со спокойным днём 6 сентября и даже возмущённым днём 7 сентября. Прежде всего, отсутствие прохождения сигнала в довольно большом числе случаев зондирования. Так, отражения от слоя F_2 отсутствовали в интервалах 01:00÷05:00 UT и 20:00÷24:00 UT, а также в 14:00 UT. Отражения от слоя E_s приблизительно в эти же периоды времени также отсутствовали. Данные моменты соответствовали росту поглощения только в вечерние часы. Несоответствие, скорее всего, имело место из-за определённой удалённости риометра обсерватории Соданкюла от трассы, что во время сильного возмущения имеет существенное значение. Рост значений МНЧ- F_2 в интервале 16:00÷19:00 UT, скорее всего, был связан с началом заметной магнитной бури с $H_{\min} = -600$ нТл в 20:30 UT (рис. 3в). Подобный рост объясняется увеличением критической частоты слоя F_2 ионосферы за несколько часов до начала возмущения [13].

Трасса Ловозеро—ст. «Горьковская», как упоминалось выше, является высокоширотной и суб-

авроральной. Из рис. 3в можно видеть, что для неё имеются существенные отличия в распространении радиоволн по сравнению с двумя предыдущими днями. Во-первых, значения МНЧ- F_2 в 10:00 UT для 8 сентября заметно снизились и составили менее 8 МГц вместо 10 МГц для спокойного дня 6 сентября в это же время. Вообще говоря, этого следовало ожидать, исходя из общеизвестных представлений, что в возмущённое время критические частоты слоя F_2 уменьшаются. Во-вторых, мода, связанная с отражением от слоя F_2 , реально существовала только с 09:00 до 11:00 UT, как раз в промежутке, где риометрическое поглощение минимально (рис. 3б). Отражения от слоя E_s (МНЧ- E_s) отсутствовали в основном в промежутке от 03:00 до 09:00 UT, когда риометрическое поглощение было достаточно велико. После 15:00 UT значения МНЧ- E_s существенно увеличивались и варьировались около частоты 20 МГц до конца дня. Поскольку МНЧ- E_s достигали значений порядка 20 МГц и более, спорадические слои были достаточно интенсивны и сигналы не подвергались сильному поглощению в вечерние часы.

Таким образом, наиболее важные результаты анализа состоят в следующем. Распространение сигналов на среднеширотной трассе происходит отражением от слоя F_2 , достаточно часто отражением от слоя E_s и иногда посредством M и N мод. Проявление первой бури сопровождалось существенным ростом поглощения и часто отсутствием сигналов на трассах из-за поглощения. Для второй бури характерны повышенные значения МНЧ- E_s и наличие сигналов в её течении. В этом состоит отличие проявлений первой и второй бурь на трассах. На субполярной трассе во время возмущения распространение сигналов происходило главным образом посредством отражения от спорадического слоя E_s который был настолько интенсивен, что даже заметное поглощение почти не влияло на характер отражения сигналов от него.

3.2. Аномальное распространение сигналов на трассах

В соответствии с экспериментальными данными, нестандартные моды распространения в период 6–8 сентября 2017 года появлялись одинаково часто как в спокойное, так и в возмущённое время. Примеры аномальных ионограмм представлены на рис. 4. Данные ионограммы имеют следующие особенности.

На рис. 4а (трасса Кипр—Ловозеро 22:35 UT 07.09.2017) приведён пример бокового отражения. В данное время имело место развитие мощной геомагнитной бури и вероятность появления боковых отражений была наибольшая. На ионограмме можно наблюдать два основных отражения: моду типа $2E_s$, время распространения $\tau = 12,1$ мс, и моду $1F_2$, $\tau = 12,4$ мс. Скорее всего, боковое отражение имело место за счёт градиентов в ионосфере во время бури для моды $2E_s$ с параметрами $\tau = 13,5$ мс и $f = 12 \div 17$ МГц и одновременно для моды $1F_2$ с параметрами $\tau = 13,8$ мс и $f = 8,0 \div 13,5$ МГц. Общее время задержки между основной и боковой модами составляло 1,4 мс.

