МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО» НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Портино На правах рукописи

Першин Александр Владимирович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН В СПОКОЙНОЙ И ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЕ

1.3.4 – Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент Выборнов Федор Иванович

Нижний Новгород, 2025

оглавление

	С
Введение	4
Глава 1. Применение аппаратно-программного комплекса с ЛЧМ	
в исследованиях ионосферы	2
1.1 Приёмо-передающая станция зондирования ионосферы сигналами с	
ЛЧМ	2
1.2 Принцип зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом.	2
1.3 Регистрация ПИВ с помощь ионозонда с ЛЧМ	2
1.4. Заключение по первой главе	3
Глава 2. Экспериментальное исследование и моделирование	
распространения коротких радиоволн на трассах наклонного	
зондирования ионосферы	3
2.1. Прогнозирование максимальной применимой частоты. Коррекция	
модели ионосферы путем адаптации ионосферной модели IRI по	
данным наклонного зондирования в евроазиатском регионе	3
2.2. Вариации диапазона частот прохождения КВ сигналов на	
субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной	
возмущенности в октябре 2016 года	5
2.3. Распространение КВ сигналов на сети трасс наклонного	
зондирования в условиях повышенной солнечной и магнитной	
активности в сентябре 2017 года	7
2.4. Влияние частного солнечного затмения 11 августа 2018 г. на	
характеристики ионосферного канала по данным наклонного	
зондирования	9
2.5. Заключение по второй главе	1
Глава 3. Моделирование ионосферного распространения коротких	
радиоволн в трехмерно-неоднородной ионосферной плазме	1
3.1. Модели ионосферы в задачах распространения радиоволн в	
условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы	1

3.2. Влияние ПИВ на характеристики КВ сигналов при слабонаклонном						
распространении	на	трассе	Васильсурск	_	Нижний	
Новгород						108
3.3. Заключение по третьей главе					116	
Заключение						118
Список сокращений и условных обозначений					122	
Список литературы	[123

Введение

Актуальность темы диссертационной работы

Несмотря на развитие спутниковых и волоконных линий связи, КВ радиосвязь, по-прежнему, играет важную роль в решении прикладных задач ионосферного распространения радиоволн. Ее преимущества заключаются в большой дальности действия, высокой мобильности, живучести и низкой стоимости по сравнению с другими видами связи. К преимуществам КВ радиосвязи следует также отнести оперативность установления связи на большие расстояния, простоту организации радиосвязи с подвижными объектами, возможность обеспечения связи через труднодоступные пространства (зоны повышенного заражения, труднопроходимые водные и горные районы, лесные завалы), довольно простую и быструю восстанавливаемость связи в случае ее нарушения [1]. Особое значение КВ радиосвязь приобретает в чрезвычайных ситуациях — при организации и проведении аварийно-спасательных работ, координации действий различных организаций и служб в районах стихийных бедствий (землетрясений, наводнений, крупных снежных и селевых лавин), во время военных действий.

Для обеспечения надежной работы радиоэлектронных систем различного назначения в различных гелиогеофизических условиях важнейшей задачей является мониторинг ионосферного канала и выбор оптимального радиоканала для радиолинии по результатам зондирования.

В последние два десятилетия для мониторинга ионосферного канала широко используются маломощные станции наклонного ЛЧМ зондирования. Испытания систем КВ радиосвязи как у нас в стране, так и за рубежом с назначением рабочих частот связи по данным наклонного ЛЧМ зондирования в реальном времени показали возможность повышения надежности КВ связи до уровня спутниковых связных систем [2, 3]. Комплекс с ЛЧМ сигналом имеет существенные преимущества перед традиционными радиосредствами с импульсными сигналами. Он отличается высокой помехозащищенностью, высоким разрешением по времени группового запаздывания, имеет малые габариты, вес И

энергопотребление [4-6]. Благодаря малой мощности излучения (десятки-сотни Вт) и быстрому сканированию по частоте, ЛЧМ комплекс наклонного электромагнитную зондирования имеет хорошую совместимость с радиоэлектронными системами различного назначения. Кроме того, наклонное зондирование имеет существенное преимущество по сравнению с другими диагностики ионосферного канала, поскольку непосредственно методами позволяет определять ключевые характеристики канала, включая максимально наблюдаемую частоту (МНЧ), диапазон ОРЧ, отношение сигнал/шум, скорость передачи информации, полосу когерентности.

Основная проблема КВ радиосвязи – это нестационарность ионосферного обусловленная воздействием радиоканала, различного рода возмущений естественного и искусственного происхождения (вспышки на Солнце, выбросы корональной массы, прохождение терминатора, землетрясения и вулканическая активность, ураганы, солнечные затмения, промышленные взрывы, старты ракет, нагрев ионосферы И дp.) И помехами, создаваемыми посторонними радиостанциями.

К основным типам ионосферных возмущений относятся крупномасштабные (KM), среднемасштабные (CM) и мелкомасштабные (MM) перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) [7, 8].

Несмотря на успехи, достигнутые в реконструкции крупномасштабной структуры ионосферы, определение параметров и прогноз ионосферных возмущений остается серьезной актуальной проблемой. До сих пор нет достаточной ясности в понимании основных свойств ионосферных возмущений, отсутствуют полные достоверные сведения о параметрах неоднородностей ионосферной плазмы, особенно о характеристиках их движения. Измерения полного вектора скорости ПИВ по-прежнему редки, а данных о направлениях перемещения ионосферных возмущений, как правило, существенно меньше, чем данных о скорости. В настоящее время еще нет полного понимания физических механизмов образования ионосферных неоднородностей. Остается нерешенным вопрос о глобальном

непрерывном контроле за состоянием верхней атмосферы. Очень ограничены возможности его прогноза.

Вместе с тем, динамический режим ионосферы является одним из важнейших факторов космической погоды, влиянию которой оказываются подверженными современные технологические системы.

Состояние околоземного космического пространства (ОКП) влияет на работу спутниковых систем, дающих информацию о погоде, обеспечивающих телевидение, связь, навигацию, наблюдение за земной поверхностью, разведку, систему слежения и спасения, гелиогеофизические исследования и национальную оборону. линии Магистральные очень чувствительны К электрическим токам, индуцированным в ионосферной токовой системе. Перегрузки в линиях электропередач, возникающие как следствие индуцированных токов, могут вызвать массовые аварии электросетей и выход из строя дорогостоящего оборудования на электростанциях.

Испытывают воздействие космической погоды и радиотрассы, особенно в КВ диапазоне. Ионосферные неоднородности вызывают замирания коротковолновых радиосигналов, появление аномальных сигналов, отклонение направления распространения сигнала от дуги большого круга между передатчиком и приемником. В сильно возмущенных условиях поглощение радиосигнала делает связь на коротких волнах практически невозможной.

Для динамического управления частотным ресурсом и обеспечения устойчивой работы радиоэлектронных систем различного назначения (КВ радиосвязь, загоризонтная КВ радиолокация) необходимо иметь надежные данные о диапазоне ионосферных изменений в различных гелиогеофизических условиях.

Для обеспечения устойчивой работы систем КВ радиосвязи большую роль играет прогнозирование динамики изменения ионосферного канала. Результаты зондирования используются для прогнозирования и экстраполяции параметров ионосферного канала на трассы, не оснащенные средствами диагностики путем коррекции модели ионосферы с целью ее адаптации к условиям распространения

радиоволн и определения оптимального диапазона частот для обеспечения требуемой надежности КВ радиосвязи [9, 10].

Магнитно-ионосферные возмущения оказывают существенное влияние на ионосферное распространение КВ, вызывая дополнительное поглощение, сокращение диапазона частот прохождения сигнала, вплоть до блэкаута, рассеяние, появление аномальных мод и связанное с ними увеличение интервала группового запаздывания, снижение скорости передачи информации, усиление замираний сигнала, отклонение направления прихода сигнала от дуги большого круга между передатчиком и приемником [11-22]. Результаты многочисленных исследований научного и прикладного характера в области ионосферного распространения КВ свидетельствуют, что наиболее опасными для эффективной работы связных систем время сильных геомагнитных возмущений, являются условия во когда отрицательная фаза магнитной бури и сильное поглощение захватывают обширные регионы, где проходят трассы систем КВ радиосвязи.

B этой особенностей связи, актуальными являются исследования распространения КВ сигналов на стратегически важных субавроральных трассах наклонного зондирования для определения границ ионосферной изменчивости во время солнечной И магнитной активности различной интенсивности, распространения трехмерно-неоднородной моделирование радиоволн В магнитоактивной ионосфере в условиях волновых возмущений различной природы и развитие методов прогнозирования и экстраполяции ключевых параметров ионосферного канала.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время для зондирования ионосферного канала широко применяются маломощные ионозонды с непрерывным излучением линейночастотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала, обладающие высокой помехозащищенностью [23, 24]. По сравнению с другими методами диагностики ионосферы, метод НЗ позволяет непосредственно определять ключевые параметры ионосферного КВ радиоканала, включая максимальную наблюдаемую частоту

(МНЧ), отношение сигнал/шум, диапазон оптимальных рабочих частот, полосу когерентности, скорость передачи информации, надежность связи.

Инерционность ионосферных процессов позволяет устанавливать пространственно-временные корреляционные связи параметров КВ канала и использовать их для прогнозирования на короткие интервалы времени (десятки минут). Согласно измерениям [25] радиус пространственной корреляции вариаций критической частоты ионосферы оказался равен ~1000 и 1500 км в направлении север-юг и восток-запад, соответственно.

Для корректировки краткосрочного прогноза ионосферных параметров и повышения точности обычно используют зондовые измерения в реальном масштабе времени, основанные на данных вертикального, наклонного и возвратнонаклонного зондирования ионосферы, используют сигналы навигационных систем GPS и ГЛОНАСС для мониторинга ионосферы Земли [26-30].

В работах [26, 31, 32] экспериментальные данные по МНЧ, получаемые на сети трасс наклонного зондирования (НЗ) используются для определения эффективного числа солнечных пятен или солнечного потока на длине волны $\lambda =$ 10.7 см. Поток находится из условия, чтобы прогнозируемая модель обеспечивала измеряемую МНЧ. Для односкачковых трасс поток связывается с состоянием ионосферы в средней точке трассы НЗ, которая принимается за ионосферную контрольную точку. Для сети трасс НЗ получается некоторое распределение контрольных точек. В случае, если другие контрольные точки расположены достаточно близко к средней точке прогнозируемой трассы, то ее МПЧ может быть уточнено путем линейной интерполяции экспериментальных данных [32]. Результаты эксперимента [32] свидетельствуют, что процедуру интерполирования данных H3 на средних широтах, повышающую точность прогноза, имеет смысл проводить в пределах области, простирающейся на 700 км в широтном и ~ 400 км в долготном (меридиональном) направлениях. При этом отсутствие постоянно работающей разветвленной сети ЛЧМ ионозондов делает актуальной задачу пространственно-временного прогнозирования ключевого параметра

ионосферного канала – максимальной применимой частоты (МПЧ) и ее экстраполяции на трассы, не оснащенные средствами диагностики.

Для бесперебойной работы радиоэлектронных систем различного необходимо установить диапазоны и пределы назначения ионосферной изменчивости для различных регионов и солнечно-магнитной активности [56, 57]. Оценки изменчивости диапазона частот прохождения КВ сигналов от максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) до наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ) $\Delta f =$ МНЧ-ННЧ в различных гелиогеофизических условиях особенно важны при КВ радиосвязи и управления радиочастотами в ионосфернопланирования волновой и частотно-диспетчерской службе (ИВЧДС). Многие исследователи сделали значительный вклад в изучение ионосферной изменчивости с использованием различных индексов и параметров ионосферы [33, 35-37]. Источником возмущений в ионосфере являются гравитационные, приливные и планетарные волны, которые переносят энергию из нижних слоев в верхнюю атмосферу [38-40]. Вклад солнечной активности меняется в зависимости от солнечного цикла и связан с ультрафиолетовым и рентгеновским излучением, которое ионизирует атмосферу, в то время как влияние геомагнитной активности обусловлено солнечным ветром и магнитосферно-ионосферным взаимодействием, к геомагнитным бурям. В высоких широтах ионосферная приводящим изменчивость дополнительно связана с высыпанием частиц и дрейфом плазмы вследствие магнитосферной конвекции [41].

Существуют различные подходы для обеспечения устойчивой работы радиоэлектронных систем, включая использование результатов вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования для адаптации к условиям распространения радиоволн, корректировку модели ионосферы, зондирование самим связным сигналом – метод automatic link establishment (ALE), а также использование технических средств, в том числе современных модемов и пространственно-временной обработки сигналов.

Электрические токи, вызванные высыпанием заряженных частиц, изменяют свойства ионосферы [42]. Реакция критической частоты *F*-слоя на геомагнитные

возмущения зависит от времени суток, времени года, широты и характера самого возмущения. Во многих случаях во время магнитной бури критическая частота *F*слоя снижается (так называемая отрицательная фаза бури). При этом депрессия критических частот во время магнитной бури оказывает сильное влияние на устойчивость КВ радиосвязи, особенно в высокоширотных регионах [15, 17, 43].

Считается, что ионосферные возмущения возникают всякий раз, когда возникают магнитные возмущения. Но взаимосвязь между ними сложная, и не существует взаимно-однозначного соотношения между индексом магнитного возмущения и уровнем ионосферных возмущений, измеряемым по депрессии критической частоты, нарушению связи или по другим параметрам. Могут возникать довольно сильные магнитные возмущения с незначительным ионосферным эффектом и наоборот.

В условиях магнитно-ионосферных возмущений для обеспечения требуемой надежности необходимо нейтрализовать неблагоприятное воздействие таких возмущений на работу радиоэлектронных систем. Это может быть изменение передачи сообщений для обхода "пораженной" маршрутизации области ионосферы, изменение/расширение диапазона частот зондирования/связи для использования дополнительных каналов распространения, особенно на высокоширотных радиолиниях, за счет рассеяния/отражения сигналов на ионосферных неоднородностях и спорадических образованиях, формируемых в высокоширотной ионосфере во время возмущений. Чтобы ориентироваться в планировании ИВЧДС в сложной геофизической обстановке и минимизировать отрицательное влияние магнитно-ионосферных возмущений, необходимо иметь репрезентативный материал данных наклонного зондирования для определения диапазона изменений параметров ионосферного КВ канала в различных гелиогеофизических условиях для оценки и прогнозирования ожидаемого изменения диапазона частот прохождения сигналов.

Все эти методы позволяют в спокойных геофизических условиях обеспечить надежную КВ радиосвязь, сопоставимую с надежностью спутниковой связи.

В этой связи весьма актуальными являются исследования диапазона изменений ключевых параметров ионосферного КВ канала в различных гелиогеофизических условиях и разработка рекомендаций для прогнозирования и предупреждения нарушений ионосферных условий.

Реакция ионосферы на солнечное затмение проявляется, главным образом, в уменьшении полного электронного содержания по той причине, что во время солнечного затмения на пути движения лунной тени в атмосфере Земли активность фотохимических реакций снижается почти до уровней ночной ионосферы. При этом во время солнечного затмения наблюдается возрастание критической частоты спорадического слоя *Es* [44, 45]. В [45] увеличение электронной плотности в слое Es связывается с ветровым сдвигом, создаваемым градиентом температуры при движении лунной тени.

Сверхзвуковое движение лунной тени нарушает тепловой баланс атмосферы и может быть источником акустико-гравитационных волн (АГВ) [46]. По данным различных исследований периоды АГВ, инициированные солнечным затмением, находятся в интервале от 20 до 60 минут [47, 48-50]. Гравитационные волны также могут быть ответственны за формирование волнообразных структур в спорадическом слое *Es* [51]. По причине достаточно редкого сочетания солнечного затмения (СЗ) и Es, имеется недостаточно данных о влиянии СЗ на параметры *Es*. Данное обстоятельство делает подобные исследования особенно актуальными.

Вопросу моделирования распространения радиоволн в условиях трехмернонеоднородной ионосферной плазмы посвящено достаточно много работ, в которых учитывается наличие значительных поперечных градиентов электронной концентрации относительно основной плоскости распространения волны по дуге большого круга (ДБК) [52, 53]. Наличие поперечных градиентов электронной концентрации приводит к отклонению луча от плоскости ДБК и в результате к существенному изменению траектории, которое не может быть в полной мере описано двумерной моделью распространения радиоволн [52]. Причинами наличия в ионосфере горизонтальных градиентов электронной концентрации могут различные естественные и искусственные ионосферные возмущения, такие как ПИВ, ионосферный провал, возмущение в результате суточного хода линии терминатора, область модификации ионосферы мощным радиоизлучением коротковолнового стенда типа Сура. Даже в обычных условиях при фактически невозмущенной ионосфере внешними воздействиями азимутальное отклонение луча в точке приема при длине трассы порядка 1500 км может достигать нескольких градусов (обычно 2-4 град.) относительно ДБК только за счет регулярного суточного хода критической частоты, который обеспечивает нарушение сферической симметрии ионосферы Земли и, соответственно, образование горизонтальных градиентов в ней.

Типичными ионосферными возмущениями, наблюдаемыми на средних широтах, являются среднемасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) с размерами ~ 100-500 км и периодами от десятков минут до нескольких часов [7]. Для исследования ПИВ используются различные методы и техника, в том числе ионозонды вертикального [54] и наклонного зондирования [55, 56], доплеровские измерения [57], радары некогерентного [58, 59] и когерентного [60] рассеяния, трансионосферное зондирование с помощью сигналов навигационных спутников GPS [61, 62, 63].

Для определения направление распространения ПИВ необходимо проведение одновременных наблюдений на трассах различной ориентации. Путем сопоставления экспериментальных данных и моделирования могут быть сделаны оценки направленно-скоростных характеристик ПИВ. Актуальность таких измерений определяется еще тем, что направление движения ПИВ может служить индикатором (трассером) общей атмосферной циркуляции за счет тропосферного и термосферного ветров, действующих подобно фильтру и определяющих преимущественное направление распространения гравитационных волн [64-66].

Несмотря на значительные усилия и достижения в области исследования волновых возмущений, многие важные вопросы остаются еще открытыми. До сих пор неясен механизм преобразования различных видов энергии в атмосфере, не выявлены агенты, стимулирующие спусковой механизм выделения накопленной

энергии. Отрывочность данных, их противоречивость приводят в ряде случаев к ошибочным выводам. Все это сдерживает развитие теоретических исследований динамических процессов в различных слоях атмосферы и затрудняет прогнозирование климатических факторов, оказывающих непосредственное влияние на жизнедеятельность биосферы на Земле.

Цели и задачи работы

Цель диссертации заключается в экспериментальном исследовании распространения КВ сигналов на субавроральных и среднеширотных трассах различной протяженности, разработке методов прогнозирования и экстраполяции ключевого параметра ионосферного КВ канала - максимально применимой частоты (МПЧ) путем адаптации модели IRI к условиям распространения радиоволн по данным наклонного зондирования ионосферы, определении направленно-скоростных характеристик ПИВ путем сопоставления результатов моделирования КВ сигналов в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере с экспериментальными данными и разработке рекомендаций для нейтрализации неблагоприятных воздействий гелиогеофизических возмущений на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Создан приемо-передающий пункт наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы в пгт Васильсурск Нижегородской области для проведения непрерывных круглосуточных многомесячных наблюдений распространения КВ-сигналов на среднеширотных и субавроральных трассах различной протяженности.

2. Разработаны и экспериментально проверены методы прогнозирования и экстраполяции ключевого параметра ионосферного КВ канала – максимально применимой частоты (МПЧ) путем адаптации ионосферной модели IRI к условиям распространения радиоволн по данным наклонного зондирования .

3. Определены направленно-скоростные характеристики ПИВ путем сопоставления результатов моделирования КВ сигналов в трехмернонеоднородной магнитоактивной ионосфере с экспериментальными данными. 4. Определен диапазон изменений МНЧ и ННЧ на стратегически важных субавроральных трассах наклонного зондирования в различных гелиогеофизических условиях .

5. Даны рекомендации для нейтрализации неблагоприятных воздействий гелиогеофизических возмущений на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

Методология и методы исследований

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались следующие основные методы:

- метод наклонного зондирования ионосферы сигналами с ЛЧМ;

- метод вертикального зондирования ионосферы сигналами ионосферной станции (использовался ионозонд CADI);

- теория распространения электромагнитных волн в плазме.

Также в диссертационной работе при решении поставленных задач использовались методы математической статистики, математическое и численное моделирование.

Компьютерное моделирование распространения коротких радиоволн в ионосферной плазме и обработка полученных экспериментальных данных выполнены в программной среде Matlab.

Научная новизна работы:

1. Разработаны и экспериментально проверены методы прогнозирования и экстраполяции МПЧ на трассы, не оснащенные средствами диагностики, путем адаптации ионосферной модели IRI к условиям распространения радиоволн по данным наклонного ЛЧМ зондирования на субавроральных трассах [10, 67, 68].

2. Определены направленно-скоростные характеристики ПИВ по данным наклонного ЛЧМ зондирования на слабонаклонной среднеширотной трассе [69-76].

МНЧ и ННЧ 3. Определен диапазон изменений различных В гелиогеофизических условиях по данным наклонного ЛЧМ-зондирования на субавроральных трассах И даны рекомендации для нейтрализации неблагоприятных воздействий возмущений на работу систем КВ радиосвязи [77-81, 43, 82].

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что обоснованные в диссертации рекомендации для нейтрализации неблагоприятных воздействий магнитно-ионосферных возмущений можно использовать при проектировании и эксплуатации радиоэлектронных систем различного назначения (КВ радиосвязь, загоризонтная КВ радиолокация) для обеспечения их эффективного функционирования в различных гелиогеофизических условиях.

Достоверность и обоснованность основных результатов и выводов работы определяется использованием обширного банка ионограмм на трассах различной протяженности, полученных с помощью современной техники наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы, использованием современных методов математического моделирования распространения КВ сигналов и статистических методов обработки экспериментальных данных, согласованием с результатами других авторов.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации автором опубликованы 24 работы: 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК (из них 7 по специальности 1.3.4 - Радиофизика; статей в ведущих изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus); 6 статей и тезиса докладов в сборниках трудов международных научных конференций; 3 статьи доклада в сборниках трудов всероссийских научных конференций; 8 тезисов докладов в сборниках трудов региональных научных конференций.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- Ежегодные научные конференции по радиофизике (ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, 2018, 2019, 2022 г).

- Всероссийской XXVI открытой научной конференции. (Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 2019 г.);

- Всероссийской XXVII открытой научной конференции. (Калининград, 2021).

- Международные научно-технические конференции "Радиолокация, навигация, связь" (г. Воронеж, 2018, 2019, 2020 гг.).

- 42-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений".

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в получении всех результатов изложенных в диссертационной работе. Постановка задач, анализ экспериментальных данных, разработка рекомендаций, обобщение результатов диссертации выполнены совместно с научным руководителем. Автором самостоятельно разработаны методы прогнозирования и экстраполяции МПЧ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработаны и экспериментально проверены методы прогнозирования и экстраполяции ключевого параметра ионосферного КВ канала – максимально применимой частоты (МПЧ) – путем адаптации ионосферной модели IRI к условиям распространения радиоволн по данным наклонного зондирования.

2. По анализу данных наклонного ЛЧМ зондирования на близко расположенных слабонаклонных среднеширотных трассах определены направленно-скоростные характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ).

3. Определение диапазона изменений МНЧ и ННЧ в различных условиях по данным наклонного ЛЧМ-зондирования на субавроральных трассах позволяет разработать рекомендации для нейтрализации неблагоприятных воздействий гелиогеофизических возмущений на работу систем КВ радиосвязи.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 140 страниц, включая 42 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 139 наименований.

Краткое содержание работы

<u>В первой главе</u> в разделе 1.1 проводится обзор аппаратно-программного комплекса для наклонного зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). В разделе 1.2 рассмотрены преимущества зондирования ионосферы с применением сигналов с ЛЧМ в сравнении с традиционными (импульсными) ионозондами. Накоплена база экспериментального материала для исследования ионосферы с использование ионозонда с ЛЧМ.

В разделе 1.3 показана возможность использования сети ионозондов с ЛЧМ для регистрации и оценки скорости и направления движения ПИВ.

<u>Во второй главе</u> рассмотрены различные случаи экспериментального исследования и моделирования распространения коротких радиоволн на трассах наклонного зондирования ионосферы в условиях неоднородной ионосферной плазмы в приближении распространения сигнала в плоскости ДБК с пренебрежением влияния поперечных ионосферных градиентов на траекторию сигнала.

В разделе 2.1 выполнена экстраполяция максимальной применимой частоты на трассы, не оснащенные средствами диагностики, путем адаптации ионосферной модели IRI по данным наклонного зондирования в евроазиатском регионе. Адаптация модели IRI-2007 (либо IRI-2016) выполнялась путем сопоставления реальных экспериментальных данных H3 с результатами моделирования распространения сигнала в плоскости ДБК при распространении в ионосфере, задаваемой моделью IRI.

В разделе 2.2 проанализированы вариации диапазона частот прохождения КВ сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года.

В разделе 2.3 изучено распространение КВ сигналов на сети трасс наклонного зондирования в условиях повышенной солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 года. В данном разделе расширено изучение влияния ионосферных эффектов геомагнитной активности в высоких и средних широтах в результате магнитосферно-ионосферного взаимодействия электрического и магнитного полей в условиях усиления солнечного ветра и высыпания заряженных частиц на распространение КВ сигналов на среднеширотной и субавроральных трассах различного направления и протяженности.

В разделе 2.4 изучено влияние частного солнечного затмения 11 августа 2018 г. на характеристики ионосферного канала по данным наклонного зондирования. Рассмотрен эффект солнечного затмения, заключающийся в уменьшении максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) и наименьшей наблюдаемой частоты (ННЧ) на трассах наклонного ЛЧМ зондирования. При этом результаты наклонного зондирования использовались для обнаружения акустикогравитационных волн (АГВ) и их ионосферного отклика в виде ПИВ, генерируемых на высотах озонового слоя в стратосфере при движении лунной тени в атмосфере Земли во время солнечного затмения.

<u>В третьей главе</u> выполнено моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы при наличии поперечных градиентов электронной концентрации, приводящих к отклонению луча от плоскости ДБК и в результате к существенному изменению траектории, которое не может быть в полной мере описано двумерной моделью распространения радиоволн.

В разделе 3.1 рассмотрены существующие модели ионосферы в задачах распространения радиоволн в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы, их преимущества для практического применения в задачах моделирования.

В разделе 3.2 изучено влияние ПИВ на характеристики КВ сигналов при слабонаклонном распространении. Представлены результаты исследования перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) методом наклонного

зондирования на слабонаклонной трассе Васильсурск (56.13°N, 46.1°E, стенд Сура) – Нижний Новгород (56.0°N, 44.0°E). Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными и сделаны оценки направленно-скоростных характеристик ПИВ. Продемонстрировано образование многолучевости сигнала при наличии ПИВ.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Ф.И. Выборнову за научное руководство, консультации, плодотворные дискуссии, ценные советы и замечания по теме диссертации. Автор благодарен сотрудникам НИРФИ ННГУ им. Лобачевского за помощь в организации и проведении экспериментов. Глава 1. Применение аппаратно-программного комплекса с ЛЧМ в исследованиях ионосферы

Основные результаты главы опубликованы в работах [83-85].

1.1 Приёмо-передающая станция зондирования ионосферы сигналами с ЛЧМ

В работе для получения цифровых ионограмм методом наклонного зондирования ионосферы использовалась автоматизированная базовая радио приемо-передающая станция (БРПДС) зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) фирмы "SITKOM" LLC (г. Йошкар-Ола) [86].

Применение оборудования, использующее сигналы с ЛЧМ позволяет получить следующие преимущества по сравнению с традиционными (импульсными) ионозондами:

• габариты, масса и энергопотребление комплекта оборудования приблизительно в 10 раз меньшие;

• низкая излучаемая мощность (примерно в 1000 раз меньше);

• высокая энергетическая и структурная скрытность;

• возможность зондирования сверхдальних трасс, в том числе кругосветных;

• высокая разрешающая способность и помехозащищенность;

• возможность изменения параметров обработки сигнала уже после фактической (аппаратной) его регистрации. Возможно изменение полосы зондирующего импульса без изменения структуры зондирующего сигнала и перенастройки аппаратных средств, что позволяет делать обработку данных наиболее адаптированной под конкретные задачи.

Таким образом, БРПДС является приемо-передающей радиотехнической системой, обеспечивающей выполнение следующих основных функциональных задач:

• диагностика ионосферы и радиолиний по заранее запрограммированному расписанию:

- измерение высотно-частотной (ВЧХ) и дистанционно-частотной (ДЧХ) характеристик и их отображение на экране;

- измерение и отображение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ);

- построения профиля электронной концентрации;
- хранение цифровых данных, полученных в результате зондирования.

Основные технические характеристики данной станции, используемой для диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний в декаметровом (ДКМ) диапазоне волн, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Технические характеристики приёмо-передающей станции зондирования ионосферы сигналами с ЛЧМ

Технические характеристики	БРПДС
Диапазон частот, МГц	1.8 - 32
Виды модуляции	USB, LSB, CW, AM, RTTY (FSK),
	LFM
Чувствительность, мкВ	0.2
Нестабильность частоты ОГ	10-9
Шаг перестройки частоты, Гц	Не более 0,1
Скорость изменения частоты	0.001 - 1000
ЛЧМ сигнала, кГц/с	
Нелинейность перестройки	Не более 10-4
частоты ЛЧМ сигнала, %	
Диапазон наблюдаемых	0,05 – 55
задержек, мс	
Динамический диапазон, дБ	≥ 70
Полоса пропускания по ПЧ, Гц	2400, 6000
Сопротивление антенного	50
тракта, Ом	
Излучаемая мощность, Вт	2 - 1000

Внеполосные излучения, дБ	≤ - 50
Количество одновременно	4
подключаемых КВ антенн	
Режим зондирования	ВЗ – передача; НЗ – приём, передача
Функциональные	1. Функционирование БРПС по
характеристики программного	заданному пользователем расписанию
обеспечения	работы.
	2. Анализ
	фактическойдистанционно-частотной
	(ДЧХ) и амплитудно-частотной (АЧХ)
	характеристик зондируемой радиолинии.
	1. Запись и хранение
	информации в цифровой форме на
	жестком диске ПК с предварительной
	обработкой полученной информации
	(PNG-файлы ионограмм), либо без
	таковой (WAW-файлы).

1.2 Принцип зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом

Форму ЛЧМ сигнала, излучаемого передатчиком можно представить в виде:

$$a(t) = a_0 \cdot \cos(2\pi (f_{\mu}t + 0.5\dot{f} \cdot t^2) + \phi_1), \qquad (1.1)$$

где f_H и f_K - начальная и конечная частоты излучаемого сигнала соответственно;

 $f = f_n + \dot{f} \cdot t$ – текущая частота; $\dot{f} = df/dt$ – скорость изменения частоты;

 ϕ_l — начальная фаза сигнала.

В результате распространения зондирующего сигнала ЛЧМ (3.1) в ионосферном радиоканале ($\tau_{\phi}(t)$ =const) принимаемый сигнал $a_{\Pi}(t)$ можно представить следующим образом:

$$a_n(t) = a_{CP} \cdot a_0 \cos(\varphi_n(t)), \qquad (1.2)$$

где $\varphi_n(t) = \left(2\pi \left(f_n \cdot (t - \tau_{\phi}) + 0.5 \dot{f} \cdot (t - \tau_{\phi})^2\right) + \phi_1\right), \quad \tau_{\Phi}$ – фазовая задержка; $a_{CP}(t)$ – коэффициент ослабления сигнала при его распространении в ионосферном радиоканале.

При этом фазовая задержка τ_{ϕ} ЛЧМ сигнала является функцией частоты излучаемого сигнала f: $\tau_{\phi} = \tau_{\phi}(f)$.

Принятый ЛЧМ сигнал, попадая в приемник, с сигналом гетеродина $a_{I}(t)$, когерентным излучаемому ЛЧМ сигналу, с выделением низкочастотного разностного сигнала [86]. Этому соответствует математическая операция:

$$A(t) = a_n(t) \cdot a_o^*(t), \qquad (1.3)$$

где
$$a_{\sigma}(t) = a_0 \cos(\varphi_{\sigma}(t)),$$
 (1.4)

а $\varphi_{\partial}(t) = 2\pi (f_{\mu}t + 0.5\dot{f}\cdot t^2) + \phi_2$, где ϕ_2 – начальная фаза сигнала гетеродина.

Низкочастотный разностный сигнал A(t) выделяется с помощью ФНЧ, его можно записать в виде:

$$A(t) = \frac{a_{CP} \cdot a_0^2}{2} \cdot \sin(\varphi_n - \varphi_o) =$$

$$= \frac{a_{CP} \cdot a_0^2}{2} \cdot \sin(2\pi (f_n \tau - 0.5 \dot{f} \cdot \tau_o^2 + \dot{f} \cdot \tau_o \cdot t) + \Delta \phi), \qquad (1.5)$$

где $\Delta \phi = \phi_1 - \phi_2$.

Частота F_P разностного сигнала A(t) можно получить нахождением производной от фазы по времени. Используя (1.5), получаем:

$$F_{m} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\left(2\pi\left(f_{\mu}\tau_{\phi} - 0.5\dot{f}\cdot\tau_{\phi}^{2} + \dot{f}\cdot\tau_{\phi}\cdot t\right) + \Delta\phi\right)}{dt} = \frac{d\left(\tau_{\phi}\cdot\left(f_{\mu} + \dot{f}\cdot t\right)\right)}{dt} - 0.5 \cdot \frac{d\left(\dot{f}\cdot\tau_{\phi}^{2}\right)}{dt}.$$
(1.6)

Величина $f_{H} + \dot{f} \cdot t$ показывает изменение текущей частоты f ЛЧМ сигнала

от времени *t*, а выражение $0.5 \cdot \frac{d(\dot{f} \cdot \tau_{\phi}^{2})}{dt}$ можно опустить по причине, что $f \gg \dot{f} \cdot \tau_{\phi}$. Фактически текущая частота *f* варьируется в пределах 3-30 МГц, \dot{f} - 50-500 кГц/с, а τ_{ϕ} - 0-5·10⁻³ с.

С учетом данных приближений выражение (1.6) запишется в виде:

$$F_{m} = \frac{d}{dt} \left(\tau_{\phi}(f) \cdot f \right) = \frac{d\tau(f)}{dt} \cdot f + \tau(f) \cdot \frac{df}{dt} = \dot{f} \cdot \left(f \cdot \frac{d\tau_{\phi}}{df} + \tau_{\phi}(f) \right) = \dot{f} \cdot \tau, \quad (1.7)$$

где $\tau = f \cdot \frac{d\tau_{\phi}}{df} + \tau_{\phi}$ – групповая задержка ЛЧМ сигнала в ионосфере.

Приведенное выражение (1.7) показывает, что частота разностного сигнала зависит от скорости изменения частоты ЛЧМ сигнала и его групповой задержки τ в ионосферной радиолинии. После этого сигнал разбивается на последовательные сегменты длительностью T_{\Im} , для каждого из которых вычисляется быстрое преобразование Фурье. Каждый элемент разностного сигнала на протяжении T_{\Im} представляет собой отрезок гармонического колебания с частотой:

$$F_{\dot{o}} = \dot{f} \cdot \tau \,. \tag{1.8}$$

Последовательность спектров на массиве частот из диапазона зондирования формирует ДЧХ радиолинии.

В случае многолучевости, когда в точку приема одновременно приходит несколько лучей с разной задержкой τ_i , каждому из них соответствует своя разностная частота (см. рис. 1.1, где F_1 - разностная частота нижнего луча моды 1F2, F_2 - моды 2F2, F_3 - верхнего луча моды 3F2).

Анализатор спектра делит полосу пропускания приемника ΔF на части, каждая величиной $\delta F_{\Im} = \dot{f} \delta \tau$. Разрешающая способность по задержке $\delta \tau$ будет равна:

$$\delta \tau \approx \frac{\delta F_{\mathcal{F}}}{\dot{f}} \approx \frac{1}{\Delta f_{\mathcal{F}}}.$$
(1.9)



Рис. 1.1. Зависимость частоты сигнала с ЛЧМ от вида его распространения в ионосфере

Таким образом, при обработке ЛЧМ сигнала методом сжатия в частотной области отношение сигнал/шум увеличивается в $\frac{\Delta f_{\mathcal{P}}}{\Delta F} = B_{\mathcal{P}}$ раз.

Электромагнитная совместимость

Сначала проведем сравнительную оценку электромагнитной совместимости (ЭМС) импульсного и ЛЧМ ионозондов с системами КВ радиосвязи. Для оценок ЭМС возьмем стандартные для данных ионозондов параметры зондирующего сигнала. Для импульсного ионозонда: длительность радиоимпульса $\tau_u = 40 \ mkc$, период повторения (переключения изменения частоты) $T = 10 \ mc$, шаг сетки частот $\Delta f_{uu} = 5 \ \kappa \Gamma u$, мощность $P_u = 10 \ \kappa Bm$, база сигнала $B = \tau_u \cdot \Delta f_u = 1$; для ЛЧМ ионозонда: скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала $\frac{df}{dt} = 100 \ \kappa \Gamma u/c$, мощность

 $P_{H} = 10 Bm$, база сигнала $B = 10^{5}$. ЭМС импульсного и ЛЧМ ионозондов с РПУ КВ радиосвязи можно оценить путем следующих рассуждений. систем Импульсный ионозонд излучает импульс длительностью τ_{u} , амплитудный спектр которого имеет вид sin(x)/x, а полоса центрального лепестка составляет $\Delta f = \frac{2}{\tau} = 50 \kappa \Gamma \mu$. При пиковой мощности ионозонда $P_{\mu} = 10 \kappa Bm$ до десяти и более боковых лепестков создают значительное излучение, поэтому спектр импульсного сигнала одновременно «накрывает» все связные каналы в полосе частот не менее 500 кГц. При данных параметрах зондирующего сигнала импульсного ионозонда все связные радиоканалы, попадающие в полосу частот 500 кГц, будут «забиты» в течение $t = \frac{5 \cdot 10^5}{\Delta f_{...}} \cdot T = \frac{5 \cdot 10^5}{5 \cdot 10^3} \cdot 10^{-2} = 1 \text{ с, что приведет к «забитию» сотен бит$ информации, нарушив (большое количество ошибок) работу всех систем КВ радиосвязи попадающих в эту полосу частот (см. рис. 1.2a, метка «1»). ЛЧМ ионозонд, в каждый момент времени, излучает узкополосный квазигармонический сигнал небольшой мощности, спектр которого со скоростью $\frac{df}{dt} = 100 \kappa \Gamma \mu/c$ перемещается по оси частот ДКМ диапазона (см. рис. 1.26, метка «2»). Таким образом, ЛЧМ сигнал «проходит» через связные радиоканалы последовательно и в определенные моменты времени может находиться только в одном связном канале. Для полосы связного радиоканала в 3 кГц и данных параметрах зондирующего ЛЧМ сигнала связной радиоканал будут «забиты» в течении $t = \frac{\Delta f_{pny}}{df/dt} = \frac{3 \cdot 10^3}{10^5} = 30$

мс, что приведет к «забитию» всего несколько бит информации и не нарушит работы системы КВ радиосвязи.



Рис. 1.2. Спектр сигнала импульсного ионозонда (а) и ионозонда с ЛЧМ (б)

Если связной приемник принимает полезный сигнал (для SSB и AFSK) с уровнем равным -70 дБм, а зондирующий передатчик расположен вблизи связного приемника и развязка между ними составляет 80 дБ, то в случае импульсного зондирующего сигнала мощностью 10 кВт (70 дБм) на входе связного приемника будет наводиться мешающий сигнал -10 дБм, который будет превышать полезный сигнал на 60 дБм в большом числе связных радиоканалов (в полосе частот в несколько МГц). В случае зондирующего ЛЧМ сигнала мощностью 1 Вт (30 дБм) на входе связного приемника будет наводиться мешающий сигнал -50 дБм, который на 40 дБм меньше, чем для импульсного сигнала и занимает лишь один подканал (в несколько десятков Гц). Особо следует отметить, что в ЛЧМ ионозонде существует возможность при плавном перемещении квазигармонического сигнала по оси частот выключать излучение в те моменты времени, когда ЛЧМ сигнал «натыкается» на частотные радиоканалы связного приемника. При этом метрологические характеристики ЛЧМ ионозонда существенно не изменяются. Такой возможности у импульсного ионозонда не существует. Экспериментальные исследования ионосферы с использованием БРПДС фирмы "SITKOM" LLC (г. Йошкар-Ола) проводятся в НИРФИ ННГУ с 2017 г. Станции находятся в г. Нижнем Новгороде и п. Васильсурск. На их основе организован регулярный контроль за состоянием ионосферы на среднеширотных и субавроральных трассах наклонного зондирования в Евроазиатском регионе России с целью формирования базы данных ключевых параметров ионосферных коротковолновых (КВ) радиоканалов [85]. Близкое расположение ЛЧМ станций в г. Йошкар-Оле и г. Казани позволило в 2019 г. выполнить исследования параметров перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на трассах слабонаклонного зондирования [83, 84].

1.3 Регистрация ПИВ с помощь ионозонда с ЛЧМ

Специальный эксперимент, проведенный в 2019 г., по регистрации перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на трассах слабонаклонного зондирования с местами расположения ЛЧМ станций в городах Йошкар-Оле, Казани, Нижнем Новгороде и п. Васильсурск позволил определить скорость и направление распространения возмущения [83]. Трасса Васильсурск-Нижний Новгород имеет длину 129.5 км и азимут 280.26°, Васильсурск-Йошкар-Ола – 123.3 км, 63°, Васильсурск-Казань – 193.3 км, 99.69° (см. рис. 1.3).

В ходе эксперимента сильные ионосферные возмущения, проявляющиеся на ДЧХ в виде «серпов», были зарегистрированы 19 декабря многократно на всех трассах (см. рис. 1.4 и 1.5). На трассах Васильсурск – Казань (рис 1.4а) и Йошкар-Ола – Казань (рис 1.4b) почти одновременно наблюдаются однотипные возмущения ДЧХ.

При этом 18 декабря в период с 9:13 по 9:17 UT ПИВ регистрировались только на трассе Йошкар-Ола – Казань, имеющей азимут 139° и длину 120 км.

Нормированные значения интенсивности наблюдаемого сигнала ПИВ на трассах НЗ для 19 сентября 2019 приведены на рис. 1.6.

Наблюдаемая динамика изменения критической частоты слоя F и истинной высоты точки отражения на частоте 4 МГц при наличии ПИВ в Васильсурске по данным вертикального зондирования (ионозонд CADI) приведена на рис. 1.7.