На рис. 4б (трасса Кипр—Ловозеро, 17:05 UT 06.09.2017) приведён пример мод типа M и N в спокойных магнитных условиях (рис. 3а). Сигналы распространялись следующими модами: $2E_s$, $\tau = 12,1$ мс, $3E_s$, $\tau = 12,2$ мс, $1F_2$, $\tau = 12,25$ мс; $N(F-E)$, $\tau = 12,3$ мс, $M(F-E-F)$, $\tau = 12,5$ мс, $2F_2$, $\tau = 12,6$ мс, $3F_2$, $\tau = 12,9$ мс, $4F_2$, $\tau = 13,2$ мс.

На рис. 4в (трасса Ловозеро—ст. «Горьковская», 20:47 UT 06.09.2017) показан пример триплета в спокойных магнитных условиях (рис. 3а). На ионограмме можно видеть три компоненты моды $1F_2$ при $f = 5,0$ МГц: обыкновенную, необыкновенную и z -моду. Появление трёх компонент характерно для высоких широт.

Рисунок 4г (трасса Ловозеро—ст. «Горьковская», 01:17 UT 07.09.2017) соответствует полупрозрачному слою E_s в спокойных магнитных условиях (рис. 3б). На ионограмме имеется дополнительное слабое отражение от слоя E_s , отвечающее времени распространения $\tau = 2,8$ мс под