Рис. 1.3. Схема расположения станций с ЛЧМ в ходе экспериментов по слабонаклонному зондированию ионосферы



Рис. 1.4. Ионограммы при наличии ПИВ 19 декабря 2019 в 10:11 и 10:12 UT на трассах: Васильсурск – Казань (а); Йошкар-Ола – Казань (b) соответственно



Рис. 1.5. Регистрируемые ионограммы с ПИВ 19 декабря 2019 с 9:59 по 10:19 UT на трассах: Васильсурск – Йошкар-Ола (а); Казань – Йошкар-Ола (b)



Рис. 1.6. Нормированные значения интенсивности наблюдаемого сигнала ПИВ 19 сентября 2019 с 9:30 по 10:30 UT на трассах: Васильсурск – Йошкар-Ола (a,c); Казань – Йошкар-Ола (a,b); Казань – Васильсурск (b,c)

Используя сеть трасс H3, можно найти величину скорости и направление движения возмущения (ПИВ). Введем обозначения как l - расстояние, α - азимут, t - время задержки появления ПИВ на средних точках трасс, v - скорость, φ азимут вектора скорости ПИВ. Обозначим индексы так, чтобы i=1 соответствовал средней точке трассы Казань – Йошкар-Ола; i=2 средней точке трассы Васильсурск – Йошкар-Ола; i=3 средней точке трассы Казань – Васильсурск. Получаем системы уравнений (1.10-1.11) [83].

$$\upsilon \cdot t_{1i} = l_{1i} \cdot \cos(\alpha_{1i} - \varphi), \ i = 2,3$$
 (1.10)

$$\upsilon \cdot t_{2i} = l_{2i} \cdot \cos(\alpha_{2i} - \varphi), \ i = 2,3$$
 (1.11)

Решение первой системы дает значение вектора скорости U=120 м/с и азимута вектора скорости $\varphi=154$ градуса. Решения второй и третьей систем дают U=100 м/с, $\varphi=161$ градусов и U=115 м/с, $\varphi=161$ градус соответственно.

Хорошо известно, что типичным направлением движения фазы ПИВ на средних широтах является направление от высоких широт к низким. Именно такой результат ($\varphi \sim 159^{\circ}$) был получен в ходе эксперимента. Стоит отметить, что трасса Йошкар-Ола – Казань имеет азимут (φ =139°) , который достаточно близок к полученному направлению ПИВ. Именно на данной трассе наблюдалось ПИВ 18 декабря, когда на других трассах оно не было зарегистрировано. По результатам наблюдения ПИВ 18 – 19 декабря, можно отметить, что 19 декабря наблюдались наиболее значительные искажения ДЧХ, причем на всех рассматриваемых трассах H3. Данные по геофизической активности на данный промежуток времени приведены на рис. 1.8. [83], где можно видеть понижение индекса Dst и увеличение скорости солнечного ветра именно в период с 18 на 19 декабря 2019 г. Результат воздействия повышенной геомагнитной активности на ионосферу мы могли наблюдать по увеличению вероятности появления и увеличению интенсивности ПИВ 19 декабря.

Выполненные оценки позволяют утверждать, что наблюдаемые ПИВ распространялись в типичном направлении от высоких широт к низким

преимущественно в восточном направлении ($\varphi \sim 159^\circ$) с горизонтальной скоростью ~ 112 м/с.



Рис. 1.7. Зависимость критической частоты f0F2 (красная линия) и истинной высоты точки отражения на частоте 4 Мгц (синяя линия) по данным ионозонда вертикального зондирования CADI (Васильсурск) 19 декабря 2019 г.



Рис. 1.8. Геофизическая активность в декабре 2019 г.

1.4 Заключение по первой главе

1. Рассмотрены особенности функционирования аппаратно-программного комплекса наклонного зондирования ионосферы ЛЧМ сигналом. Объяснен принцип зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом. Показаны преимущества ЛЧМ станции зондирования ионосферы по сравнению с традиционными (импульсными) ионозондами. Приведены технические данные используемой приемо-передающей станции (БРПДС) зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией. Проведена сравнительная оценка электромагнитной совместимости импульсного и ЛЧМ ионозондов с системами КВ радиосвязи.

2. Организован регулярный контроль за состоянием ионосферы на среднеширотных и субавроральных трассах наклонного зондирования в Евроазиатском регионе России с накоплением базы данных НЗ.

3. Выполнены исследования по оценке параметров перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на трассах слабонаклонного зондирования с применением пространственно-разнесенных синхронно работающих ионозондов с ЛЧМ. Полученные значения направления и скорости ПИВ (*Φ* ~159°, *U*~112 м/с) хорошо согласуются с теорией.

Глава 2. Экспериментальное исследование и моделирование распространения коротких радиоволн на трассах наклонного зондирования ионосферы

Основные результаты главы опубликованы в работах [10, 43, 67, 68, 77-82, 87-89].

2.1. Прогнозирование максимальной применимой частоты. Коррекция модели ионосферы путем адаптации ионосферной модели IRI по данным наклонного зондирования в евроазиатском регионе

Надежность современной аппаратуры КВ радиосвязи, низкая стоимость эксплуатации по отношению к спутниковым системам, высокая живучесть в экстремальных условиях и быстрая восстанавливаемость обусловили рост интереса к системам КВ радиосвязи во многих странах. Эффективное управление ресурсами КВ диапазона зависит от точности и оперативности прогнозирования характеристик ионосферного радиоканала.

Ионосфера подвержена значительным пространственно-временным вариациям, которые обусловлены изменчивостью солнечного излучения и многообразием физико-химических процессов в системе магнитосфера – ионосфера – атмосфера. Вариации ионосферных параметров могут неблагоприятно влиять на системы навигации и связи, в которых используются спутниковые GPS/ГЛОНАСС, позиционирования загоризонтные КΒ системы радары, авиационная радиосвязь. В целях смягчения неблагоприятных воздействий ионосферы на военные и гражданские системы используются различные подходы для прогнозирования и корректировки ионосферных моделей, предназначенных для адаптации радиоэлектронных систем к условиям распространения радиоволн. Применяются различные модели, в том числе эмпирические и аналитические модели, глобальные и гибридные модели.

Для долгосрочного прогнозирования используется статистическая модель ионосферных параметров, основанная на усредненных данных. Большое распространение получила прогностическая справочная модель ионосферы

International Reference Ionosphere (IRI) [90]. Эта модель ионосферы постоянно совершенствуется, однако вариации ионосферы и быстрые изменения гелиогеофизических условий влияют на эффективность такого прогнозирования.

Для прогнозирования на короткие интервалы времени (от нескольких минут до суток) требуется мониторинг ионосферных параметров с такими же временными интервалами с целью повышения точности прогноза. Для ионосферного ионозонды с зондирования канала широко применяются непрерывным излучением линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала, обладающие высокой помехозащищенностью [4]. Однако, отсутствие постоянно работающей разветвленной сети ЛЧМ ионозондов делает актуальной задачу пространственно-временного прогнозирования ключевого параметра ионосферного канала – максимальной применимой частоты (МПЧ) и ее экстраполяции на трассы, не оснащенные средствами диагностики. При длительных (десятки минут, часы) сеансах связи определение значимых временных интервалов корреляционных связей максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) особенно важно. Устанавливать пространственно-временные корреляционные связи параметров КВ канала и использовать их для прогнозирования на короткие (десятки минут) оказывается возможным интервалы времени благодаря инерционности ионосферных процессов, причем радиус пространственной корреляции вариаций критической частоты ионосферы оказывается равен ~ 1000 и 1500 км в направлении север-юг и восток-запад соответственно по измерениям в [25].

Используемая в разделе прогностическая справочная модель ионосферы International Reference Ionosphere (IRI) наиболее доступна и удобна для автономного использования при проведении моделирования распространения радиоволн в ионосфере. Модель IRI удобна тем, что является глобальной. С её помощью легко получить профиль ионосферной концентрации для выбранной географической точки на нужный день и час (получить прогноз), однако, такой прогноз является долгосрочным и недостаточно точным, поскольку не учитывает
фактическую ионосферную ситуацию на выбранную дату и время прогнозирования. При этом известно, что состояние ионосферы изменяется день ото дня в зависимости от гелиогеофизических условий и эффективность долгосрочного прогноза может оказаться слишком низкой.

Краткосрочный прогноз на короткие интервалы времени (день, час или несколько минут) уже требует мониторинга ионосферных параметров с такими же временными интервалами. С этой целью могут выполняться измерения в реальном масштабе времени способом вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования ионосферы, а также с применением сигналов навигационных систем GPS и ГЛОНАСС для мониторинга ионосферы Земли [26-30]. С помощью распределенной сети станций становится возможным оперативно получать данные о состоянии ионосферы в контрольных точках и экстраполировать их на близлежащий регион, где отсутствуют средства зондирования ионосферного канала.

Использование моделирования наклонного распространения КВ в ионосфере, задаваемой моделью IRI, совместно с использованием эмпирических данных с ЛЧМ ионозондов позволяет одновременно решить сразу две задачи:

1) адаптация модели IRI по реальным данным распространения КВ в ионосфере на данную дату и время;

2) прогнозирование ключевого параметра ионосферного канала – максимальной применимой частоты (МПЧ) и ее экстраполяцию на трассы, не оснащенные средствами диагностики.

В разделе представлены результаты прогнозирования и экстраполяции МПЧ на субавроральных и среднеширотной трассах путем адаптации справочной модели ионосферы IRI-2007 и IRI-2016 к результатам наклонного ЛЧМзондирования ионосферы на контрольных и рабочих радиолиниях.

Метод исследования

За счет инерционности ионосферных процессов определяются пространственно-временные корреляционные связи параметров КВ канала, что используется для прогнозирования на короткие интервалы времени (десятки минут), что важно для обеспечения устойчивой КВ радиосвязи в периоды быстрой перестройки ионосферы и во время ионосферных возмущений [25].

В работах [26, 31, 32] экспериментальные данные по МНЧ, получаемые на сети трасс наклонного зондирования (НЗ) используются для определения эффективного числа солнечных пятен или солнечного потока на длине волны λ = 10.7 см. Поток находится из условия, чтобы прогнозируемая модель обеспечивала измеряемую МНЧ. Для односкачковых трасс поток связывается с состоянием ионосферы в средней точке трассы НЗ, которая принимается за ионосферную контрольных точек. В случае, если другие контрольные точки расположены достаточно близко к средней точке прогнозируемой трассы, то ее МПЧ может быть уточнено путем линейной интерполяции экспериментальных данных [32]. Результаты эксперимента [32] свидетельствуют, что процедуру интерполирования данных НЗ на средних широтах, повышающую точность прогноза, имеет смысл проводить в пределах области, простирающейся приблизительно на 700 км в широтном и ~ 400 км в долготном (меридиональном) направлениях.

Результаты наблюдений и моделирования.

Исследования пространственно-временных корреляционных связей максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) проводились в декабре 2016г. и сентябре 2017г. В первом цикле измерения проводились на субавроральных трассах наклонного ЛЧМ-зондирования Соданкюля (Финляндия) – Нижний Новгород, Ловозеро (Мурманская обл.) – Нижний Новгород, Салехард – Нижний Новгород, Диксон – Нижний Новгород и на среднеширотной трассе ст. Горьковская (Ленинградская обл.) – Нижний Новгород. Во втором цикле - на

трассах Соданкюля – Васильсурск (Нижегородской обл.), Ловозеро – Васильсурск, Салехард – Васильсурск, Диксон – Васильсурск и ст. Горьковская – Васильсурск. Схемы экспериментов показаны на рис. 2.1 и 2.2.



Рис. 2.1. Схема эксперимента. Приемный пункт – Нижний Новгород



Рис. 2.2. Схема эксперимента. Приемный пункт – Васильсурск

В разделе приведены данные, полученные 17 декабря 2016г. и 3 сентября 2017г. при спокойной ионосфере и с магнитным индексом $K_p \sim 1$ и 1-3, соответственно.

Передатчики в Ловозеро, Салехарде, Диксоне и ст. Горьковская работали круглосуточно с интервалом зондирования 15 минут; диапазон частот 2-30 МГц, скорость перестройки частоты 550 кГц/с. Передатчик в Соданкюля работал в диапазоне частот 2 – 16 МГц, скорость перестройки частоты составляла 500 кГц/с, интервал зондирования – 5 минут. Прием проводился в Нижнем Новгороде и Васильсурске. На рисунках 2.1 и 2.2 средние точки контрольных трасс Ловозеро (Мурманская обл.) – Нижний Новгород, Васильсурск; Салехард – Нижний Новгород, Васильсурск и ст. Горьковская – Нижний Новгород, Васильсурск соединены между собой; там же отмечены средние точки рабочих трасс Соданкюля – Нижний Новгород, Васильсурск и Диксон – Нижний Новгород, Васильсурск. В таблице 2.1 указаны координаты приемо-передающих пунктов, а в таблицах 2.2 и 2.3 приведены расстояния между средними точками различных трасс для приемных пунктов Нижний Новгород и Васильсурск, соответственно.

Приёмо-передающие пункты	Географические координаты		
Нижний Новгород	56,00°N, 44,00° E		
Васильсурск	56,1°N, 46,1° E		
Ловозеро	68,00°N, 35,02°E		
Салехард	66,52°N, 66,37°E		
НИС Горьковская	60,27°N, 29,38°E		
Соданкюля	67.4°N, 26.6°E		
Диксон	73.5°N, 80.7°E		

Таблица 2.1. Координаты приемо-передающих пунктов

На основе данных, полученных на исследуемых трассах в спокойных ионосферных условиях, была определена временная зависимость МНЧ.

Таблица 2.2. Расстояния между средними точками трасс для приемного пункта Нижний Новгород

Пары трасс: трасса 1/ трасса 2		
Ловозеро – Нижний Новгород/Горьковская – Нижний Новгород	450	
Ловозеро – Нижний Новгород/ Соданкюля – Нижний Новгород	180	
Горьковская – Нижний Новгород/Салехард – Нижний Новгород		
Ловозеро – Нижний Новгород /Диксон – Нижний Новгород		
Ловозеро – Нижний Новгород/Салехард – Нижний Новгород		
Диксон – Нижний Новгород /Салехард – Нижний Новгород		

Таблица 2.3. Расстояния между средними точками трасс для приемного пункта Васильсурск

Пары трасс: трасса 1/трасса 2	D, км	
Ловозеро – Васильсурск/Горьковская – Васильсурск	452	
Ловозеро – Васильсурск/ Соданкюля – Васильсурск	182	
Ловозеро – Васильсурск /Диксон – Васильсурск	871	
Ловозеро – Васильсурск /Салехард – Васильсурск	675	
Диксон – Васильсурск/Салехард – Васильсурск	472	
Ловозеро – Васильсурск/Горьковская – Васильсурск	452	

По ним вычислялся коэффициент временной корреляции. Затем с помощью уравнения регрессии делался прогноз МНЧ на различный интервал времени. Согласно полученным данным коэффициент корреляции МНЧ моды 1F2 на интервал прогноза $\tau \approx 0.5 - 1$ час составлял величину $\rho \sim 0.7 - 0.9$. С ростом τ коэффициент корреляции уменьшался. Для разных трасс длина выборки составляла, в среднем, от 31 до 76 значений.

Коэффициент пространственной корреляции МНЧ моды 1F2 на субавроральных и среднеширотной трассах составлял величину ρ ~ 0,8 – 0,95.

Высокие значения коэффициентов пространственной корреляции МНЧ позволили применить для прогнозирования и экстраполяции МНЧ метод адаптации глобальной модели ионосферы по результатам НЗ.

Адаптация глобальной модели ионосферы осуществлялась путем коррекции ее основного параметра - числа солнечных пятен W. Для этого рассчитывался суточный ход МПЧ с помощью программы компьютерного моделирования распространения радиоволн [91], в которой ионосфера задавалась моделью IRI-2007 [90], а управляющим параметром использовалось значение W прогностического ряда по данным SWPC, Боулдер [92]. Переход от ряда значений W к используемым в модели IRI-2016 ионосферным индексам IG12 и скользящему среднему Rz12 может быть выполнен способом, описанном в статье [93].

Коррекция параметра W в ионосферной модели приводит к глобальному изменению распределения электронной концентрации над поверхностью Земли и, соответственно, вдоль трассы, что приводит к изменению МПЧ. За счет коррекции W рассчитанное значение МПЧ подгоняется к экспериментальному значению МНЧ с минимальной погрешностью *о*.

Далее считалось, что модель с выбранным значением W адекватно описывает распределение электронной концентрации в окрестности исследуемой трассы. Адаптированная таким образом модель используется как для прогнозирования поведения МПЧ для данной трассы на временной интервал прогноза, так и для экстраполяции МПЧ на соседние трассы, не оснащенные средствами диагностики. Подбор нового значения W производился в том случае, когда отклонение δ превышало заданное значение δ_{max} .

Результаты для 17 декабря 2016 г.

В качестве контрольной трассы использовалась трасса Ловозеро – Нижний Новгород. На рис. 2.3 (крестики) показан временной ход МНЧ моды 1F2 на этой трассе для 17.12.2016 г. Путем подбора числа солнечных пятен W проводилось моделирование ионограмм наклонного зондирования для наилучшего совпадения расчетной и экспериментальной ионограмм. Модельная кривая МПЧ, рассчитанная

по адаптивной модели ионосферы IRI-2007, приведена на рис. 2.3 (красная кривая 2). Вертикальными линиями отмечены моменты времени, когда в расчетах изменялось число W.



Рис. 2.3. Временной ход МНЧ моды 1F2 на трассе Ловозеро – Нижний Новгород для 17.12.2016 г.

Значение W в каждом временном интервале указано в поле рисунка. Результаты расчета МПЧ по долгосрочному прогнозу по данным [92] показаны синей кривой 1. Эффективность прогноза оценивалась по формуле [94]

$$\delta = \frac{\left[\sum_{i} (P_{i} - Q_{i})^{2}\right]^{1/2}}{\left(\sum_{i} Q_{i}^{2}\right)^{1/2}} \cdot 100\%, \qquad (2.1)$$

где *P_i* - прогноз (МПЧ), *Q_i* – эксперимент (МНЧ). Рассчитывалось также среднее отклонение

$$\Delta(M\Gamma u) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (M\Pi \Psi_i - MH\Psi_i)^2\right]^{1/2}.$$
(2.2)

Для разных трасс и дней наблюдений длина выборки N составляла от 15 до 20 значений.

Согласно оценкам прогноз по адаптированной модели дает среднюю ошибку $\delta_2 = 4.7\%$. По долгосрочному прогнозу, когда по данным [92] для условий проведения эксперимента значение W=15, ошибка прогноза составляет δ_1 =19.1%, т.е. существенно выше, чем для прогноза по адаптированной модели ионосферы. Среднее значение Δ_2 для всего временного ряда по адаптированной модели составляет величину ~ 0.5МГц, а по долгосрочному прогнозу Δ_1 ~ 2.1МГц. На рис. 2.4-2.7 приведены экспериментальные (МНЧ) и расчетные (МПЧ) для рабочих субавроральных трасс Соданкюля – Нижний Новгород, Салехард – Нижний Новгород, Диксон – Нижний Новгород и среднеширотной трассы Горьковская – Нижний Новгород. Для всех этих трасс в расчетах использовалось значение W, полученное на контрольной трассе Ловозеро – Нижний Новгород. В поле всех рисунков приведены значения W, ошибки прогноза δ и отклонения Δ для долгосрочного прогноза и для прогноза по адаптированной модели. Как видно из рисунков, в утренние и вечерние часы в период перестройки ионосферы моменты времени изменения значения W для различных трасс могут отличаться на небольшую величину ~20-30 минут.

Из рисунков видно, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы ошибки прогнозирования МПЧ на контрольной трассе и ошибки экстраполяции МПЧ на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния ~ 180÷870 км составляют ~ 4.7÷8.6%, что существенно меньше, чем ошибки по данным долгосрочного прогнозирования ~ 18÷21%.



Рис. 2.4. Временной ход МНЧ моды 1F2 на трассе Соданкюля – Нижний Новгород для 17.12.2016 г.



Рис. 2.5. Временной ход МНЧ моды 1F2 на трассе Салехард – Нижний Новгород для 17.12.2016 г.



Рис. 2.6. Временной ход МНЧ моды 1F2 на трассе Диксон – Нижний Новгород для 17.12.2016 г.



Рис. 2.7. Временной ход МНЧ моды 1F2 на трассе Горьковская – Нижний Новгород для 17.12.2016 г.

Для экстраполяции МПЧ используется также, предложенный в [32] метод контрольных точек, когда по данным зондирования и адаптации ионосферной модели на трех контрольных трассах для расчета МПЧ на соседних радиолиниях осуществляется линейная интерполяция числа солнечных пятен.

При этом для всех трех контрольных трасс по модели ионосферы IRI рассчитываются МПЧ и путем подбора числа солнечных пятен W_i добиваются наилучшего согласования с экспериментальным значением МНЧ. В результате моделирования получают значения W₁, W₂ и W₃ для трасс 1, 2 и 3 соответственно. В эксперименте используются контрольные трассы: Горьковская – Нижний Новгород, Ловозеро – Нижний Новгород и Салехард – Нижний Новгород.

Далее в предположении линейной зависимости значений W_i от географических координат средних точек трасс (точек отражения радиоволн) в их небольшой окрестности имеем уравнение

$$W = a + bx + cy, \tag{2.3}$$

где a,b,c - постоянные, $x \equiv \varphi$, $y \equiv \lambda$ - широта и долгота средней точки трассы H3, соответственно.

Затем решается система линейных уравнений:

$$W_{1} = a + bx_{1} + cy_{1}$$

$$W_{2} = a + bx_{2} + cy_{2},$$

$$W_{3} = a + bx_{3} + cy_{3}$$
(2.4)

где $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ - географические координаты средних точек трех контрольных трасс H3.

Трассы H3 и их средние точки показаны на рис. 2.1. Путем решения системы (2.4) определяются постоянные a^*, b^*, c^* для каждого временного интервала T, т.е. находится зависимость числа солнечных пятен W (параметр модели IRI) от координат (x,y), которыми могут быть точки отражения соседних трасс вблизи контрольных точек (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3).

Для апробации метода используются данные МНЧ на рабочих трассах Соданкюля – Нижний Новгород и Диксон – Нижний Новгород, координаты их средних точек (x_c, y_c) и (x_{δ}, y_{δ}) отмечены на рис. 2.1. Для этих точек получаем уравнения $W_c = a^* + b^* x_c + c^* y_c$ и $W_{\delta} = a^* + b^* x_{\delta} + c^* y_{\delta}$ и находятся значения W_c и W_{δ} . Для этих значений W_c и W_{∂} делается расчет ионограмм H3 на трассах Соданкюля – Нижний Новгород и Диксон – Нижний Новгород и определяются МПЧ. Данные МПЧ сопоставляются с экспериментом, и находятся ошибки экстраполяции. Результаты обработки и расчетов приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Ошибки прогнозирования и экстраполяции МПЧ по данным для 17.12.2016 г.

Дата,	Трасса	1F	1F МПЧ,	W	δ, %
время UT		МНЧ,	ΜΓц		
		ΜΓц			
17.12.2016	Горьковская-Нижний Новгород	9.54	9.4	56	1.5
07:00	Ловозеро – Нижний Новгород	9.74	9.8	38	0.6
	Салехард – Нижний Новгород	13.98	13.8	49	1.3
	Соданкюля-Нижний Новгород	9.9	10.0	36	1.0
	Диксон – Нижний Новгород	14.4	14.3	40	0.7
09:00	Горьковская-Нижний Новгород	11.1	11.0	40	0.9
	Ловозеро – Нижний Новгород	12.8	12.8	38	0
	Салехард – Нижний Новгород	14.89	14.9	40	0.1
	Соданкюля-Нижний Новгород	14.08	13.6	38	3.4
	Диксон – Нижний Новгород	16.85	16.4	39	2.7
12:30	Горьковская-Нижний Новгород	8.155	8.0	26	1.9
	Ловозеро – Нижний Новгород	8.4	8.3	17	1.2
	Салехард – Нижний Новгород	7.87	7.9	16	0.4
	Соданкюля-Нижний Новгород	9.33	9.4	18	0.75
	Диксон – Нижний Новгород	8.4	8.35	10.9	0.6

Как видно из таблицы 2.4, если значения числа солнечных пятен W по трем контрольным точкам подобраны таким образом, что ошибки прогнозирования МПЧ по ним составляют ~ 0.1÷1.9%, то ошибки экстраполяции МПЧ на рабочие

трассы (Соданкюля – Нижний Новгород и Диксон – Нижний Новгород), средние точки которых расположены в пределах ~ 180 – 470 км от ближайших средних точек контрольных трасс (см. рис. 2.1 и таблицу 2.2), составляют ~ 0.6÷3.4%, что, на наш взгляд, вполне приемлемо для обеспечения надежной работы связных радиолиний (с адаптацией по частоте), не оснащенных средствами диагностики ионосферного КВ канала.

Результаты для 3 сентября 2017 г.

В качестве контрольной трассы была выбрана трасса Ловозеро –Васильсурск. На рис. 2.8 (крестики) показан временной ход МНЧ моды 1F2 на этой трассе для 3.09.2017 г. Моделирование ионограмм наклонного зондирования проводилось при различном числе солнечных пятен W с целью нахождения такого значения параметра W, при котором наблюдается минимальное отклонение полученного значения МНЧ от экспериментального. Модельная кривая МПЧ, рассчитанная по адаптивной модели ионосферы IRI-2007, приведена на рис. 2.8 (красная кривая 2). Вертикальными линиями отмечены моменты времени, когда в расчетах изменялось число W.

Согласно оценкам прогноз по адаптированной модели дает среднюю ошибку $\delta_2 = 6.4\%$. По долгосрочному прогнозу, когда по данным [92] для условий проведения эксперимента значение W = 18, ошибка прогноза ДП составляет $\delta_1 = 9.5\%$, т.е. заметно выше, чем для прогноза по адаптированной модели ионосферы. Среднее значение Δ_2 для всего временного ряда по адаптированной модели составляет величину ~ 0.66МГц, а по долгосрочному прогнозу $\Delta_1 \sim 0.98$ МГц. На рис. 2.9-2.11 приведены экспериментальные (МНЧ) и расчетные (МПЧ) для рабочих субавроральных трасс Соданкюля – Васильсурск, Салехард – Васильсурск, Диксон – Васильсурск и среднеширотной трассы Горьковская – Васильсурск.



Рис. 2.8. Временной ход МНЧ моды 1F2 на трассе Ловозеро – Васильсурск для 3.09.2017 г.

Для всех этих трасс в расчетах использовалось значение W, полученное на контрольной трассе Ловозеро – Васильсурск. В поле всех рисунков приведены значения W, ошибки прогноза δ и отклонения Δ для долгосрочного прогноза и прогноза по адаптированной модели. Как видно из рисунков, в вечерние часы момент времени изменения значения W для трассы Диксон – Васильсурск приходится на 16 UT, а на остальных трассах в 19.30 UT, что обусловлено долготным эффектом смещения первой трассы в восточном направлении по сравнению с ориентацией других трасс. По сравнению с зимним месяцем в начале осеннего периода для всех трасс временной интервал постоянного значения W, используемого для прогнозирования МПЧ в адаптированной модели IRI, заметно больше.

По рисункам 2.9-2.11 можно видеть, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы ошибки прогнозирования МПЧ на контрольной трассе и ошибки экстраполяции МПЧ на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния ~ 180÷870 км составляют ~ 4.9÷9.6%, что меньше, чем ошибки по данным долгосрочного прогнозирования ~ 7.5÷12.9%.

Небольшой рост ошибок прогнозирования в случае 03.09.2017 г. с использованием адаптированной модели для трасс Горьковская – Васильсурск, Соданкюля – Васильсурск и Ловозеро – Васильсурск по сравнению с данными для 17.12.2016 г. обусловлен влиянием вечернего летнего максимума в 17-18 UT (см. рис. 2.8, 2.9, 2.11б), формируемого за счет смены направления меридионального термосферного ветра [42].



Рис. 2.9. Временной ход МНЧ моды 1F2 на трассе Соданкюля – Васильсурск для 3.09.2017 г.



Рис. 2.10. Временной ход МНЧ моды 1F2 на трассе Салехард – Васильсурск для 3.09.2017 г.





Рис. 2.11. Временной ход МНЧ моды 1F2 для 3.09.2017 г. на трассе: Диксон – Васильсурск (а) и Горьковская – Васильсурск (б)

Для более восточной ориентации трассы Диксон – Васильсурск вечерний максимум смещен на более ранние часы ~ 13-15 UT (см. рис. 2.11а) и выражен менее ярко, поскольку накладывается на регулярный суточный ход критической частоты.

Расчеты экстраполяции МПЧ по трем контрольным точкам на основе решения уравнений (2.3) и (2.4) приведены в таблице 2.5.

Дата,	Трасса	1F MHЧ,	1F МПЧ,	W	δ, %
время UT		ΜΓц	ΜΓц		
03.09.2017	Горьковская-Васильсурск	7.5	7.4	40	1.5
04:00	Ловозеро – Васильсурск	8.75	8.7	32	0.5
	Салехард –Васильсурск	10.1	10.1	24	0
	Соданкюля-Васильсурск	9.3	9.1	34	2.1
	Диксон – Васильсурск	12.8	12.1	16	5.4
11:00	Горьковская-Васильсурск	10.64	10.7	38	0.6
	Ловозеро – Васильсурск	12.58	12.5	34	0.2
	Салехард – Васильсурск	12.77	12.8	26	0.25
	Соданкюля-Васильсурск	13.58	13.6	36	0
	Диксон – Васильсурск	16.62	15.8	22	4.8
16:00	Горьковская-Васильсурск	9.3	9.3	40	0
	Ловозеро – Васильсурск	10.5	10.5	37	0
	Салехард –Васильсурск	10.4	10.4	30	0
	Соданкюля-Васильсурск	11.7	11.7	39	0
	Диксон – Васильсурск	11.9	12.4	27	4.2

Таблица 2.5. Ошибки прогнозирования и экстраполяции МПЧ

по данным для 03.09.2017 г.

Как видно из таблицы 2.5, если значения числа солнечных пятен W по трем контрольным точкам подобраны таким образом, что ошибки прогнозирования МПЧ по ним составляют ~ $0.1 \div 1.5\%$, то ошибки экстраполяции МПЧ на рабочие трассы (Соданкюля – Васильсурск и Диксон – Васильсурск), средние точки которых расположены в пределах ~ 180 - 470 км от ближайших средних точек контрольных трасс (см. рис. 2.2 и таблицу 2.3), составляют ~ $2 \div 5.4\%$, что, на наш взгляд, вполне приемлемо для обеспечения надежной работы связных радиолиний (с адаптацией по частоте), не оснащенных средствами диагностики ионосферного КВ канала.

Результаты для 10 августа 2018 г.

Исследования пространственно-временных корреляционных связей МНЧ проводились на субавроральных трассах наклонного ЛЧМ-зондирования Соданкюля (Финляндия) – Васильсурск, Ловозеро (Мурманская обл.) – Васильсурск, Салехард – Васильсурск, Амдерма – Васильсурск и на среднеширотной трассе ст. Горьковская (Ленинградская обл.) – Васильсурск.

Наблюдения проводились 10 августа 2018 г. Передатчики в Ловозеро, Салехарде, Амдерме и ст. Горьковская работали круглосуточно с интервалом зондирования 15 минут в диапазоне частот 2-30 МГц со скоростью перестройки частоты 550 кГц/с. Передатчик в Соданкюля работал в диапазоне частот 2 – 16 МГц, скорость перестройки частоты составляла 500 кГц/с, интервал зондирования – 5 минут. Прием проводился в Васильсурске. В таблице 2.1 приведены координаты приемо-передающих пунктов.

На основе данных, полученных на исследуемых трассах, была определена временная зависимость изменения МНЧ для спокойных условий. Согласно полученным данным коэффициент корреляции МНЧ моды 1F2 на интервале прогноза $\tau \approx 0,5-1$ час составлял величину $\rho \approx 0,9-0,95$. С ростом τ коэффициент корреляции уменьшался. Коэффициент пространственной корреляции МНЧ моды 1F2 на субавроральных и среднеширотной трассах составлял величину $\rho \sim 0,86-0,96$.

Высокие значения коэффициентов пространственной корреляции МНЧ позволили применить для прогнозирования и экстраполяции МНЧ метод адаптации глобальной модели ионосферы к результатам НЗ на рабочих радиолиниях. Адаптация глобальной модели ионосферы IRI-2016 осуществлялась путем коррекции ее управляющего параметра IG12 что приводит к изменению модельного распределения электронной концентрации вдоль трассы, т.е. к изменению ее МПЧ. Такая коррекция позволяет свести рассчитанное значение МПЧ к экспериментальной МНЧ с некоторой погрешностью σ.

Адаптированная таким образом модель используется как для прогнозирования поведения МПЧ для данной трассы на временной интервал

прогноза, так и для экстраполяции МПЧ на соседние трассы, не оснащенные средствами диагностики.

В качестве контрольной трассы использовалась трасса Ловозеро – Васильсурск. На рис. 2.12а (крестиками) показан временной ход МНЧ моды 1F2 на этой трассе для 10.08.2018 г. Измерения проходили в условиях спокойной магнитной обстановки (Кр = 1). Модельная кривая МПЧ, рассчитанная по адаптивной модели ионосферы IRI-2016, приведена красным цветом. Результаты расчета МПЧ по долгосрочному прогнозу показаны синим цветом. Эффективность прогноза оценивалась по формулам (2.1) – (2.2).

Значение Δ_2 для всего временного ряда составляет величину ~ 0,75 МГц.

На рис. 2.12б-д приведены экспериментальные (МНЧ) и расчетные (МПЧ) значения частот для рабочих субавроральных трасс Соданкюля – Васильсурск (рис. 2.126; δ_1 =11.1%, Δ_1 =1.9 МГц, δ_2 =8.2%, Δ_2 =0.87 МГц), Салехард – Васильсурск (рис. 2.12в; δ_1 =15.2%, Δ_1 =1.58 МГц, δ_2 =10.5%, Δ_2 =1.09 МГц), Амдерма – Васильсурск (рис. 2.12г; δ_1 =16.2%, Δ_1 =1.74 МГц, δ_2 =7.6%, Δ_2 =0.8 МГц) и среднеширотной трассы Горьковская – Васильсурск (рис. 2.12д; δ_1 =15.1%, Δ_1 =1.23 МГц, δ_2 =9.5%, Δ_2 =0.78МГц). Для всех этих трасс в расчетах использовались значения IG12=50 и Rz12=44.1, полученные на контрольной трассе Ловозеро – Васильсурск при адаптации ионосферной модели IRI-2016.

Из рисунков и приведенных данных видно, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы IRI-2016 ошибки прогнозирования МПЧ на контрольной трассе и ошибки экстраполяции МПЧ на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния ~ 180÷870 км составляют ~ 7.6÷10.5%, что существенно меньше, чем ошибки по данным долгосрочного прогнозирования ~ 15.1÷18.1%.



Рис. 2.12. Временной ход МНЧ и МПЧ моды 1F2 для трасс: а - Ловозеро – Васильсурск; б - Соданкюля – Васильсурск; в - Салехард – Васильсурск; г - Амдерма – Васильсурск; д - Горьковская – Васильсурск

Выводы

Проведенные исследования показывают, что использование адаптации ионосферной модели IRI по данным H3 обеспечивает заметный выигрыш в повышении точности прогноза ключевого параметра ионосферного KB канала – МПЧ по сравнению с долгосрочным прогнозом. Важно отметить, что преимущество метода H3 для прогнозирования и экстраполяции по сравнению с другими методами коррекции фоновой ионосферы (вертикальное зондирование, возвратно-наклонное зондирование и GPS/ГЛОНАСС) заключается в возможности непосредственного определения ключевых характеристик ионосферного KB канала для адаптации радиоэлектронных систем различного назначения к условиям распространения радиоволн.

В проведенной работе используются методы прогнозирования И экстраполяции ключевого параметра ионосферного КВ канала – максимальной применимой частоты (МПЧ) применительно к данным наклонного зондирования на сети среднеширотной и субавроральных трасс в обширном Евроазиатском регионе в интервале широт ~ 56÷73.5°N и долгот ~ 26.6÷80.7°E в условиях низкой солнечной активности. Была проверена работоспособность предложенных в [10, 27, 28] методов экстраполяции МПЧ, применительно к субавроральным трассам, проходящим через главный ионосферный провал, подверженный сильным вариациям. Для расчетов МПЧ используется справочная модель ионосферы IRI с адаптацией к условиям распространения радиоволи путем подбора числа солнечных пятен на контрольной трассе для наилучшего совпадения экспериментальных МНЧ и расчетных МПЧ.

Показано, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы ошибки прогнозирования МПЧ на контрольной трассе и ошибки экстраполяции МПЧ на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния ~ 180÷870 км составляют ~ 4.7÷8.6% (17.12.2016 г.) и ~ 4.9÷9.6% (03.09.2017 г.), что меньше, чем ошибки прогнозирования МПЧ по модели GAIM (≤ 10%) [95] и заметно меньше, чем

ошибки по данным долгосрочного прогнозирования ~ 18÷21% (17.12.2016 г.) и ~ 7.5÷12.9% (03.09.2017 г.).

В случае экстраполяции МПЧ по трем контрольным точкам показано, что для различных временных интервалов (утро, день, вечер) в условиях спокойной геомагнитной обстановки ошибки составляют ~ 0.6÷3.4% (17.12.2016 г.) и 2÷5.4% (03.09.2017 г.), что существенно меньше величины ошибки по долгосрочному прогнозу.

Следует отметить, что метод экстраполяции МПЧ по трем контрольным точкам обеспечивает несколько большую точность прогноза по сравнению с использованием только одной контрольной радиолинии. Хотя использование одной контрольной трассы имеет свои преимущества, поскольку для экстраполяции необходима только одна радиолиния, что немаловажно в условиях ограниченности средств зондирования. Это особенно значимо на перспективном арктическом направлении, где необходимо обеспечить устойчивую радиосвязь на обширной территории в сложных климатических и организационных условиях.

В целом можно сделать вывод, что в условиях спокойной геомагнитной обстановки использование метода наклонного зондирования для экстраполяция МПЧ на соседние радиолинии, не оснащенные средствами диагностики ионосферного КВ канала, путем адаптации ионосферной модели к условиям распространения радиоволн по данным зондирования на контрольной трассе, может быть достаточно эффективно с ошибкой прогноза ~ 2÷8%, что вполне приемлемо для обеспечения устойчивой работы радиоэлектронных систем различного назначения.

В дальнейшем планируется проведение исследований для проверки работоспособности данного метода на трассах наклонного зондирования в условиях повышенной магнитной и солнечной активности. Это особенно актуально для трасс в субавроральной ионосфере, структура которой, включая главный ионосферный провал, подвержена сильным вариациям во время магнитноионосферной возмущенности.

2.2 Вариации диапазона частот прохождения КВ сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года

Представлены результаты исследования вариаций ключевых характеристик ионосферного КВ канала: максимально наблюдаемой (МНЧ) и наинизшей наблюдаемой (ННЧ) частоты на субавроральной трассе Салехард – Васильсурск в условиях переменной магнитной активности в октябре 2016 года. Проведено сопоставление изменений МНЧ и ННЧ *F*- и Es-мод распространения в зависимости от индексов геомагнитной активности.

Введение

С целью бесперебойной работы радиоэлектронных систем различного назначения важно установить диапазоны изменчивости диапазона частот прохождения КВ сигналов от максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) до наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ) $\Delta f = MH4-HH4$ в различных гелиогеофизических условиях, для различных регионов и условий солнечно-магнитной активности [33, 34].

Изменчивость ионосферы, в основном, связана с солнечной и геомагнитной активностью. Гравитационные, приливные и планетарные волны переносят энергию из нижних слоев в верхнюю атмосферу и являются источником возмущений в ионосфере. [38-40]. Вклад солнечной активности зависит от солнечного цикла и связан с ультрафиолетовым и рентгеновским излучением, ионизирующем атмосферу. Геомагнитная активность обусловлена солнечным ветром и магнитосферно-ионосферным взаимодействием, приводящим к геомагнитным бурям. В высокоширотных регионах ионосферная изменчивость связана с высыпанием частиц и дрейфом плазмы вследствие магнитосферной конвекции [41].

Реакция критической частоты *F*-слоя на геомагнитные возмущения зависит от времени суток, времени года, широты и характера самого возмущения. Часто

оказывается, что во время магнитной бури критическая частота *F*-слоя снижается (так называемая отрицательная фаза бури). Это оказывает сильное влияние на устойчивость КВ радиосвязи, особенно в высокоширотных регионах [15, 17, 43].

Не существует однозначной взаимосвязи между ионосферными и магнитными возмущениями, хотя и считается, что ионосферные возмущения возникают всякий раз, когда возникают магнитные возмущения. Значительные магнитные возмущения могут приводить к незначительным ионосферным возмущениям и наоборот.

Метод automatic link establishment (ALE), выполняющий зондирование самим связным сигналом, а также использование современных модемов и пространственно-временной обработки сигналов также применяются для обеспечения устойчивой работы радиоэлектронных систем наряду с ионозондами вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования.

Все эти методы позволяют обеспечить надежную КВ радиосвязь, сопоставимую с надежностью спутниковой связи в спокойных (невозмущенных) геофизических условиях.

В условиях магнитно-ионосферных возмущений для обеспечения требуемой надежности необходимо нейтрализовать неблагоприятное воздействие таких возмущений на работу радиоэлектронных систем путем изменения маршрутизации передачи сообщений для обхода "пораженной" области ионосферы, либо изменением диапазона частот связи для использования дополнительных каналов распространения, особенно на высокоширотных радиолиниях, при отражении сигналов на ионосферных неоднородностях и спорадических образованиях, которые возникают в высокоширотной ионосфере во время возмущений.

Исследования диапазона изменений ключевых параметров ионосферного КВ канала в различных гелиогеофизических условиях и разработка рекомендаций для прогнозирования и предупреждения нарушений ионосферных условий становятся особенно важной задачей.

В разделе представлены результаты наблюдений вариаций параметров ионосферного КВ канала на субавроральной трассе в условиях перемежаемости

(изменчивости) спокойной и умеренной геомагнитной активности в октябре 2016 года.

Описание эксперимента и гелиогеофизической обстановки

Измерения проводились с 1 по 31 октября 2016 г. на субавроральной трассе наклонного ЛЧМ-зондирования Салехард (66.5°N, 66.37°E) – Васильсурск (56.1°N, 46.1°E) протяженностью 1572 км. ЛЧМ станции в Васильсурске и Салехарде однотипные, производства фирмы ООО "СИТКОМ", г. Йошкар-Ола. Максимальная излучаемая мощность составляет 1 кВт. В Васильсурске для приема сигнала ЛЧМ передатчика использовалась одномачтовая V-образная антенна, ориентированная на север. Высота подвеса на мачте составляла 15 метров, длина снижающихся вибраторов 70 м. Угол между вибраторами антенны составлял 40 градусов.