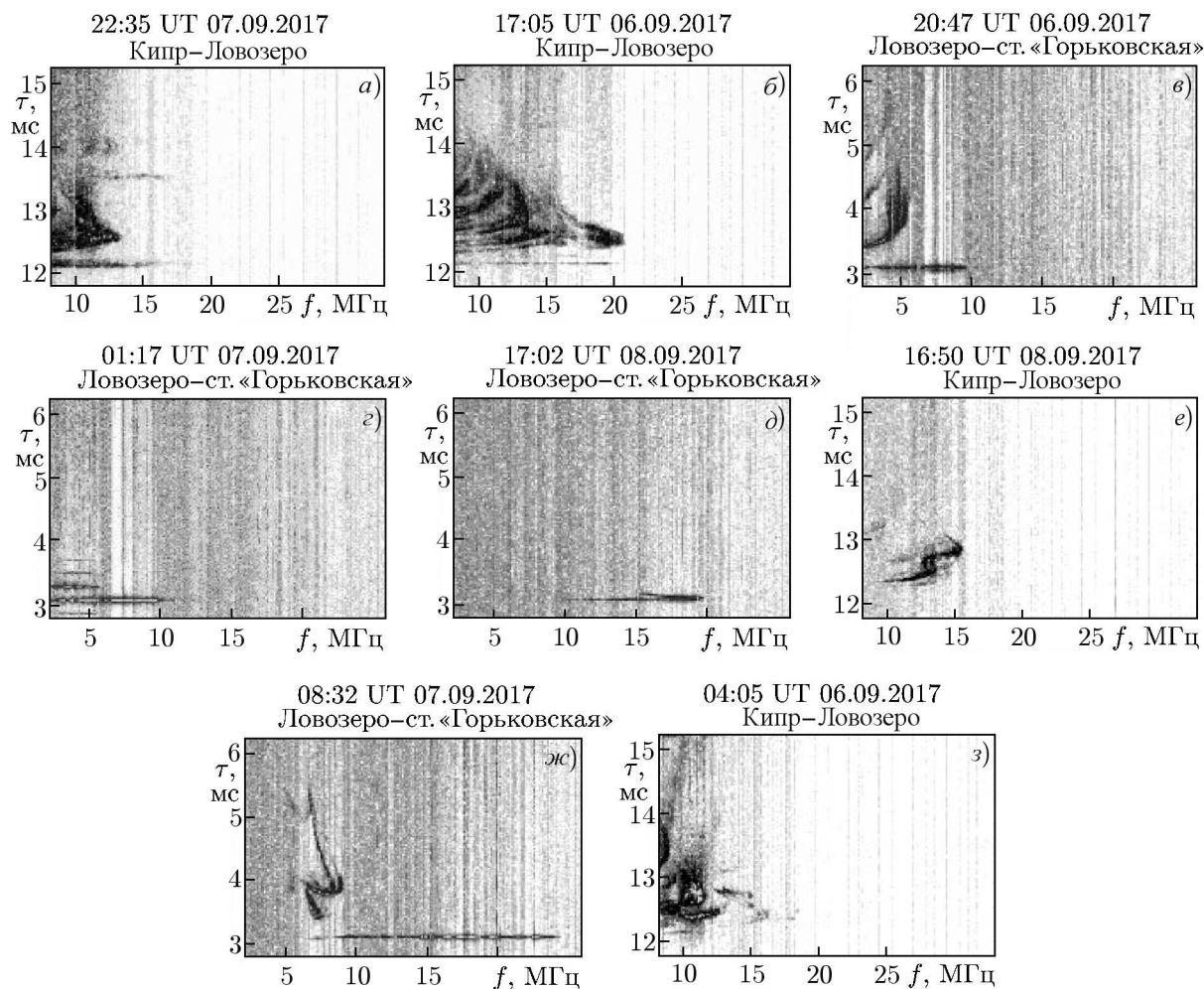


Рис. 4. Примеры аномальных ионограмм наклонного зондирования

основным мощным отражением от слоя E_s с $\tau = 3$ мс. Здесь имели место ещё три многоскачковых отражения над основным. Скорее всего, это дополнительное отражение было обусловлено слабым полупрозрачным ионизированным слоем E_s под основным (явление многослойности в ночных условиях в высоких широтах).

Случай раздвоения отражения от слоя E_s в условиях сильного возмущения (рис. 3б) представлен на рис. 4д (трасса Ловозеро—ст. «Горьковская», 17:02 UT 08.09.2017). Здесь имело место отражение от спорадического слоя E_s с групповым запаздыванием — раздвоение на конце трека $f = 15,5 \div 20$ МГц. Следовательно, в данное время за счёт интенсивной ионизации наблюдался слой E_s с большой толщиной.

Эффект перемещающихся ионосферных возмущений при сильном возмущении (рис. 3в) представлен на рис. 4е (трасса Кипр—Ловозеро, 16:50 UT 08.09.2017). На основной моде $1F_2$ имеется зигзаг ($f = 13,5$ МГц) за счёт такого возмущения. Появление перемещающихся ионосферных возмущений в возмущённых условиях более вероятно, но наблюдается не всегда. Для сравнения, на ионограмме рис. 4а во время возмущённых условий подобный зигзаг отсутствует.

На рис. 4ж (трасса Ловозеро—ст. «Горьковская», 08:32 UT 07.09.2017) приведён пример отражения от слоя F_1 в спокойных геомагнитных условиях (рис. 3б). На ионограмме в утреннее время можно видеть проявления слоя F_1 в диапазоне частот $6 \div 9$ МГц. При этом отражение от слоя E_s

на ионограмме достаточно интенсивно.

Диффузность и необычные отражения (спокойные геомагнитные условия, ночные часы, рис. 3а) представлены на рис. 4з (трасса Кипр—Ловозеро, 04:05 UT 06.09.2017). На ионограмме видна диффузность в виде выброса вверх и вправо. Отражения от слоёв имеют нестандартный характер. Так, видна неоднородность с параметрами $f = 11$ МГц, $\tau = 12,7$ мс. По сравнению с ионограммами рис. 4а, б моды различаются с трудом.

Таким образом, анализ ионограмм наклонного зондирования показал, что на двух радиотрассах присутствуют нестандартные (аномальные) моды распространения как в спокойных, так и в возмущённых условиях. Установлено следующее. На субавроральной (высокоширотной) трассе имели место триплет, полупрозрачный слой E_s , раздвоение отражения от слоя E_s и влияние слоя F_1 . Это наиболее частые случаи, характерные именно для высоких широт. На среднеширотной трассе наблюдались боковые отражения, моды типа M и N , эффект воздействия перемещающихся ионосферных возмущений, диффузность сигнала. Для возмущённых условий типичны боковые отражения, раздвоение отражения от слоя E_s и проявление перемещающихся ионосферных возмущений, что, вообще говоря, общеизвестно. Проведена физическая интерпретация указанных выше аномалий.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКИХ ВОЛН ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Прежде всего, необходимо отметить, что моделированию распространения коротких волн в высоких широтах авторами данной работы уже уделялось достаточно много внимания [13–16]. Рассматривались боковые отражения рис. 4а, диффузность рис. 4з, отражения от спорадического слоя E_s рис. 4д и влияние перемещающихся ионосферных возмущений на распространение волн рис. 4е. Моделирование ситуаций, соответствующих ионограммам на рис. 4б, в, д, жс, также представляет интерес.