Антенна, которая использовалась на передачу в Салехарде, конструктивно устроена примерно также, но фермовая мачта имеет высоту около 30 м. Антенна ориентирована на ст. Горьковская Ленинградской области (60,27°N, 29,38°E).

Передатчик работал в диапазоне частот 2.0 – 29.0 МГц, скорость перестройки частоты $\partial f/\partial t$ составляла 550 кГц/с, интервал зондирования 15 минут. С 18 UT 23.10.16 до 10 UT 26.10.16 данных нет по технической причине.

Период наблюдений в октябре 2016 г. характеризовался переменной геомагнитной активностью. В целом, вспышечная активность Солнца была слабая. По данным [96] поток протонов в октябре 2016 года GOES-13 оставался практически постоянным и составлял 2.10⁻¹ см⁻²с⁻¹sr⁻¹ (с энергией большей 10 МэВ). Наблюдалось слабое возрастание потока с 12 по 14 и с 24 по 26 октября.

Поток электронов в конце сентября и октябре месяце, измеренный на спутниках GOES-13 и GOES-15, не превышал значений $2 \cdot 10^5$ см⁻²c⁻¹sr⁻¹. Он обладал сильной перемежаемостью и 28-29 сентября, 2, 4, 5, 10, 13-14, 15-20, 24-25 и 29 октября наблюдались сильные изменения потока, когда значения уменьшались в $10^3 - 10^7$ раз. Характер изменения потока 15 – 20 октября отличался дополнительным уменьшением фоновых значений в $10^2 - 10^3$ раз. Изменения потока электронов достаточно хорошо коррелирует с поведением индекса AE.

Повышенная геомагнитная активность 1-4 октября была связана с высокоскоростным солнечным ветром ~ 500-600 км/с и эффектами коронарного выброса масс (СМЕ) от эруптивного волокна в начале октября [97]. По данным [98] за октябрь 2016 г. спутником SOHO LASCO C2 было зарегистрировано 90 событий СМЕ. В основном это слабые (Very Poor Event или Poor Event по классификации сайта) коронарные выбросы масс со скоростями от 157 до 538 км/с. Из 17 событий СМЕ, которые не классифицируются как слабые, потенциально геоэффективными можно считать только произошедшие 01.10.2016 в 14:12:05UT (скорость 818 км/с), 04.10.2016 в 06:36:05UT (скорость 248 км/с), 24.10.2016 в 21:12:10UT (скорость 291 км/с), 26.10.2016 в 13:25:42UT (скорость 277 км/с) и 29.10.2016 в 23:24:05UT (скорость 514 км/с), которые могли повлиять на геомагнитную активность.

По данным [96] скорость солнечного ветра, измеренного на спутнике ACE, с 3 по 10 октября плавно изменялась от 480-550 км/с до 350-400 км/с 10 октября. 12 октября в 21:40UT скорость увеличилась с 350 до 420 км/с. Резко изменились и другие параметры (температура увеличилась с $2 \cdot 10^4$ K до $2 \cdot 10^5$ K, плотность плазмы увеличилась с 4 до 11 см⁻³). Параметры солнечного ветра восстановились только 14 октября. Аналогичный скачек скорости произошел 14 октября в 15:30UT, когда скорость солнечного ветра возросла с 370 до 450 км/с, а температура плазмы изменилась от $5 \cdot 10^4$ K до $20 \cdot 10^4$ K. Увеличение скорости продолжалось до 16 октября, когда достигла значения 750 км/м, затем началось плавное уменьшение скорости. 20 октября скорость снизилась до 370 км/с. Дальнейшие имеющиеся фрагментарные данные не позволяют детально проследить изменения скорости солнечного ветра, но 24 октября с 10 до 14UT скорость увеличилась с 390 до 800 км/с. Возросла и температура плазмы с $6 \cdot 10^4$ K до $8 \cdot 10^5$ K. Увеличение скорости солнечного ветра наблюдалось и 27 октября. Изменение параметров солнечного ветра в целом достаточно хорошо коррелирует с геомагнитной активностью.

Согласно [97] в октябре происходила неоднократная смена знака Вz компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) с северного на южное направление и обратно. Известно [99], что при отрицательных значениях Bz происходит пересоединение ММП с геомагнитным полем Земли и энергия

солнечного ветра в виде заряженных частиц поступает в магнитосферу. Согласно [97] значительные и длительные отрицательные значения компоненты Вz компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) имели место 13 октября, когда они достигали значений –10÷18 нТл.

В период 25-30 октября Вz компонента ММП неоднократно меняла знак с северного на южное направление и обратно с преобладающими значениями отрицательных величин Bz ~ – (4÷14 нTл).

24 и 25 октября наблюдалось достаточно сильное увеличение скорости солнечного ветра от 400 км/с до 750 км/с. Затем к 27 октября скорость солнечного ветра снизилась до 680 км/с. 25 октября в 10:16UT компонента Вz отклонилась на юг до значения – 17 нТл.

Общая геофизическая обстановка в период проведения эксперимента показана на рис. 2.13. Во время наблюдений имели место несколько периодов магнитной активности. Первый в начале октября приходился на фазу восстановления умеренной магнитной бури, главная фаза которой продолжалась с 06 UT 29.09.16 г. до 09 UT 29.09.16 г., когда индекс Dst достиг минимального значения – 66 нТл [100] (см. рис. 2.13а). Напомним, что индекс Dst показывает изменение геомагнитного поля в результате воздействия магнитного поля кольцевого тока в магнитосфере, образуемого за счет захвата и дрейфа заряженных частиц солнечного ветра.

Слабая магнитная буря имела место 04 октября, когда индекс Dst достиг минимального значения – 43 нТл (см. рис. 2.13а).



Рис. 2.13. Геомагнитные индексы Dst (а) и AE (б)

Сильная магнитная буря началась в 00 UT 13.10.16 г. с резкого возрастания Dst, затем с резкого уменьшения Dst началась главная фаза бури, которая продолжалась до 00 UT 14.10.16 г., когда индекс Dst достиг минимального значения –103 нТл. Затем началась фаза восстановления бури (см. рис. 2.13а). Умеренная магнитная буря имела место 24 – 29 октября, когда индекс Dst достигал минимального значения – 59 нТл и – 63 нТл в 21:30 UT 25.10.16 г. и 04:00 UT 29.10.16 г. соответственно (см. рис. 2.13а).

Высыпание заряженных частиц в высокоширотной ионосфере приводит к увеличению проводимости, усилению авроральных токов, росту поглощения радиоволн, изменению циркуляции термосферных ветров и молекулярного состав

верхней ионосферы. Во многих случаях эффект магнитной бури проявляется в виде отрицательной фазы (уменьшение критической частоты *F*₂-слоя), что неблагоприятно сказывается на ухудшении КВ радиосвязи в высокоширотной ионосфере.

Магнитосферная суббуря является основным процессом высвобождения энергии, запасенной в магнитосфере в результате воздействия на нее солнечного ветра. Частота появления суббурь возрастает с увеличением южной компоненты Вz ММП [99].

Магнитосферная суббуря характеризуется авроральным индексом AE, связанным с протекающим в ионосфере авроральным током. Индекс AE может служить индикатором количества энергии, передаваемой магнитосфере от солнечного ветра. Магнитная активность в авроральной зоне зависит от скорости солнечного ветра [100].

На фазе восстановления магнитных бурь произошло несколько магнитосферных суббурь различной интенсивности (2, 4, 16, 17 и в период 25-29 октября), которые идентифицированы по усилению аврорального индекса AE [100] (см. рис. 2.13б). Значения индекса *К*р приведены на рис. 2.14, максимальные значения индекса *К*р составляли величины 5-7.

Представляет интерес сопоставление поведения диапазона частот прохождения КВ сигналов на субавроральной трассе в дни при различной магнитной активности, что имеет большое значение для динамического управления ресурсом КВ диапазона на высокоширотных радиолиниях в различных гелиогеофизических условиях.





Результаты наблюдений

На рис. 2.15а-в показан временной ход максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) и наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ) моды 1*F* на трассе Салехард – Васильсурск для периода наблюдений с 1 по 31 октября 2016 г. На рисунках интервал частот прохождения КВ сигналов $\Delta f = MH4F$ –HH4*F* закрашен синим фоном.



Рис. 2.15. Временной ход максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) и наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ) моды 1*F* на трассе Салехард – Васильсурск в октябре 2016г: а – с 1 по 10; б – с 10 по 21; в – с 21 по 31 октября



Рис. 2.16. Временной ход максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) и наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ) моды 1*E* на трассе Салехард – Васильсурск в октябре 2016г: а – с 1 по 10; б – с 10 по 21; в – с 21 по 31 октября

Диапазон частот прохождения сигнала можно видеть из графиков (см. рис. 2.15а-в), что является хорошим показателем ожидаемых вариаций характеристик ионосферного канала в различных гелиогеофизических условиях для обеспечения устойчивой КВ радиосвязи в этом регионе.

Особенности распространения *F*-модой с отражением от верхней ионосферы состоят в следующем. Как видно из рис. 2.15а-в, наибольшее число дней с высокими значениями МНЧ *F* и диапазона частот прохождения КВ сигналов Δf = МНЧ*F*–ННЧ*F* приходятся на 5, 7-12, 15, 19 – 22 октября. Так, в дневные часы ~ 11-13 UT величина МНЧ*F* варьируется от 15÷16 МГц до 16-19 МГц. В эти же часы

наблюдается наибольший диапазон частот Δf , который варьируется в отдельные дни в интервале 6÷10 МГц. Сопоставление этих данных с геофизикой (см. рис. 2.13, 2.14) показывает, что в указанные дни была спокойная геомагнитная обстановка, индекс *К*р находился в пределах 1÷3, а авроральный индекс AE имел низкие значения ≤ 300 нТл.

Наиболее сильное воздействие на *F*-моду оказала магнитная буря, начавшаяся 13 октября (см. рис. 2.13а), на фазе восстановления которой произошла депрессия электронной концентрации в верхней ионосферы и в результате отрицательной фазы бури [101] имел место блэкаут – непрохождение сигнала *F*-модой с 13 UT 13.10.16 до 12 UT 14.10.16.

Заметные изменения МНЧ*F* произошли на фазе восстановления умеренной бури 1 октября и во время слабой магнитной бури 4 октября (см. рис. 2.13а,б), когда диапазон частот Δf сократился до 1÷2 МГц, в первую очередь за счет уменьшения МНЧ*F*, что связано с отрицательной фазой бури.

Заметные вариации параметров *F*-моды наблюдались 16-18 и 26-29 октября (см. рис. 2.15б-в) на стадии развития магнитосферных суббурь и умеренной магнитной бури 24-29 октября (см. рис. 2.13). Так, 16-18 октября максимальные значения МНЧ*F* и Δf по сравнению со спокойными условиями уменьшились до 12 и 2÷3 МГц, а 26-29 октября – до 10÷12 и 1÷3 МГц, соответственно. В эти дни авроральный индекс АЕ достигал значений ~ 400-600 нТл и ~ 500-1000 нТл, соответственно.

Влияние геомагнитной активности на поглощение ННЧ*F* на трассе Салехард – Васильсурск можно оценить, используя показания риометра в Оулу (65°N, 25,47°E) Финляндия [102]. По данным [102] максимальное значение амплитуды поглощения в Оулу было незначительным в спокойной ионосфере 05 - 12, 15,16,18, 19, 20 и 21 октября, $A \sim 0.1$ - 0.3 дБ; более заметным 1, 17,24, 30 октября, $A \sim 0.6$ - 1.5 дБ; и достаточно сильным в возмущенные дни 4, 13,14 и 29 октября, $A \sim 1.75$ - 4.8 дБ. В разные дни максимальные значения ННЧ*F* варьировались в пределах 8-10 МГц. Таким образом, на субавроральной трассе особой разницы ННЧ*F* для

условий спокойной и умеренной магнитной активности не наблюдается, за исключением условий сильной магнитной бури 13-14 октября, когда был блэкаут, а также отсутствием отражения в вечерние и ночные часы 26 – 30 октября во время умеренной магнитной бури и серии магнитосферных суббурь.

Следует отметить, что вариации ННЧ*F* могут быть связаны также с экранировкой *F*-слоя спорадическим слоем *E*s, когда наблюдается корреляция между МНЧ*E*s и увеличением ННЧ*F* или отсутствием отражения от *F*-слоя. Увеличение ННЧ*F* имеет место 02.10.16 ~ 06 UT; 11.10.16 ~ 11:50 UT, ~ 15-16 UT; 15.10.16 ~ 06 UT, а отсутствие отражения от *F*-слоя наблюдается в вечерние и ночные часы 4, 5, 8, 26-31 октября (см. рис. 2.15-2.16) в условиях интенсивного слоя *E*s. Согласно нашим расчетам, выполненным по методике [103], частоты экранирования составляют значения f_bEs ~ 7-9 МГц, что согласуется с экспериментальными данными.

Как уже говорилось, 26 – 31 октября в вечерние и ночные часы не было прохождения *F*-модой. При этом, по данным риометра в Оулу [102] регистрировались следующие значения амплитуды поглощения: 26.10.16 в 14 – 21 UT, A = 2.3 дБ; 27.10.16 в 18 UT, A = 1.1 дБ; 28.10.16 в 23 – 24 UT, A = 1.4 дБ; 29.10.16 в 03 - 10 UT, А = 1.4-2.8 дБ; 30.10.16 в 02 – 10 UT, А = 0.5-1.0 дБ; 31.10.16 в 19-24UT, А ~ 0.2 дБ. Важно отметить, что 26 – 30 октября в эти часы наблюдалась серия достаточно интенсивных магнитосферных суббурь с авроральным индексом АЕ ~ 600 – 1000 нТл, (см. рис. 2.136), которые ответственны за авроральное поглощение, связанное с высыпанием энергичных электронов. Известно, что повышение поглощения радиоволн во время и после магнитной бури, связанное с высыпанием заряженных частиц, наблюдается не только в высоких, но и на средних широтах [104]. Учитывая, что по временным интервалам отсутствие отражения от *F*-слоя совпадает с временами максимального поглощения по данным риометра в Оулу, а также сильное свечение ионосферы [102] и наличие интенсивного слоя *Es* в это время, можно полагать, что в указанные дни и часы отсутствие прохождения *F*-модой, вероятно, определяется двумя факторами: поглощением в нижней ионосфере и экранировкой спорадическим слоем Es. В то

же время 31 октября, когда значение аврорального индекса было небольшим AE ~ 200-300 нTл, основную роль в отсутствие прохождения F-модой в вечерние часы, по-видимому, играла экранировка спорадическим слоем *E*s..

По результатам наблюдений можно сделать вывод о существенном влиянии геомагнитной активности на условия распространения КВ сигналов посредством F- моды. Умеренные магнитные бури с индексом Dst \geq – 40÷60 нTл и авроральным индексом AE ~ 400-1000 нTл могут приводить к уменьшению электронной концентрации в верхней ионосфере. При этом на субавроральной трассе уменьшается МНЧF и сокращается диапазон частот прохождения KB сигналов. Сильная магнитная буря с Dst < – 100 нTл привела к блэкауту – непрохождению KB сигналов на достаточно длительный интервал времени ~ одних суток.

В авроральной ионосфере во время роста геомагнитной активности в условиях высыпания заряженных частиц из магнитосферы образуются интенсивные спорадические слои в *E*-области [105]. Вероятность образования аврорального *E*s велика в ночное время [106]. Во время магнитной активности в околополуночном секторе экваториальная граница появления аврорального *E*s смещается на 2-4° на более низкие широты. В околополуденном секторе зависимость от магнитной активности проявляется меньше [105].

Мощный слой *Es* оказывает существенное влияние на ионосферный КВ канал на субавроральных трассах [15].

Согласно нашим данным (см. рис. 2.16а-в), наряду, с регулярными отражениями от *E*-слоя с типичным суточным ходом (см. рис. 2.16в) 21 и 22 октября, в остальные дни наблюдались отражения, с высокими значениями МНЧ, в основном, в вечерние и ночные часы, доходящие до $24\div29$ МГц и большим диапазоном частот прохождения КВ сигналов $\Delta f \sim 16\div20$ МГц. Из-за трудности разделения в ряде случаев мод *E* и *Es* значения ННЧ для этих мод объединены, в основном, это мода *Es*. Мы считаем, что такие аномальные отражения обусловлены отражением от мощного спорадического слоя *Es*. Это особенно хорошо видно из сравнения данных за 20 - 22 и 26 - 29 октября (см. рис. 2.16в), т.е.

для данных с очень низкой и высокой геомагнитной активностью (см. рис. 2.13, 2.14).

Пространственно-временная изменчивость высыпания заряженных частиц может приводить к тому, что ионизация спорадического слоя Es неоднородна, в ней могут формироваться области с ограниченными горизонтальными размерами, в которых плотность электронов больше, чем в окружающем слое. Это может приводить к заметному эффекту появления достаточно сильного отражения от Es в условиях отсутствия четко выраженной зависимости от геомагнитной активности (см. например, данные за 9 – 11 октября (рис. 2.16а-б) и геомагнитные данные (рис. 2.13, 2.14)).

Выводы

В октябре 2016 года, когда вспышечная активность Солнца была на низком уровне в системе Солнце – магнитосфера – ионосфера перемежаемость геомагнитной активности была связана с вариациями Вz компоненты ММП, наблюдалась неоднократная смена знака Bz с северного на южное направление и обратно с превалирующими значениями отрицательных величин Bz. При этом имеет место пересоединение силовых линий ММП с геомагнитным полем Земли, усиление кольцевого тока, а также высыпание заряженных частиц, увеличение проводимости и усиление аврорального тока, образование спорадического слоя Es и изменение условий распространения F-модой. Связь вариаций ключевых параметров ионосферного KB канала с данными явлениями можно проследить через магнитный и авроральный индексы Dst и AE.

Результаты исследования показывают, что на субавроральной трассе в условиях умеренной и средней магнитной активности вариации основных характеристик распространения *F*-модой (МНЧ*F* и ННЧ*F*) хорошо контролируется индексами AE и Dst и в значительной мере определяют вариации диапазона частот прохождения KB сигналов. В спокойной геомагнитной обстановке в околополуденные часы ~ 11-13 UT величина МНЧ*F* варьируется от 15÷16 МГц до 16-19 МГц. В эти же часы наблюдается наибольший диапазон частот $\Delta f = MH4F$

ННЧ*F*, который варьируется в отдельные дни в интервале 6÷10 МГц. Умеренные магнитные бури с индексом Dst ≥ -40÷60 нТл могут приводить к уменьшению электронной концентрации в верхней ионосфере. При этом на субавроральной трассе в результате отрицательной фазы магнитной бури уменьшается МНЧ*F* до 10÷12 МГц и сокращается диапазон частот прохождения КВ-сигналов *F*-модой до $\Delta f \sim 1$ ÷3 МГц. Сильная магнитная буря с Dst ~ -102 нТл, имевшая место 13 – 14 октября, привела к блэкауту – непрохождению КВ сигналов на достаточно длительный интервал времени около одних суток.

Согласно полученным данным основные изменения диапазона частот Δf *F*моды обусловлены вариациями МНЧ*F*, которые хорошо коррелируют с поведением индексов Dst и AE, что проявляется как уменьшение МНЧ*F* во время умеренной и даже слабых магнитных бурь. По данным свечения ионосферы и поглощения радиоволн на сети риометров в Финляндии [102] во время сильной магнитной бури 13-14 октября (Dst_{min} = -102 нТл) имело место высыпание заряженных частиц, что привело к увеличению проводимости, росту поглощения (максимальное значение амплитуды поглощение составляло A ~ 4.5 – 5.0 дБ) и блэкауту на длительное время, порядка одних суток.

На субавроральной трассе особой разницы ННЧ*F* для условий спокойной и умеренной магнитной активности не наблюдалось, за исключением условий сильной магнитной бури 13-14 октября, когда был блэкаут, а также отсутствием отражения в вечерние и ночные часы 26 - 30 октября во время умеренной магнитной бури и серии магнитосферных суббурь, когда авроральный индекс AE достигал значений ~ 500 - 1000 нTл. Вариации ННЧ*F* могут быть связаны также с экранировкой *F*-слоя спорадическим слоем *E*s, когда наблюдается корреляция между МНЧ*E*s и увеличением ННЧ*F* или отсутствием отражения от *F*-слоя (особенно четко такая зависимость проявляется 26 - 30 октября в условиях высокоскоростного солнечного ветра и преобладающих отрицательных значений Вz компоненты ММП).
С ростом магнитной активности повышается вероятность появления интенсивных спорадических слоев Es с высокими значениями предельных частот, что в значительной мере может нейтрализовать неблагоприятное воздействие магнитной бури на работу радиоэлектронных систем различного назначения. На субавроральной трассе Салехард – Васильсурск во время высыпания заряженных частиц в результате образования мощного спорадического слоя Es существенно улучшаются условия распространения радиоволн. Диапазон частот прохождения КВ сигналов Δf Es-модой увеличивается до 10 раз по сравнению с невозмущенной ионосферой, а МНЧEs достигает верхнего предела частоты ЛЧМ-зондирования 29 МГц.

Таким образом, в результате увеличения МНЧ*E*s существенно повышается диапазон частот прохождения KB сигналов с отражением от спорадического слоя Es, что повышает эксплуатационные возможности использования канала распространения через *E*s для передачи информации на высокоширотных радиолиниях во время магнитно-ионосферных возмущений. Вместе с тем, следует иметь в виду, что интенсивный спорадический слой *E*s может оказывать существенное влияние на экранировку отражения от верхней ионосферы и может блокировать распространение *F*-модой, как например, в вечерние и ночные часы 26 – 30 октября, повышая минимальную частоту отражения от *F*-слоя.

Результаты эксперимента на субавроральной трассе Салехард – Васильсурск, полученные в спокойных и умеренно-возмущенных условиях подтверждают и дополняют, полученные ранее результаты исследований распространения КВ сигналов на высокоширотных трассах во время магнитно-ионосферных возмущений различной интенсивности. [15, 17, 22, 47, 107].

Для получения знаний о пространственно-временных масштабах динамики геомагнитной бури и ее воздействия на ионосферный КВ канал необходим расширенный набор измерений в различных гелиогеофизических условиях на трассах различной протяженности и ориентации.

Такие наблюдения на сети трасс наклонного ЛЧМ-зондирования позволят определить условия развития и миграции магнитосферно-ионосферных процессов

и их влияния на ключевые характеристики ионосферного КВ канала для разработки методик прогнозирования ионосферного распространения КВ сигналов в интересах обеспечения устойчивого функционирования радиотехнических систем различного назначения.

2.3. Распространение КВ сигналов на сети трасс наклонного зондирования в условиях повышенной солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 года

С целью обеспечения устойчивой работы радиоэлектронных систем различного назначения (КВ радиосвязь, загоризонтная КВ радиолокация) и оперативного управления радиоканалом в заданном регионе при различной протяженности и ориентации трасс необходимо иметь надежные данные о диапазоне изменений параметров КВ радиоканала в различных гелиогеофизических условиях, когда вариации параметров ионосферы связаны с солнечной и магнитной активностью.

В предыдущем разделе рассмотрено влияние магнитно-ионосферных возмущений на вариации диапазона частот прохождения КВ-сигналов на субавроральной трассе Салехард – Васильсурск во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года [78].

В этой связи, актуальными являются исследования диапазона изменений ключевых параметров ионосферного КВ канала в различных гелиогеофизических условиях на стратегически важных среднеширотных и субавроральных трассах наклонного зондирования различной протяженности и направления.

Целью данного раздела является экспериментальное исследование влияния солнечной и магнитной активности различной интенсивности в сентябре 2017 г. на ключевые характеристики КВ сигналов на сети трасс наклонного зондирования ионосферы в Евроазиатском регионе в субавроральной и среднеширотной областях, а также выработка рекомендаций для нейтрализации неблагоприятных

воздействий магнитно-ионосферных возмущений на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

Особенности эксперимента и гелиогеофизические условия

С гелиогеофизической точки зрения сентябрь 2017 г. интересен, когда наряду со спокойными условиями имели место магнитные бури, серия магнитосферных суббурь и ряд достаточно интенсивных рентгеновских вспышек. В разделе представлены результаты, полученные на сети трасс наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы во время солнечной и магнитной активности 6-9 и 14-17 сентября 2017 г.

Наблюдения проводились на сети трасс НЗ, (см. схему эксперимента на рис. 2.2), а в таблице 2.1 приведены координаты приемо-передающих пунктов.

Передатчики с ЛЧМ на станциях Ловозеро, Салехард, Диксон и Горьковская (Ленинградская обл.) работали с интервалом зондирования 15 минут круглосуточно. Их параметры излучения: диапазон частот 2-30 МГц, скорость перестройки частоты 550 кГц/с. Передатчик в Соданкюля работал в диапазоне частот 2 – 16 МГц, скорость перестройки частоты составляла 500 кГц/с, интервал зондирования – 5 минут. Прием ЛЧМ-сигналов проводился в Васильсурске (Нижегородская обл.).

На рис. 2.17 и 2.18 показана гелиогеофизическая обстановка с 6 по 9 (для рентгеновского излучения с 4 по 11) и с 14 по 17 сентября 2017 г., соответственно, по данным [100, 98]. Магнитная буря, которая наблюдалась 7-8 сентября, началась с резкого увеличения магнитного индекса Dst в 00 UT 7 сентября, начальная фаза бури продолжалась до 22 UT 7 сентября, затем с резкого уменьшения Dst началась главная фаза бури, которая продолжалась до 02 UT 8 сентября, достигнув минимального значения Dst_{min}= -124 нТл. Затем началась фаза восстановления и в 12 UT 8 сентября произошло повторное резкое уменьшение Dst, которое продолжалось до 18 UT 8 сентября, достигнув минимального значения Dst_{min}= -108 нТл, после чего продолжилась фаза восстановления. Таким образом, магнитная буря состояла из двух близких по



Рис. 2.17. Индексы Dst (а), Bz (б), AE (в), поток рентгеновского излучения (г) с 6 по 9 (для рентгеновского излучения с 4 по 11) сентября 2017 г.



Рис. 2.18. Индексы Dst (a), Bz (б), AE (в) с 14 по 17 сентября 2017 г.

76

интенсивности бурь начало которых приходилось на ночные и дневные часы (далее "ночные" и "дневные" бури) и для которых временной сдвиг между минимальными значениями индекса Dst составлял ~16 часов (см. рис. 2.17). Наблюдались заметные колебания ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) 7 и 8 сентября (см. рис. 2.176). При этом 7 сентября южная компонента ММП была зарегистрирована с 02 до 10 UT и с 19 до 24 UT, достигнув максимального отрицательного значения -30 нТл, скорость солнечного ветра увеличилась до 840 км/с в 08:48 UT. Затем 8 сентября постепенно уменьшилась до 530 км/с для 10 сентября [98]. Компонента Вz оставалась отрицательной в течение второй половины 8 сентября с минимальным значением Bz = -14 нТл в 12UT (см. рис. 2.176). Наиболее чувствительным наземным индикатором интенсивности магнитных возмущений является авроральный индекс АЕ (см. рис. 2.17в). Как видно из рис. 2.17в, наиболее сильные вариации АЕ имели место 7 и 8 сентября, когда максимальное значение АЕ достигало значений ~ 1000 - 1400 нТл и они совпадали по времени с минимальными значениями компоненты Bz MMП. В период с 6 по 10 сентября были зарегистрированы рентгеновские вспышки классов М2 – М7 и сильные вспышки классов X9.3 и X8.2 (см. рис. 2.17г) [98].

В период с 11 по 17 сентября поток протонов с энергией 10 МэВ и 100 МэВ превышал их пороговые значения, как ответ на рентгеновскую вспышку Х8, наблюдавшуюся 10 сентября (см. рис. 2.17г) [98]. Слабая по классификации [111] магнитная буря началась 14 сентября, главная фаза которой продолжалась с 12 UT до 21 UT, достигнув минимального значения Dst_{min}= -34 нТл (см. рис. 2.18а). Затем началась фаза восстановления, сопровождавшаяся заметными вариациями индекса Dst. Наблюдались вариации ММП по величине и ориентации, южная компонента Вz достигла минимальной величины -18 нТл во время главной фазы бури (см. рис. 2.18б), а скорость солнечного ветра 15-17 сентября достигла максимума около 775 км/с [98]. 15-17 сентября наблюдалась серия магнитосферных суббурь, инициированных поворотом к югу Bz компоненты ММП, индекс AE достигал максимальных значений ~ 600 – 900 нТл (см. рис. 2.18в) и они совпадали по времени с минимальными значениями компоненты Bz ММП. Во время магнитной

активности 15 и 16 сентября максимальные значения индекса Кр составляли значения 5-6.

Результаты наблюдений 6 – 9 сентября 2017 г.

В разделе представлены результаты, полученные на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск и среднеширотной трассе Горьковская – Васильсурск. Поскольку на всех субавроральных трассах, в том числе на трассах Соданкюля – Васильсурск, Салехард – Васильсурск и Диксон – Васильсурск результаты зондирования, в основном, подобны, то они используются для дополнения данных, полученных на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск.

На рис. 2.19 и 2.20 для трасс Ловозеро – Васильсурск и Горьковская – Васильсурск, соответственно, показан временной ход МНЧ и ННЧ при отражении от F области для спокойных условий (пунктир, данные усреднены для 03, 23 и 24 сентября) и периода солнечной и магнитной активности с 6 по 9 сентября (сплошные линии), когда наблюдалось сильное возмущение ионосферы.

Как видно из рис. 2.19а и 2.20а на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск и в меньшей степени на среднеширотной трассе Горьковская – Васильсурск 6 сентября до начала магнитной бури в течение всего временного интервала прохождения КВ сигналов с 01 до 21 UT наблюдалось возрастание МНЧF по сравнению со средним (спокойным) уровнем. Подобный рост МНЧF наблюдался на субавроральных трассах Соданкюля – Васильсурск, Салехард – Васильсурск и Диксон – Васильсурск. Возрастание МНЧF на различных трассах по сравнению со средним уровнем достигало ~ 8 – 22 %. Отметим, что 6 сентября магнитные индексы Dst и AE были на спокойном уровне (см. рис. 2.17). Эффект предбуревого возрастания критической частоты foF2 наблюдался многими авторами (см., например, [101] и цитируемую там литературу), но механизм этого явления окончательно еще не установлен.

6 сентября в 08:57 – 09:17 UT и в 11:53 – 12:10 UT на обеих трассах было зарегистрировано влияние рентгеновских вспышек классов X2.2 и X9.3, соответственно, на распространение радиоволн, когда во всем диапазоне частот



Рис. 2.19. Временной ход МНЧГ (красный) и ННЧГ (синий) для трассы Ловозеро – Васильсурск в спокойных условиях (пунктир) и периода магнитной активности с 6 по 9 сентября (сплошные линии).Горьковская – Васильсурск в спокойных условиях (пунктир) и периода магнитной активности с 6 по 9 сентября (сплошные линии)



Рис. 2.20. Временной ход МНЧГ (красный) и ННЧГ (синий) для трассы Горьковская – Васильсурск в спокойных условиях (пунктир) и периода магнитной активности с 6 по 9 сентября (сплошные линии)

80

ЛЧМ-зондирования КВ сигналы из-за сильного поглощения не принимались. На Субавроральная трасса демонстрирует меньший временной интервал отсутствия сигнала во время вспышек, чем среднеширотная трасса и хорошо видна релаксация сигнала на стадии восстановления (см. рис. 2.19а, 2.20а).

7 сентября на начальной стадии "ночной" магнитной бури до ее взрывной фазы КВ-сигналы принимались на обеих трассах во всем временном интервале. Как видно из рис. 2.196 на субавроральной трассе диапазон частот прохождения $\Delta f =$ МНЧГ–ННЧГ несколько меньше по сравнению со спокойными условиями, что, вероятно, связано с ростом поглощения радиоволн в период высыпания заряженных частиц, о чем свидетельствуют результаты наблюдений свечения и данные риометра в Соданкюля и Оулу [102]. В этот день проявилось воздействие рентгеновских вспышек на прохождение КВ сигналов. На более протяженной субавроральной трассе в дневное время 10:11-10:18 UT (вспышка М7.3) сигнал не принимался. На среднеширотной трассе наблюдался рост ННЧГ на 4-5 МГц и существенно уменьшился (вплоть до непрохождения) диапазон частот Δf . В вечернее время 14:20-14:55 UT (вспышка Х1.3) сигнал принимался на обеих трассах, но наблюдался заметный рост ННЧГ и имело место сужение (вплоть до непрохождения на среднеширотной трассе) диапазона частот Δf .

8 сентября на главной фазе "ночной" магнитной бури и начальной фазе ее восстановления до 08:30 UT на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск сигнал не принимался, что связано с отрицательной фазой бури и ростом поглощения. Отрицательная фаза магнитной бури, вызвавшая уменьшение МНЧF, вплоть до блэкаута, обусловлена изменениями в термосферной циркуляции и молекулярном составе на высотах F-области из-за нагрева термосферы во время геомагнитных возмущений [101]. Сигнал начал приниматься с 08:30 UT до начала взрывной фазы "дневной" магнитной бури (11:50 UT). Частоты были на 2-3 МГц меньше, чем для спокойных условий. После 11:50 UT, когда началась взрывная фаза "дневной" магнитной бури, сигнал не принимался. На среднеширотной трассе 8 сентября сигнал принимался с 3 до 6:30 UT и с 08:30 до 12 UT. На обеих трассах диапазон частот прохождения Δf был в 2-3 раза меньше, чем в невозмущенной

ионосфере. Отсутствие сигнала 8 сентября после 12 UT связано с развитием отрицательной фазы "дневной" бури и ростом поглощения по данным риометров в Соданкюля и Оулу [102]. В этот день рентгеновские вспышки в 07:40-07:58 UT (вспышка M8.1) и в 15:09-16:04 UT (вспышка M2.9) пришлись на отрицательные фазы "ночной" и "дневной" магнитных бурь, когда КВ сигналы не принимались на обеих трассах.

9 сентября магнитная активность существенно снизилась, свечение не наблюдалось и по данным риометра Соданкюля поглощение было на низком уровне ~ 1 дБ [102]. На обеих трассах сигнал принимался в течение всего временного интервала с 2 до 20 UT и во второй половине 9 сентября сигналы восстановились практически до невозмущенного уровня. В этот день на среднеширотной трассе в 10:50-11:42 UT КВ сигналы не принимались, что вероятно связано с воздействием рентгеновской вспышки класса М2.9.

С пространственно-временной изменчивостью высыпания заряженных частиц из магнитосферы во время магнитной бури связано существование спорадических слоев в области Е авроральной ионосферы.

На рис. 2.21 показан временной ход МНЧЕѕ и ННЧЕѕ для субавроральной трассы Ловозеро – Васильсурск.

Из рис. 2.21а видно, что 6 сентября после 6 UT значения МНЧЕs существенно (на 5 – 15 МГц) больше, чем в невозмущенной ионосфере. При этом значительно возрастает диапазон частот прохождения КВ сигналов через спорадический слой Es. 8 сентября после 2 UT на фазе восстановления "ночной" магнитной бури растет поглощение и сигнал не принимался. После 12 UT наблюдался рост МНЧЕѕ и ННЧЕѕ. Из рис. 2.216 и 2.19в видно, что во время магнитной бури на субавроральной трассе существуют более благоприятные условия для распространения КВ сигналов посредством отражения от слоя Es по сравнению с распространением через F-область возмущенной ионосферы, что можно использовать для нейтрализации отрицательного влияния магнитно-ионосферных возмущений на работу систем КВ радиосвязи.



Рис. 2.21. Временной ход MHEs (красный) и HHЧEs (синий) для трассы Ловозеро – Васильсурск в спокойных условиях (пунктир) и периода магнитной активности с 6 по 9 сентября (а-г) (сплошные линии)

Результаты наблюдений 14 – 17 сентября 2017 г.

На рис. 2.22, 2.23 для трасс Ловозеро – Васильсурск и Горьковская – Васильсурск, соответственно, показан временной ход МНЧГ и ННЧГ для спокойных условий (пунктир) и периода магнитной активности с 14 по 17 сентября (сплошные линии), когда наблюдалось возмущение ионосферы.

Как видно из рис. 2.22, в этот период на субавроральной трассе наблюдались существенные вариации временного хода основных параметров ионосферного КВ канала по сравнению со спокойными условиями, в первую очередь, следует отметить существенное снижение МНЧГ на 2-3 МГц. Мы полагаем, что этот эффект связан с отрицательной фазой магнитной бури, начавшейся в 12 UT 14.09 (см. рис. 2.18а), развитием серии магнитосферных суббурь 14-17 сентября (см. рис. 2.18б), усилением аврорального электроджета и ростом поглощения. Отсутствие сигнала с 15 UT 14.09 и практически до 12 UT 15.09, с 15 UT 15.09 до 7 UT 16.09 и с 16 UT 16.09 до 5 UT 17.09 хорошо коррелирует с сильным поглощением радиоволн в эти периоды по данным риометров в Соданкюля и Оулу [102] (см. рис. 2.24), обусловленным дополнительной ионизацией в нижней ионосфере при высыпании заряженных частиц из магнитосферы, когда с ростом магнитной активности зона аврорального поглощения смещается на более низкие широты [42]. При этом первая половина субавроральной трассы Ловозеро – Васильсурск проходит через область интенсивного поглощения в интервале широт, соответствующих широтам от Соданкюля до Оулу.

Как видно из рис. 2.22, развитие магнитосферных суббурь 15-17 сентября, обусловленных неоднократной сменой знака Вz компоненты с северного на южное направление и обратно (см. рис. 2.18б), привело к сильной деградации ионосферного KB канала, вплоть до блэкаута на длительных временных интервалах и существенному сужению диапазона частот прохождения радиоволн $\Delta f = MH4F-HH4F$. Таким образом, учитывая предысторию солнечно-магнитной активности в первой декаде сентября 2017 г, когда существенно вырос поток



Рис. 2.22. Временной ход МНЧГ (красный) и ННЧГ (синий) для трассы Горьковская – Васильсурск в спокойных условиях (пунктир) и периода магнитной активности с 14 по 17 сентября (сплошные линии)



Рис. 2.23. Временной ход МНЧГ (красный) и ННЧГ (синий) для трассы Ловозеро – Васильсурск в спокойных условиях (пунктир) и периода магнитной активности с 14 по 17 сентября (сплошные линии)

протонов и наблюдались заметные вариации скорости солнечного ветра и вариации ММП по величине и ориентации, можно сделать вывод, что слабая по классификации [111] магнитная буря в последующий период привела к развитию «отрицательного возмущения», снижению МНЧF, усилению поглощения (см. рис. 2.24) и сильной деградации ионосферного КВ канала на субавроральной трассе (см. рис. 2.25). В отличие от субавроральной трассы, на среднеширотной трассе Горьковская – Васильсурск КВ сигналы, распространяющиеся через F-область, в основном, принимались, но имел место эффект отрицательной фазы магнитной бури (см. рис. 2.23).



Рис. 2.24. Поглощение радиоволн в период с 14 по 17 сентября по данным риометров в Соданкюля (верхний график) и Оулу (нижний график)



Рис. 2.25. Временной ход МНЧ (красная сплошная) и ННЧ (синяя сплошная) моды Е (Es) на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск для периода активной фазы магнитной бури 14–17 сентября 2017 г. в сравнении с временным ходом МНЧ (красная пунктир) и ННЧ (синяя пунктир) соответствующих параметров в спокойных условиях

Наиболее ярко он проявился 15 и 16 сентября, когда произошло заметное уменьшение МНЧГ на 1-2 МГц по сравнению с невозмущенными условиями, а диапазон частот прохождения Δf сузился с 3-4 МГц до 1-2 МГц. В этот период значения ННЧГ практически не изменились по сравнению со спокойными условиями. Таким образом, на среднеширотной трассе влияние умеренной магнитной активности 14-17 сентября проявилось только в верхней ионосфере посредством отрицательной фазы магнитной бури.

Образование спорадических слоев в Е-области авроральной ионосферы во время магнитной бури оказывает существенное влияние на распространение радиоволн на авроральных и субавроральных трассах.

На рис. 2.25а, б показан временной ход максимальной и наименьшей наблюдаемых частот моды E (Es) на субавроральной трассе Ловозеро— Васильсурск для периода активной фазы магнитной бури 14–17 сентября 2017 г. Из-за трудности разделения в ряде случаев мод E и Es, значения частот для этих мод объединены, в основном это мода Es. В период магнитосферных суббурь развивается интенсивный спорадический слой Es, при этом наблюдается рост МНЧEs, что особенно проявилось в вечернее время с 15 до 20 UT 14 и 17 сентября, когда увеличение МНЧEs по сравнению с невозмущенными условиями достигало значений ~ 7-13 МГц. Как видно из сравнения рис. 2.25 и рис. 2.22, в отличие от распространения через F-область, при распространении через слой Es KB-сигналы, в основном, принимались. Приема сигналов не было только 15 и 16 сентября примерно с 2-3 до 6-7 UT и с 13-14 до 17-19 UT. 17 сентября сигнал принимался в течение всего времени наблюдений, при этом с 18 до 20 UT наблюдался резкий рост МНЧEs.

Таким образом, во время слабой магнитной бури и серии магнитосферных суббурь, условия распространения КВ сигналов на субавроральной трассе через спорадический слой Es были существенно лучше, чем распространение F-модой через верхнюю ионосферу.

89

Выводы

Ионосферные эффекты геомагнитной активности проявляются сначала в высоких широтах в результате магнитосферно-ионосферного взаимодействия электрического и магнитного полей в условиях усиления солнечного ветра и высыпания заряженных частиц. Вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) играют ключевую роль в развитии магнитной бури [99].

7 сентября примерно в 00:00 UT произошел скачок скорости солнечного ветра с 400 до 600 км/с и резкое изменение ориентации Вz компоненты ММП с северного на южное направление. Скачок скорости с 480 до 800 км/с произошел также 8 сентября в 00:00 UT. Эти резкие возрастания можно отождествить с ударной волной и ее воздействием на магнитосферу. С поворотом Bz компоненты ММП к югу в магнитосфере усиливается крупномасштабное электрическое поле конвекции, которое приводит к увеличению энергии солнечного ветра, поступаемой в магнитосферу и возникновению магнитосферных суббурь.

14 сентября в 15:00 UT произошел скачок скорости солнечного ветра с 400 до 680 км/с. 14 – 17 сентября происходила неоднократная смена знака Bz компоненты с северного на южное направление и обратно, что вызвало последовательность магнитосферных суббурь.