Кратко метод моделирования состоит в следующем. В целом расчёт траекторий следует классической процедуре «ray tracing» [17]. В качестве модели используется двумерно-неоднородное распределение электронной концентрации в ионосфере. Распределение N_e вдоль плоскости распространения радиоволн задаётся в виде суммы базовой невозмущённой части и дополнительного возмущения: $N_e = N_0(1 + \delta_L + \delta_T)$, где N_0 — невозмущённая концентрация, задаваемая моделью IRI-2016 [18] с учётом возможности корректировки при наличии экспериментальных данных вертикального зондирования [19], δ_L — дополнительное возмущение, создаваемое одиночными крупномасштабными неоднородностями с относительной амплитудой возмущения ΔN_L , δ_T — возмущение, создаваемое неоднородностями с волнообразной структурой (перемещающиеся ионосферные возмущения) с амплитудой ΔN_T . Для построения распределения ионизации по модели IRI-2016 с учётом корректировки находится электронная концентрация в узлах заданной на плоскости решётки в заданный момент времени. В дальнейшем значения концентрации в произвольной точке находятся с помощью интерполяции кубическими сплайнами, удовлетворяющими требованиям непрерывности функции и её производной. Возмущение электронной концентрации δ_L в общем случае задаётся в виде суммы эллипсоидов с центрами в точке (r_{0i}, θ_{0i}) и масштабами $(Lr_i, L\theta_i)$:

$$\delta_L = \sum_i dN_i \exp \left[- \left(\frac{r - r_{0i}}{Lr_i} \right)^2 - R_0 \left(\frac{\theta - \theta_{0i}}{L\theta_i} \right)^2 \right].$$

Здесь dN_i — относительная амплитуда возмущения, $R_0 = 6370$ км — радиус Земли.

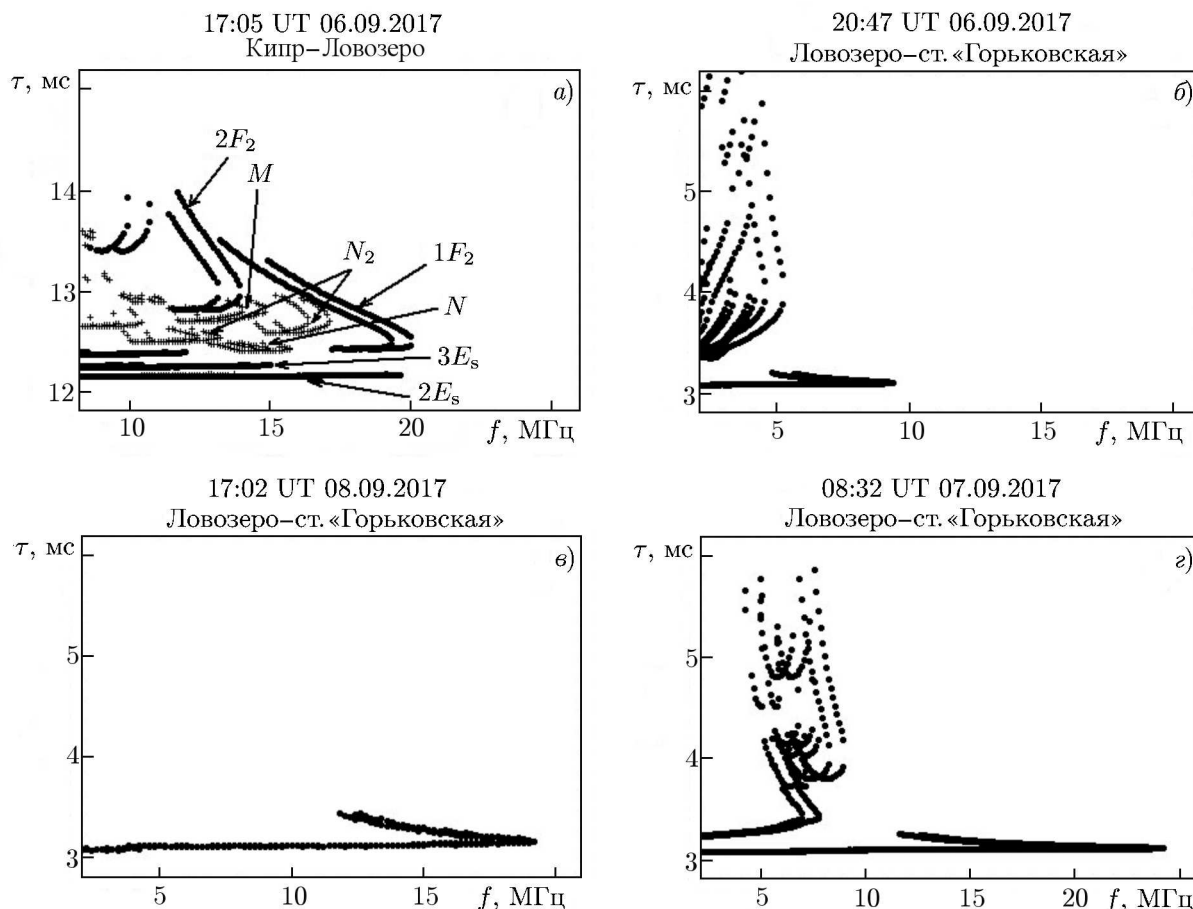


Рис. 5. Рассчитанные ионограммы. Рис. 5а соответствует рис. 4б, рис. 5б — рис. 4в, рис. 5в — рис. 4д, рис. 5г — рис. 4ж

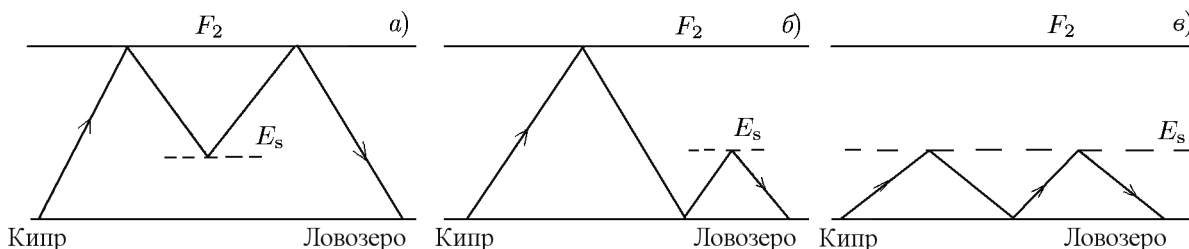


Рис. 6. Схемы распространения, использованные для нахождения следов с участием отражения от слоя E_s

Неоднородности с волнообразной структурой также можно представить в виде суммы нескольких возмущений:

$$\delta_T = \sum_i dN_i(r, \theta) \cos\left(-\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{\Lambda}R_0\theta + \Phi_0\right).$$

Здесь $dN_i(r, \theta)$ — зависящая от координат относительная амплитуда волнового возмущения с периодом T , начальной фазой Φ_0 и длиной волны Λ . Как известно, модель IRI предусматривает адаптацию к экспериментальным значениям параметров f_{oF_2} и h_{mF_2} . В данной статье методика корректировки основана на использовании не абсолютных значений основных параметров ионо-

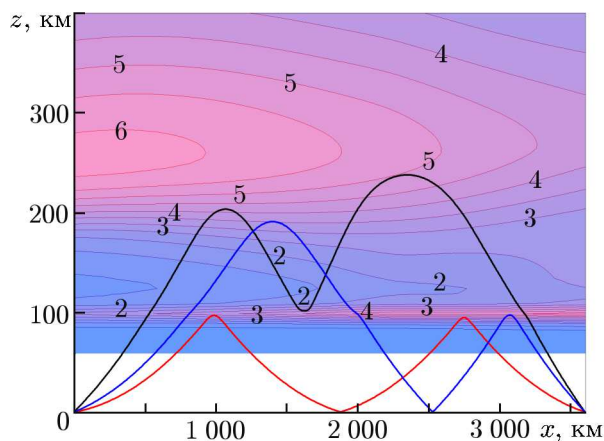


Рис. 7. Контур и типы траекторий при построении следов ионограммы, соответствующей рис. 4б (5а)

Предусмотрен вывод следующей вспомогательной информации: 1) высотные профили концентрации $N_e(h)$ над передатчиком, приёмником и в средней точке трассы, что особенно важно при адаптации модели; 2) контур распределения ионизации, представляющий положение неоднородностей, например слоя E_s или перемещающихся ионосферных возмущений; 3) изображения траекторий, позволяющие отождествлять тип траектории. Результаты расчётов представлены на рис. 5.