Во время магнитной бури имеются различия в поведении электронной концентрации в различных ионосферных слоях. В результате высыпания заряженных частиц и усиления авроральных токов реакция нижней ионосферы (D и Е слои) проявляется в увеличении электронной концентрации и росте поглощения радиоволн. В верхней ионосфере (F-слой) имеет место как понижение, так и рост электронной концентрации. Наибольшую опасность представляет отрицательная фаза ионосферных возмущений, которая приводит к уменьшению МНЧ, распространяющихся F-модой, сокращению диапазона используемых рабочих частот связи и ограничению возможности управления частотным ресурсом радиолиний.

Магнитные бури и магнитосферные суббури, имевшие место 7-8 и 14-17 сентября, оказали существенное влияние на распространение КВ сигналов на среднеширотной и субавроральных трассах, что привело к сокращению диапазона частот прохождения сигналов и деградации ионосферного канала.

6, 7, 9 сентября во время воздействия рентгеновских вспышек на нижнюю ионосферу и увеличения поглощения КВ-сигналы не принимались. Длительность временного интервала непрохождения сигнала зависела от мощности вспышки и варьировалась от 10-15 до 30-40 минут.

На субавроральных трассах Ловозеро – Васильсурск, Соданкюля – Васильсурск, Салехард – Васильсурск и Диксон – Васильсурск, и в меньшей степени на среднеширотной трассе Горьковская – Васильсурск 6 сентября до начала магнитной бури в течение всего временного интервала прохождения КВ сигналов с 01 до 21 UT наблюдался предбуревой эффект возрастания МНЧF. В среднем возрастание МНЧF на различных трассах по сравнению со средним (спокойным) уровнем достигало ~ 8 – 22%.

7 сентября сигналы принимались на обеих трассах (Ловозеро – Васильсурск, Горьковская – Васильсурск) практически в течение всего времени наблюдений с 2 до 21 UT. На субавроральной трассе наблюдался рост ННЧГ и уменьшение диапазона частот прохождения сигналов $\Delta f = MH4F-HH4F$ с 2 – 4 до 1 – 2 МГц.

На субавроральной трассе 8 сентября вследствие отрицательной фазы магнитной бури, усиления авроральных токов и роста поглощения сигналы не принимались до 08:30 и после 11 UT. Эти периоды совпадали с южной компонентой Вz ММП и высоким уровнем аврорального индекса AE. Во время приема KB сигналов с 08:30 до 11 UT, когда компонента Bz имела северное направление, KB сигналы принимались, но диапазон частот прохождения сигналов Δf уменьшился с 3 до 1 МГц.

По сравнению с субавроральной трассой на среднеширотной трассе 8 сентября сигналы принимались более длительное время с 02:30 до 12 UT, но диапазон частот ∆f уменьшился с 2 до 0.5-1 МГц. Более длительный период приема КВ сигналов на среднеширотной трассе обусловлен меньшим поглощением.

При образовании сильных спорадических слоев Es во время магнитной бури появляется возможность использовать для радиосвязи в высокоширотной ионосфере канал распространения с отражением от Es. Tak, на субавроральной трассе 8 сентября, в отличие от плохого распространения через F-слой, в течение достаточно длительного времени с 0 до 02:30 и с 8 до 21 UT сигнал принимался с отражением от Es. При этом с 12 UT наблюдался резкий рост МНЧEs на 7-15 МГц и рост ННЧ Es на 3-10 МГц по сравнению с невозмущенными условиями. Диапазон частот Δ f увеличился с 6 – 8 до 10 – 15 МГц.

Во время магнитной активности 14 – 17 сентября на субавроральной трассе наблюдалось снижение МНЧГ на 2-3 МГц по сравнению со спокойными ионосферный эффект обусловлен отрицательной Этот условиями. фазой начавшейся в 12 UT 14 сентября, развитием магнитной бури, серии магнитосферных суббурь, усилением аврорального электроджета и ростом поглощения. Отсутствие сигнала в эти дни хорошо коррелирует с сильным поглощением радиоволн по данным риометров в Соданкюля и Оулу (см. рис. 2.24). Развитие магнитосферных суббурь 15-17 сентября, обусловленных неоднократной сменой знака Bz компоненты с северного на южное направление и обратно, привело к сильной деградации ионосферного КВ канала и существенному сужению диапазона частот прохождения радиоволн $\Delta f = MHYF-HHYF$.

В отличие от субавроральной трассы, на среднеширотной трассе Горьковская – Васильсурск КВ сигналы, распространяющиеся через F-область, в основном, принимались, но имел место ионосферный эффект отрицательной фазы магнитной бури, когда 15 и 16 сентября произошло уменьшение МНЧF на 1-2 МГц по сравнению с невозмущенными условиями, а диапазон частот прохождения Δf сузился с 3-4 МГц до 1-2 МГц. В этот период значения ННЧF практически не изменились по сравнению со спокойными условиями. Таким образом, на среднеширотной трассе влияние умеренной магнитной активности 14-17 сентября проявилось только в верхней ионосфере, когда наблюдалась отрицательная фаза магнитной бури.

Влияние отрицательной фазы магнитной бури и роста поглощения радиоволн проявляются в уменьшении МНЧF, сокращении диапазона частот Δf и временного интервала прохождения KB сигналов, что наблюдалось в сентябрьском эксперименте на всех субавроральных трассах, т.е. ионосферный канал KB радиосвязи был подвержен деградации в обширном Евроазиатском регионе России. При этом на всех субавроральных трассах во время магнитных бурь наблюдалось развитие спорадического слоя Es и имело место существенное улучшение условий распространения с отражением от слоя Es по сравнению с распространением F-модой через верхнюю ионосферу.

Для иллюстрации особенностей распространения КВ сигналов на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск во время магнитной бури 8 сентября на рис. 2.26а показан временной ход диапазона частот прохождения сигналов $\Delta f = MH4$ –HH4 с отражением от F-области (красный фон) и с отражением от спорадического слоя Es (синий фон). Из рисунка видно, что во время сильной бури распространение F-модой имело место только в течение небольшого интервала времени с 08:30 до 11:00 UT, приходящегося на фазу восстановления "ночной" бури до начала главной фазы "дневной" бури, в узком частотном диапазоне $\Delta f \sim 8.8 - 10.0$ и $\Delta f \sim 8.5 - 9.0$ МГц.

Сужение диапазона частот прохождения сигналов Δf при распространении *F*модой происходит, с одной стороны, за счет уменьшения электронной концентрации в верхней ионосфере во время отрицательной фазы магнитной бури (при Dst< 0), что приводит к уменьшению МНЧF. С другой стороны, за счет роста поглощения радиоволн в нижней ионосфере во время высыпания заряженных частиц и увеличения электронной концентрации, происходит повышение HHЧF.

В то же время, как видно из рис. 2.26а, при наличии в авроральной ионосфере сильного спорадического слоя Es с высокой электронной концентрацией, реализуется возможность распространения KB сигналов с отражением от Es в существенно большем временном интервале и диапазоне частот Δf . Таким образом, образование спорадического слоя Es во время магнитной бури существенно

расширяет возможности управления частотным ресурсом радиолиний для обеспечения надежной КВ радиосвязи на высокоширотных трассах.





спорадического слоя Es (синий фон) во время магнитных бурь 8 сентября (а) и 15 сентября (б)

Во время слабой бури 15 сентября также наблюдалось сокращение диапазона частот Δf при отражении от F-области и лучшие условия распространения с отражением от спорадического слоя *Es* (см. рис. 2.26б), но диапазон частот Δf с отражением от *Es* меньше по сравнению с аналогичными данными для сильной бури 8 сентября.

Сравнение воздействия на ионосферный КВ канал двух магнитных бурь различной интенсивности (сильная – 7-8 сентября и слабая 14-17 сентября) показывает, что амплитуда ионосферного эффекта отрицательной фазы бури (уменьшение МНЧF, сокращение временного интервала прохождения сигналов, вплоть до блэкаута), а также ее проявление на субавроральных и средних широтах хорошо коррелирует с авроральным индексом АЕ. Амплитуда отрицательной фазы ослабевает с уменьшением АЕ и с переходом от субавроральных к средним широтам: для первой бури АЕ ~ 1200-1400 нТл, для второй – АЕ ~ 700-1000 нТл. Полученные результаты согласуются с выводами [112] о зависимости амплитуды ионосферного эффекта отрицательной фазы бури от магнитного возмущения.

Итак, результаты исследования распространения КВ сигналов на субавроральных и среднеширотной трассах в Евроазиатском регионе позволяют сделать вывод, что для обеспечения надежной КВ радиосвязи в условиях геомагнитных возмущений, когда ионосферный канал подвержен плохо значительным вариациям, необходимо прогнозируемым осуществлять оперативный контроль условий распространения радиоволн с помощью современных средств наклонного зондирования для получения данных о диапазоне ионосферных изменений в различных гелиогеофизических условиях.

В заключение следует заметить, что, учитывая особенности формирования в высокоширотной ионосфере каналов распространения КВ сигналов в условиях магнитно-ионосферных возмущений, обеспечения для надежной работы радиоэлектронных систем в стратегически важных районах Крайнего Севера представляется целесообразным расширить частотный диапазон ЛЧМ ионозонда до 50-60 МГц. Расширение диапазона частот крайне важно для высокоширотных трасс, где имеет место авроральное поглощение, связанное с высыпанием частиц и наблюдается эффект блэкаута коротких волн во время сильных возмущений. В то же время высыпание частиц сопровождается образованием развитой неоднородной структуры и интенсивного спорадического слоя Es. При этом за счет рассеяния радиоволн от ионосферных неоднородностей и отражения от Es на частотах ~ 30-60 МГц может реализовываться дополнительный канал радиосвязи.

95

2.4. Влияние частного солнечного затмения 11 августа 2018 г. на характеристики ионосферного канала по данным наклонного зондирования

Во время солнечного затмения на пути движения лунной тени в атмосфере Земли активность фотохимических реакций снижается почти до уровней ночной ионосферы и проявляется, главным образом, в уменьшении полного электронного содержания. Возрастание критической частоты спорадического слоя *Es* во время солнечного затмения наблюдалось в [44,45]. Увеличение электронной плотности в слое Es связывается с ветровым сдвигом, создаваемым градиентом температуры при движении лунной тени [44]. При этом сверхзвуковое движение лунной тени нарушает тепловой баланс атмосферы и может быть источником акустикогравитационных волн (АГВ) [46]. Периоды возникающих АГВ, инициированные солнечным затмением, оказываются в интервале от 20 до 60 минут [47, 48-50]. Известно, что гравитационные волны также могут быть вызывать формирование волнообразных структур в спорадическом слое *Es* [51]. Из-за редкого сочетания солнечного затмения (СЗ) и Es, данных о влиянии СЗ на параметры *Es* недостаточно. По этой причине подобные исследования особенно актуальны.

В разделее представлены первые результаты исследования влияния солнечного затмения 11 августа 2018 г. на характеристики КВ сигналов по данным наклонного зондирования на протяженных радиолиниях.

Результаты эксперимента

Эксперимент проводился 10–12 августа 2018 г. Карта покрытия поверхности Земли лунной тенью во время частичного C3 11 августа 2018 г. доступна в [113]. Контрольные наблюдения нами проводились 10 и 12 августа. На территории России наибольшая фаза покрытия приходилась на северо-восточные районы. Для изучения отклика ионосферы на C3 осуществлялось наклонное ЛЧМ-зондирование на трассах различной протяженности и ориентации. При зондировании использовались передатчики ЛЧМ, расположенные в пунктах: Ловозеро Мурманской обл. (68°N; 35,02°E), Норильск (69,36°N; 88,36°E), Иркутск (51,8°N; 104°E), Хабаровск (47,5°N; 13.5°E). Прием ЛЧМ сигналов осуществлялся в Васильсурске Нижегородской обл. (56,1°N; 46,1°E) и Нижнем Новгороде. Геомагнитная обстановка была спокойной с индексом K_p ~ 2-3.

В таблице 2.6 приведены параметры затмения для средних точек трасс для высоты 200 км в ионосфере (для трассы Ловозеро – Васильсурск первое значение соответствует высоте слоя Es – 110 км). Для трассы Хабаровск – Васильсурск характеристики даны для средних точек 1-го и 2 скачков. Из таблицы 2.6 можно видеть, что во время наблюдения солнечного затмения степень покрытия Луной солнечного диска находилась в пределах ~ 12÷53% в зависимости от ориентации и протяженности трассы.

Трасса	Длина, км	Координаты средней точки	Время начала, UT	Время макс. фазы, UT	Время окончан ия, UT	Степень покры- тия, %
Ловозеро –	зеро – 1440 њ-	62 ⁰ 9'25''N 41 ⁰ 38'36''E	08:53:49	09:36:10	10:18:11	11.8
сурск			08:51:45	09:35:54	10:19:41	13.4
Норильск – Василь- сурск	2532	64 ⁰ 14'10"N 62 ⁰ 14'58"E	09:01:38	09:53:21	10:43:37	27.9
Иркутск – Нижний Новгород	3709	57º29'44"N 76º41'3"E	09:25:04	10:15:27	11:03:32	26.8
Хабаровск – Василь- сурск	5733	1-ый скачок 55 ⁰ 31'38"N 118 ⁰ 12'45"E	09:38:22 09:13:28	10:27:51 10:04:29	11:15:00 10:53:35	53.1
		2-ой скачок 60 ⁰ 41'13"N 69 ⁰ 13'33"E				26.5

Таблица. 2.6. Параметры затмения для средних точек трасс

Эффект солнечного затмения проявился в уменьшении максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) и наименьшей наблюдаемой частоты (ННЧ) на трассах наклонного ЛЧМ-зондирования.

Временные зависимости МНЧ для различных трасс и мод распространения в день затмения 11 августа 2018 г. и в контрольные дни 10 и 12 августа 2018 г. показаны на рис.2.27-2.29. На рис.2.27 наиболее значимый интервал затмения для средних точек трасс зондирования для моды F (для высоты 200 км) и для моды E (для высоты 110 км) выделен цветным прямоугольником. По приведенным рисункам можно убедиться, что на всех трассах в интервале затмения наблюдается довольно четкий эффект уменьшения МНЧ при распространении через F-слой на 8-10%, а также увеличение МНЧЕѕ на трассе Ловозеро – Васильсурск на 15%.

Результаты наклонного зондирования использовались для обнаружения акустико-гравитационных волн (АГВ) и их ионосферного отклика в виде ПИВ, генерируемых на высотах озонового слоя в стратосфере при движении лунной тени в атмосфере Земли во время солнечного затмения. Наиболее яркий эффект проявления АГВ в виде квазипериодических вариаций МНЧЕs и МНЧ1F во время солнечного затмения с периодами ~ 30 и 50 минут был заметен на трассах Ловозеро – Васильсурск и Норильск – Васильсурск, соответственно (см. рис.2.27а, б).





Рис. 2.27. Временной ход МНЧ Е/Еs для трассы Ловозеро – Васильсурск. (а); МНЧ F2 для трассы Норильск – Васильсурск (б); МНЧ F2 для трассы Ловозеро – Васильсурск (в)



Рис. 2.28. Временной ход МНЧ F2 для трассы Хабаровск – Васильсурск



Рис. 2.29. Временной ход МНЧ F2 для трассы Иркутск – Нижний Новгород

Выводы

Представлены результаты исследования влияния частичного солнечного затмения 11 августа 2018 г. на характеристики КВ сигналов на трассах наклонного ЛЧМ-зондирования: Ловозеро – Васильсурск, Норильск – Васильсурск, Иркутск – Нижний Новгород и Хабаровск – Васильсурск при степени покрытия Луной солнечного диска в пределах 12÷53% в зависимости от ориентации и протяженности трассы.

1. Показано, что на всех трассах в интервале затмения наблюдался эффект уменьшения МНЧ при распространении через F-слой на 8-10% и увеличение МНЧЕѕ на трассе Ловозеро – Васильсурск на 15%.

2. Во время солнечного затмения на трассах Ловозеро – Васильсурск и Норильск – Васильсурск наблюдались квазипериодические вариации МНЧЕs и МНЧ1F с периодами ~ 30 и 50 минут, соответственно, обусловленные генерацией АГВ и их ионосферного отклика в виде ПИВ при движении лунной тени в атмосфере Земли.

2.5. Заключение по второй главе

Исходя из результатов раздела 2.1 можно сделать вывод, что при спокойной геомагнитной обстановки использование метода наклонного зондирования для экстраполяция МПЧ на соседние радиолинии, не оснащенные средствами диагностики ионосферного КВ канала, только за счет адаптации ионосферной модели IRI к условиям распространения радиоволн по данным зондирования на контрольной трассе может быть достаточно эффективным с ошибкой прогноза ~ 2÷8%. Это является приемлемым результатом для обеспечения устойчивой работы радиоэлектронных систем различного назначения.

Исследование раздела 2.2 показало, что основные изменения диапазона частот Δf *F*-моды обусловлены вариациями МНЧ*F*, коррелирующие с поведением индексов Dst и AE. Это взаимосвязь проявляется в уменьшении МНЧ*F* во время умеренной и даже слабых магнитных бурь. При этом во время сильной магнитной бури 13-14 октября (Dst_{min} = -102 нTл), когда имело место высыпание заряженных частиц (по данным свечения ионосферы и поглощения радиоволн на сети риометров в Финляндии [102]), наблюдался блэкауту на длительное время, порядка одних суток за счет увеличения проводимости и роста поглощения (A ~ 4.5 – 5.0 дБ).

Раздел 2.3, посвященный расширенному изучению влияния факторов солнечной и магнитной активности на распространение радиоволн, показал, что влияние отрицательной фазы магнитной бури и роста поглощения радиоволн проявляются в уменьшении МНЧF и сокращении диапазона частот Δf на всех субавроральных трассах. Таким образом, ионосферный канал KB радиосвязи был подвержен деградации в обширном Евроазиатском регионе России. На всех субавроральных трассах во время магнитных бурь наблюдалось развитие спорадического слоя Es и имело место существенное улучшение условий

распространения с отражением от слоя Es по сравнению с распространением Fмодой через верхнюю ионосферу.

В разделе 2.4 продемонстрировано влияние частного солнечного затмения на уменьшение МНЧ при распространении через F-слой на 8-10% и увеличение МНЧЕs на трассе Ловозеро – Васильсурск с квазипериодическими вариациями МНЧЕs и МНЧ1F с периодами ~ 30 и 50 минут за счет генерации АГВ при движении лунной тени в атмосфере Земли.

Глава3. Моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн в трехмерно-неоднородной ионосферной плазме

Основные результаты главы опубликованы в работах [69-76].

3.1. Модели ионосферы в задачах распространения радиоволн в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы

Моделирование распространения радиоволи в условиях трехмернонеоднородной ионосферной плазмы подразумевает учет наличия значительных поперечных градиентов электронной концентрации относительно основной плоскости распространения волны по дуге большого круга (ДБК) [52, 53]. Поперечные градиенты электронной концентрации приводят к отклонению луча от плоскости ДБК и в результате к существенному изменению траектории. которое В двумерной модели распространения радиоволн такое отклонение не может быть в полной мере описано [52]. Причинами появления в ионосфере горизонтальных градиентов электронной концентрации могут различные естественные и искусственные ионосферные возмущения, такие как ПИВ, ионосферный провал, результате суточного терминатора, возмущение В хода ЛИНИИ область ионосферы искусственной модификации мощным радиоизлучением коротковолнового стенда типа Сура. Даже в обычных условиях только за счет регулярного суточного хода критической частоты, который обеспечивает сферической симметрии ионосферы Земли нарушение при фактически невозмущенной ионосфере внешними воздействиями азимутальное отклонение луча в точке приема при длине трассы порядка 1500 км может достигать нескольких градусов (обычно 2-4 град.) относительно ДБК.

Для выполнения численного моделирования распространения КВ радиоволн в практических целях необходимо иметь модель параметров ионосферы, которая бы достаточно надежно отображала основные закономерности её изменения.

Изучение ионосферы за последние десятилетия привело к созданию ряда моделей, описывающих глобальную картину ее состояния. Они подразделяются на три типа: детерминированные, эмпирические и полуэмпирические.

Детерминированные модели ионосферы [101-104] содержат более или менее полную схему физических процессов, происходящих в ионосфере. Эти процессы описываются соответствующей системой уравнений. Решение данной системы определяет состояние ионосферы при заданных условиях. Эти модели представляют значительный научный и практический интерес. Хорошо развитая и корректная детерминированная модель позволяла бы получить глобальную полную картину структуры и свойств ионосферы. Фактически при создании подобной реалистичной модели возникает ряд трудностей с её реализацией, и в настоящее время создание такой модели, удовлетворяющей всем требованиям, практически невозможно. Причинами являются: большое количество этого входных параметров, нестационарность ионосферы, приближенность применяемых уравнений, вычислительные трудности.

Эмпирическая модель является результатом статистической обработки экспериментальных данных. Эмпирические модели построены на основе анализа и обобщения данных при различных гелио- и геофизических условиях. Применение статистической обработки ионосферных данных позволяет выделить систематические изменения ионосферы. Поэтому данные модели отражают некоторое среднее состояние ионосферы, в некоторой степени приближения соответствующее моменту времени и конкретным заданному гелио-И геофизическим условиям. По этой причине эмпирические модели не учитывают случайные вариации параметров ионосферы, практически всегда встречающихся в реальных условиях. Несмотря на это, эмпирические модели очень полезны, поскольку могут быть использованы в качестве справочной информации для построения более точной модели, либо для контроля адекватности других моделей и их коррекции.