Для интерпретации ионограммы, соответствующей рис. 4б (5а), использовались три показанные на рис. 6 схемы распространения: для моделирования М-моды (6а), N-моды (рис. 6б) и кратных отражений от слоя E_s (рис. 6в). Это позволило, дополнительно к основным следам мод $1F_2$ и $2F_2$, построить следы мод M , N , N_2 , $2E_s$ и $3E_s$, соответствующие реальной ионограмме. Соответствие максимальной применимой частоты слоя F_2 (МПЧ- F_2) получено адаптацией модели IRI к данным вертикального зондирования в Москве, Калининграде и ст. «Горьковская». Контур распределения ионизации и типы траекторий (E_s , M , N) для этой ионограммы показаны на рис. 7.

Для интерпретации ионограммы рис. 4в (5б) программа [19] была дополнена расчётом следа z-моды. Исходная модель IRI и её адаптация к частоте f_{oF_2} станции Москва дали одинаковые МПЧ- F_2 . След моды E_s получен отражением от неоднородности, расположенной на высоте 100 км над центром трассы с горизонтальным размером 100 км, полутолщиной 2 км и частотой $f_{oE_s} = 4,42$ МГц. Для ионограммы рис. 4д (5в) слой E_s располагался на высоте $h = 120$ км с полутолщиной 10 км, горизонтальным размером 800 км, $f_{oE_s} = 6,1$ МГц. При построении ионограммы рис. 4ж (5г) использовались моды $1E_s$, $E - E$ ($\tau = 3,2 \div 4,0$ мс), F_2 , M ($\tau = 5$ мс).

ВЫВОДЫ

Наиболее важные результаты проведённого анализа состоят в следующем.

Распространение сигналов на среднеширотной трассе происходит как посредством моды F_2 , так и достаточно часто моды E_s . Иногда имеют место комбинированные моды $N(F - E)$ и $M(F -, E - F)$.

Первая буря сопровождается существенным ростом поглощения и, как результат, частым отсутствием сигналов на трассах. Для второй бури характерны повышенные значения МНЧ- E_s и наличие сигналов в течение этой бури.

сферных слоёв f_{oF_2} и h_{mF_2} , а коэффициентов их отклонения от значений базовой модели (в нашем случае — IRI-2016). Таким образом значительно снижается зависимость от географического положения и времени наблюдения, что приводит к увеличению радиуса корреляции ионосферных параметров в окрестности станции вертикального зондирования. Коэффициенты отклонения (и соответствующие абсолютные значения) в произвольной точке находятся при помощи интерполяции.

В данной работе для адаптации модели использованы значения f_{oF_2} по данным ионозондов Москвы, Калининграда и ст. «Горьковская». Параметры слоя E_s подбирались до совпадения рассчитанной ионограммы с экспериментальной.

На субполярной трассе во время возмущения распространение сигналов происходит главным образом путём отражения от спорадического слоя E_s такой большой интенсивности, что даже заметное поглощение почти не влияет на характер отражения.

Анализ ионограмм наклонного зондирования ионосферы показал, что на обеих радиотрассах присутствуют нестандартные (аномальные) моды распространения как в спокойных, так и в возмущённых условиях. На субавроральной (высокоширотной) трассе имели место триплет, полупрозрачный слой E_s , раздвоение отражения от слоя E_s и влияние слоя F_1 . Это наиболее распространённые эффекты, характерные именно для высоких широт. На среднеширотной трассе наблюдались боковые отражения, моды типа M и N , эффект воздействия перемещающихся ионосферных возмущений и диффузность сигнала. Для возмущённых условий типичны боковые отражения, раздвоение отражения от слоя E_s и проявление перемещающихся ионосферных возмущений, что подтверждает ранее полученные результаты.

Модельные расчёты условий распространения радиоволн показали следующее. Моделирование распространения коротких радиоволн на среднеширотной и высокоширотной трассах с использованием модели IRI, адаптированной к данным вертикального зондирования, позволяет получать соответствие рассчитанных частот МПЧ- F_2 с реальными значениями. Наличие слоя E_s приводит к возможности определения следов M и N -мод и многократных отражений от слоя E_s . Расчёт следов o -, x - и z -компонент позволяет моделировать ионограммы с триплетами.

Работа Благовещенского Д. В. и Мальцевой О. А. поддержана РФФИ (грант 18-05-00343). Работа Жбанкова Г. А. выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (№ 3.9696.2017/8.9). Авторы выражают благодарность ААНИИ за данные наклонного зондирования, а также сотрудникам обсерватории Соданкюла за возможность использования их риометрических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hunsucker R. D., Hargreaves J. K. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 639 p.
2. Kilgallen J. // Proc. Nordic HF Conf. Fårö, Sweden, 14–16 August. 2001. Art. no. 7.2.
3. Kotova D. S., Klimenko M. V., Klimenko V. V., et al. // Adv. Space Res. 2015. V. 56, No. 9. P. 2012.
4. Uryadov V. P., Ponyatov A. A., Vertogradov G. G., et al. // Int. J. Geomagn. Aeron. 2005. V. 6, No. 1. Art. no. GI1002.
5. Vertogradov G. G., Vertogradov V. G., Uryadov V. P. // Int. J. Geomagn. Aeron. 2007. V. 7, No. 2. Art. no. GI2002.
6. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 4. С. 255.
7. Ким А. Г., Пономарчук С. Н., Котович Г. В., Романова Е. Б. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 43.
8. Kurkin V. I., Polekh N. M., Pirog O. M., et al. // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49, No. 8 (Special Issue 2). P. 1249.
9. Ivanova V. A., Kurkin V. I., Podlesnyi A. V., et al. // Proc. Progress Electromagn. Res. Symp. — Spring (PIERS), St.-Petersburg, Russia, 22–25 May, 2017. P. 1316.
10. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>
11. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes>
12. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.

13. Благовещенский Д. В. Короткие волны в аномальных радиоканалах. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2011. 422 с.
14. Blagoveshchensky D. V., Maltseva O. A., Anishin M. M., et al. // Adv. Space Res. 2016. V. 57, No. 3. P. 821.
15. Blagoveshchensky D. V., Maltseva O. A., Anishin M. M., et al. // Adv. Space Res. 2016. V. 58, No. 6. P. 835.
16. Благовещенский Д. В., Мальцева О. А., Анишин М. М., Рогов Д. Д. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 6. P. 509.
17. Nickisch L. J. // Radio Sci. Bulletin. 2008. No. 325. P. 36.
18. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., et al. // J. Space Weather Space Clim. 2014. V. 4. Art. no. A07.
19. Данилкин Н. П., Жбанков Г. А., Тасенко С. В. // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 7. С. 43.

Поступила в редакцию 19 апреля 2018 г.; принята в печать 26 декабря 2018 г.

OBSERVED AND CALCULATED IONOGRAMS OF OBLIQUE IONOSPHERIC SOUNDING ON HF RADIO PATHS DURING A MAGNETIC STORM ON SEPTEMBER 7–8, 2017

D. V. Blagoveshchenskii, G. A. Zhbankov, and O. A. Maltseva

Ionograms of the oblique ionospheric sounding radio paths Cyprus–Lovozero and Lovozero–Gorkovskaya (near St. Petersburg) are analyzed with the use of magnetometers and riometers. The behavior of the maximum observable frequencies (MOF) of the F_2 and E_s layers during a magnetic storm of September 7–8, 2017 is considered. The storm has a specific, not classical form and can be divided into two parts, namely, the first and the second storms. The main results are as follows. 1) The manifestation of the first storm is accompanied by a significant increase in absorption and frequent absence of signals on the paths. The second storm is characterized by increased values of the MOF of E_s and the presence of signals. 2) The signals on the Cyprus–Lovozero mid-latitude path propagate both as $1F_2$, $2F_2$, and $3F_2$ modes and as $2E_s$ and $3E_s$ modes. 3) On the Lovozero–Gorkovskaya sub-polar path, during the disturbance, the signals mainly propagate through reflection from the sporadic E_s layer of very high intensity. 4) Modeling of the propagation of HF radio waves using the IRI-2016 model adapted to the vertical sounding data made it possible to match the model ionograms with the real oblique ionospheric sounding ionograms, including the cases of presence of the M and N modes, as well as triplets, in quiet and disturbed conditions, which is a new result.