Полуэмпирические модели являются комбинацией детерминированной модели с эмпирической. Они содержат ограниченные эмпирические данные,

104

которые используются в аналитических формулах, отражающих важнейшие закономерности в ионосфере и позволяют получить глобальное распределение ионосферных параметров для конкретного момента времени и конкретных гелио- и геофизических условий. Такие модели содержат довольно простые уравнения и вычисления, опираются на массив экспериментальных данных и не требуют больших вычислительных ресурсов. При этом обладают достаточно высокой точностью и надежностью. Данные обстоятельства делают полуэмпирические модели наиболее оптимальным выбором при использовании в программах численного моделирования распространения радиоволн.

Известны другие более совершенные и универсальные модели данного типа:

1) «Полуэмпирическая модель ионосферы» (ПЭМИ), разработанная в Иркутском государственном университете под руководством В.М. Полякова [118, 119];

2) «Справочная модель ионосферы» (СМИ-88, позднее дорабатывалась), разработанная под руководством Ю.К. Часовитина [95];

3) Семейство моделей «The International Reference Ionosphere» (IRI-2001 - IRI-2016) [90].

Отдельно хотелось бы отметить модели «The International Reference Ionosphere». Они являются глобальными полуэмпирическими моделями ионосферы, разработанные объединенной рабочей группой международного союза по радио-наукам (URSI) и комитета по космическим исследованиям (COSPAR). В группу входят представители многих стран, в числе которых и Россия. В состав рабочей группы по IRI входят ведущие специалисты России, занимающиеся моделированием ионосферы, в числе которых Ю.К. Часовитин, Т. Гуляева и др. Модель IRI рекомендована этими международными организациями в качестве международного стандарта для моделирования ионосферных параметров, в том числе электронной и ионных плотностей, температур.

Модели IRI позволяют вычислять высотные профили (до 1000 км) электронной и ионной концентрации, температуры, ионного состава, дрейфов. Позволяют выводить ключевые параметры ионосферных слоев, такие как

критические частоты, высоты максимумов ионосферных слоев для любой точки Земли. Для выполнения расчета задаются координаты точки (географические или геомагнитные), дата, время, а также ряд параметров по выбору пользователя, например число солнечных пятен Rz12 или эффективный ионосферный индекс IG12. Модели имеет возможность коррекции по имеющимся экспериментальным данным, для этого существует возможность ввода своих критических частот и высот максимума слоя F2. Линейка моделей постоянно расширяется.

Глобальная ассимиляционная модель ионосферы.

Модель состоит из двух основных блоков: физически-обоснованной модели ионосферы и ассимиляционного модуля, корректирующего результаты модельных расчетов с помощью массивов экспериментальных данных о полном содержании электронов. Ассимиляционная модель ионосферы ЦАО реализована в программном комплексе на сервере ЦАО и позволяет в режиме реального времени проводить численные расчеты основных параметров ионосферы для Северного и Южного полушарий Земли [120]. Модель является глобальной трехмерной моделью ионосферы.

Метод ассимиляции заключается в корректировке расчетов физического блока модели с использованием массивов экспериментальных данных о полном содержании электронов в ионосфере над отдельными географическими точками Земли. Подобный метод успешно используется при численном прогнозе погоды. Источником данных о полном содержании электронов в ионосфере выступает сеть наземных станций спутниковой навигационной системы GPS и ГЛОНАСС.

В глобальной ассимиляционной модели физически-обоснованная составляющая часть является основой математического аппарата системы оценки состояния ионосферы, поведение плазмы в которой описывается с помощью уравнений гидродинамики. Искомыми величинами в данных уравнениях являются скорости, температуры и концентрации электронов и семи основных типов ионов, а именно: H+, He+, O+, O2+, NO+, N+, N2+ [120]. По заявлению авторов физическая модель содержит множество уравнений и параметров, описывающих состояние ионосферы и её динамику. Утверждается, что модель использует

уравнения сохранения массы, импульса и энергии, эффекта фотоионизации, ион ионных и ион - нейтральных столкновений, гравитации, параллельного переноса за счет давления и распределения температур, дрейфа заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

Существуют и другие примеры использования ассимиляционных моделей ионосферы, например [108, 109].

Учитывая приведенные выше достоинства и недостатки моделей ионосферы, в задаче моделирования распространения радиоволн в ионосфере на мой взгляд наиболее пригодна модель IRI, поскольку отличается удовлетворительной способностью к адаптации к конкретных гелио- и геофизическим условиям и при этом способна оставаться автономной, т.е. не требующей постоянного обновления данных о параметрах ионосферной плазмы. При этом данные по фактической солнечной активности, используемые программой, регулярно обновляются. Это позволяет даже при настройках параметров модели по умолчанию получать модельные значения параметров ионосферы наиболее приближенные к реально наблюдаемым на заданный период времени (в прошлом).

3.2. Влияние ПИВ на характеристики КВ сигналов при слабонаклонном распространении на трассе Васильсурск – Нижний Новгород

Развитие широкополосных адаптивных связных пеленгационных И радиосистем декаметрового диапазона выводит на первый план проблемы динамических, спектральных статистических характеристик изучения И нестационарного ионосферного радиоканала. Нестационарность ионосферного канала в значительной мере обусловлена влиянием волновых возмущений различного происхождения (прохождение терминатора, магнитные бури. землетрясения, ураганы, молниевые разряды, старты космических аппаратов, взрывы, мощное радиоизлучение и другие факторы), проявление которых на высотах ионосферы приводит к суперпозиции возмущений и определяет изменчивость характеристик ионосферного канала.

Среднемасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) с размерами ~ 100-500 км и периодами от десятков минут до нескольких часов [7] могут быть исследованы с использованием различных методов и техники, например, ионозондов вертикального [54] и наклонного зондирования [55, 56], доплеровских измерений [57], радаров некогерентного [58, 59] и когерентного [60] рассеяния, либо путем трансионосферного зондирования с помощью сигналов навигационных спутников GPS [61, 62, 63]. Техника оптических наблюдений за свечением ночной ионосферы на длине волны 630 нм также широко используется со второй половины 90-х годов [123].

В разделе представлены результаты исследования перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) методом наклонного зондирования на слабонаклонной трассе Васильсурск (56.13°N, 46.1°E, стенд Сура) – Нижний Новгород (56.0°N, 44.0°E) и путем сопоставления экспериментальных данных и моделирования сделаны оценки направленно-скоростных характеристик ПИВ. На рис. 3.1 приведены характерные примеры ионограмм на трассе Васильсурск – Нижний Новгород, полученные в марте 2015г.


Рис. 3.1. Экспериментальные (а) и расчетные (б) ионограммы, красные и синие кривые - "о" и "х" компоненты соответственно для разных моментов времени

Магнитная обстановка была спокойная, индекс K_p = 1-2. На ионограммах видны серпообразные треки перемещающихся ионосферных возмущений на обеих магнитоионных компонентах, c течением времени превращающиеся В расщепление магнитоионных компонент в широком диапазоне частот. Область групповых задержек, где наблюдается расщепление, постепенно расширяется в сторону все меньших групповых задержек. Это типичное проявление ПИВ на ионограммах вертикального зондирования. Для определения параметров ПИВ проводилось трехмерное моделирование распространения декаметровых радиоволн.

Моделирование распространения декаметровых радиоволн (ДКМВ) на короткой трассе Васильсурск – Нижний Новгород в условиях присутствия среднемасштабных ПИВ выполнено с помощью структурно-физической модели, описанной в [124-130]. Длина анализируемой трассы 130 км, азимут со стороны приемника (Нижний Новгород) ~82,8⁰ и ~264,5⁰ со стороны передатчика (Васильсурск). При моделировании учитывалось реальное геомагнитное поле, заданное моделью IGRF [131]. Распределение электронной концентрации в пространстве задавалось трехмерной моделью IRI-2016 [90], при этом для обеспечения непрерывности трехмерной функции вместе с ее первыми и вторыми производными заданную таблично функцию аппроксимировали трехмерным сглаживающим кубическим сплайном. Как следствие, моделирование выполнено на основе решения характеристических лучевых уравнений в трёхмерно неоднородной магнитоактивной ионосфере. Среднемасштабные ионосферные возмущения моделировались на основе гармонической модели ПИВ вида:

$$N_e(\varphi,\lambda,r,t) = N_0(\varphi,\lambda,r,t) \left[1 + \sum_{i=1}^n \delta_i \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \vec{p}_i \vec{r} + \Phi_i\right) \right], \qquad (3.1)$$

где $N_e(\varphi, \lambda, r, t)$ – электронная концентрация в точке со сферическими координатами (φ, λ, r) в момент времени t; $N_0(\varphi, \lambda, r, t)$ – электронная концентрация в невозмущенной ионосфере, заданная согласно модели IRI-2016, n – количество ПИВ, δ_i – относительная амплитуда ПИВ, $\vec{p}_i = \frac{2\pi}{\Lambda_i} \left\{ \cos \beta_i \sin \alpha_i, \cos \beta_i \cos \alpha_i, \sin \beta_i \right\}$ – волновой вектор ПИВ, α_i – азимут, β_i – угол места распространения ПИВ в точке расположения передатчика (азимут отсчитывается от направления на север; угол места всегда отсчитывается от плоскости горизонта и имеет знак «–», если вектор направлен вниз от плоскости горизонта), T – период и Φ_i – начальная фаза гармонического возмущения. Моделирование проводилось при одном гармоническом возмущении с изменяемыми параметрами.

Перед началом имитационного моделирования параметры модели IRI-2016 корректировались. Для этого выбиралась близкая по временному интервалу ионограмма, на которой не видны следы ПИВ. Адаптация IRI обеспечивала близость невозмущенной экспериментальной и модельной дистанционночастотных характеристик (ДЧХ) на трассе зондирования. Для адаптации использовались два параметра модели IRI: число солнечных пятен – W и индекс солнечной активности – IG. Первый в модели IRI определяет нижнюю ионосферу, включая Е-слой, а индекс IG определяет параметры F-слоя. Индекс IG изменялся так, чтобы обеспечить соответствие экспериментальной и модельной ДЧХ в невозмущенной ионосфере.

На рис. 3.2 показана зависимость формы ДЧХ в зависимости от амплитуды ПИВ. Приведены рисунки модельных ДЧХ обеих магнитоионных компонент для трех последовательных моментов времени 10:34, 10:36, 10:38 UT. Другие значения параметров: $\Lambda = 100$ км, $\alpha = 83^{\circ}$, $\beta = -45^{\circ}$, T = 900 с. Если сравнивать модельные ДЧХ с экспериментальными, то становится понятным, что при $\delta > 0.1$ в окрестности МПЧ магнитоионных компонент наблюдается слишком сильное расщепление каждой из кривых. В этих случаях следует уже говорить не о «серпах» на ДЧХ, а о расщеплении ДЧХ подобно диффузным отражениям от ионосферы. Подобное значительное расщепление имеет место на приведенных экспериментальных ионограммах. На рис. 3.3 показана зависимость изменения ДЧХ от пространственного размера ПИВ **Л** для трех последовательных моментов времени 10:36, 10:38, 10:40 UT, учитывая, что параметры ПИВ составляют: T=15 мин., $\delta = 0.10$, $\alpha = 83^{\circ}$, $\beta = -45^{\circ}$.

Уменьшение Λ увеличивает пространственный градиент электронной концентрации, причем он существенно изменяется в пределах трассы, учитывая тот факт, что движение ПИВ происходит вдоль трассы зондирования. Можно сделать вывод, наиболее типичные серпообразные треки магнитоионных компонент на слабонаклонной трассе Васильсурск (56.13°N, 46.1°E, стенд Сура) – Н. Новгород (56.0°N, 44.0°E) протяженностью ~ 130 км образуются при Λ несколько меньшей длины ($\Lambda = 75 - 100$ км), чем длина трассы.

Из приведенного ниже рис. 3.4 видно, что наличие ПИВ приводит к многолучевости сигнала и отклонению пеленга на передатчик до 6.4°, наиболее значительное для обыкновенной компоненты.

Результаты сопоставления экспериментальных (слева) и модельных (справа) ДЧХ для параметров ПИВ, наилучшим образом обеспечивающих согласование данных наблюдений и моделирования, показаны на рис. 3.1. Установлено, что во время эксперимента ионосфера была возмущена перемещающимся ионосферным возмущением с оценочными параметрами $\delta \sim 0.1$, $\alpha = 83^\circ$, $\beta = -45^o$, $\Lambda = 100$ км и скоростью V = Λ /T ~ 110 м/с. Такие параметры возмущения хорошо согласуются с характеристиками среднемасштабных ПИВ [132]. Согласно расчетам, на данной широтной трассе направление движения ПИВ, когда существенно его влияние на ДЧХ, близко к ориентации волнового вектора возмущения вдоль трассы зондирования. Чтобы определить реальное направление распространения ПИВ, необходимо проведение одновременных наблюдений на трассах различной ориентации. Направление движения ПИВ может служить индикатором (трассером) общей атмосферной циркуляции, поскольку тропосферный и термосферный ветра действуют подобно фильтру и определяют преимущественное направление распространения гравитационных волн [64-66].

Что касается источника возмущений, то в период наблюдений трасса зондирования находилась вдали от терминатора и его, вероятно, можно исключить как возможный источник волновых возмущений. С другой стороны, результаты многочисленных исследований (см., например, [133-139] и цитируемую там



литературу) указывают, что в спокойных геомагнитных условиях генерация гравитационных волн и их ионосферного отклика в виде

Рис. 3.2. Влияние на ДЧХ изменения относительной амплитуды δ возмущеия электронной концентрации ПИВ для трех моментов времени

среднемасштабных ПИВ в значительной мере определяется метеорологическими явлениями и тропосферной конвекцией (неустойчивости струйного потока, ветровой сдвиг, погодные фронты). Решение этой задачи далеко до завершения и необходимо продолжение систематических комплексных исследований динамических процессов в нижней и верхней атмосфере.



Представляет интерес оценка параметров ПИВ на трассах различной протяженности. В работе [73] сделана оценка скорости распространения

Рис. 3.3. Изменения ДЧХ при наличии ПИВ с различной длиной волны гармонического возмущения

крупномасштабных ПИВ путем анализа временных вариаций максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) моды 1F2 на субавроральной трассе Ловозеро – Йошкар-Ола и на среднеширотной трассе Кипр – Йошкар-Ола для спокойных 2-3 июня 2015 (см. рис. 3.5а,в) и возмущенных 24-25 июня 2015 (см. рис. 3.5б,г) условий. Значительное внимание уделялось анализу данных, полученных на фазе восстановления магнитной бури 24 июня, когда наблюдалась серия магнитосферных суббурь, сопровождаемых ионосферными возмущениями (ПИВ).



Рис. 3.4. Распространение сигнала при наличии ПИВ: красные и синие кривые - "о" и "х" компоненты соответственно. Лучи при наличии возмущения: для "о" компоненты - «2OB», «3OB»; для " х " компоненты - «2XB», «3XB» (лучи «10», «1х» - без возмущения)

При сопоставлении периодов ПИВ на субавроральных и среднеширотных трассах было получено, что по мере распространения возмущения от субавроральных к средним широтам на расстояние порядка 2000 км, возрастает период ПИВ от значений ~ 2 ч. 20 мин ÷ 2 ч. 30 мин до ~ 2 ч. 40 мин ÷ 2 ч. 50 мин. Период и скорость распространения ПИВ при этих условиях составляют ~ 2 ч. 30 мин и 440 м/с соответственно, что согласуется с теорией.



Рис. 3.5. Зависимость периода ПИВ на трассах различной протяженности от времени суток для спокойных (а, в) и возмущенных (б, г) условий

3.3 Заключение по третьей главе

В главе основное внимание уделено разработке методики расчета ионограмм на слабонаклонной трассе в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере при наличии волновых возмущений и сопоставлению расчетов с экспериментом, что позволяет выявить основные особенности проявления среднемасштабных волновых возмущений в наблюдениях с помощью ионозондов. Решение этой задачи имеет важное значение для выявления природы волновых возмущений, оказывающих существенное влияние на характеристики КВ сигнала, вызывая замирания сигнала и девиацию его пеленга.

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Разработанный численный метод моделирования ионограмм квазивертикального зондирования ионосферы в условиях ПИВ позволяет выявлять основные особенности проявления среднемасштабных волновых возмущений в ионозондовых наблюдениях. На основе сопоставления экспериментальных и расчетных ДЧХ определены направленно-скоростные характеристики среднемасштабных ПИВ, обеспечивающих хорошее соответствие временной эволюции отклика широкополосного сигнала на прохождение волнового возмущения на трассе зондирования. На основе результатов моделирования показано, что наилучшее согласование экспериментальных и модельных ДЧХ имеет место для ПИВ с оценочными параметрами $\delta \sim 0.1$, $\alpha = 83^\circ, \beta = -45^o$, Λ =100 км и скоростью V = $\Lambda / T \sim 110$ м/с.

2. На основе анализа расчетных ДЧХ удалось определить, что визуальное проявление влияния ПИВ на ДЧХ в виде его расщепления на несколько кривых возникает лишь при определенных параметрах возмущения. Это длина Λ , относительная амплитуда δ , углы волнового вектора ПИВ (азимутальный угол α и угол места β), а также фаза гармонического возмущения. Серпообразные возмущения на ДЧХ более интенсивные и хорошо развитые при укорочении пространственной длины волны. На данной широтной трассе при слабонаклонном распространении наличие ПИВ оказывает наиболее существенное влияние на ДЧХ

при ориентации волнового вектора возмущения вдоль трассы зондирования. При Л более 150 км «серпов» на ДЧХ обыкновенных и необыкновенных волн не наблюдается.

В дальнейшем для определения источников волновых возмущений планируется продолжение исследований путем одновременного ЛЧМзондирования ионосферы на трассах малой и средней протяженности и различной ориентации.

Заключение

Получен ряд достижений, имеющих важное значение для прогнозирования ключевых характеристик ионосферного КВ канала и моделирования распространения радиоволн в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере в условиях перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Проведена модернизация ЛЧМ ионозонда. Создана сеть персональных компьютеров ЛЧМ станций, которая позволила оперативно управлять режимами работы трех ЛЧМ станций одновременно из одного места. Удаленный контроль состояния ЛЧМ станций позволил наладить круглосуточную синхронную работу всех ионосферных станций ННГУ им. Н.И. Лобачевского и обеспечить проведение непрерывного круглосуточного многомесячного мониторинга ионосферы на трассах различной протяженности, ориентации, в различных гелиогеофизических условиях. Создана база данных ионограмм наклонного ЛЧМ зондирования и ключевых параметров ионосферного канала (ННЧ, МНЧ, ОРЧ) на субавроральных и среднеширотных трассах: Соданкюля – Васильсурск, Салехард – Васильсурск, Ловозеро - Васильсурск, Горьковская – Васильсурск, Диксон – Васильсурск, Кипр – Нижний Новгород, Васильсурск – Нижний Новгород и др. с доступом по сети Интернет.

2. Разработаны и экспериментально проверены методы прогнозирования и экстраполяции ключевого параметра ионосферного КВ канала – максимальной применимой частоты (МПЧ) путем адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы на сети субавроральных и среднеширотной трасс в обширном Евроазиатском регионе в интервале широт ~ 56÷73.5°N и долгот ~ 26.6÷80.7°E в условиях низкой солнечной активности. Показано, что использование адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным НЗ обеспечивает заметный выигрыш в повышении точности прогноза МПЧ по сравнению с долгосрочным прогнозом. Важно отметить, что преимущество метода наклонного зондирования для прогнозирования и экстраполяции по сравнению с доругими методами коррекции фоновой ионосферы (вертикальное зондирование,

возвратно-наклонное зондирование и GPS/ГЛОНАСС) заключается в возможности непосредственного определения ключевых характеристик ионосферного КВ канала для адаптации радиоэлектронных систем различного назначения к условиям распространения радиоволн.

Показано, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы ошибки прогнозирования МПЧ на контрольной трассе и ошибки экстраполяции МПЧ на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния ~ 180÷870 км составляют ~ 4.7÷8.6% (17.12.2016 г.) и ~ 4.9÷9.6% (03.09.2017 г.), что заметно меньше, чем ошибки по данным долгосрочного прогнозирования ~ 18÷21% (17.12.2016 г.) и ~ 7.5÷12.9% (03.09.2017 г.).

Показано, что ошибки экстраполяции МПЧ по трем контрольным точкам для различных временных интервалов (утро, день, вечер) в условиях спокойной геомагнитной обстановки составляют ~ 0.6÷3.4% (17.12.2016 г.) и 2÷5.4% (03.09.2017 г.), что существенно меньше, чем ошибки по долгосрочному прогнозу.

3. Определен диапазон изменений МНЧ и ННЧ на стратегически важных субавроральных трассах наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы в различных гелиогеофизических Установлено, условиях. что магнитные бури И магнитосферные суббури, имевшие место 7-8 и 14-17 сентября 2017 г., оказали существенное влияние на распространение КВ сигналов на субавроральных и среднеширотной трассах и привели к сокращению диапазона частот прохождения сигналов и временного интервала прохождения КВ сигналов, вплоть до блэкаута. время солнечной и магнитной активности различной интенсивности Bo ионосферный КВ канал был подвержен деградации в обширном Евроазиатском регионе России, где проходят линии КВ радиосвязи. Длительность временного интервала непрохождения КВ сигналов с отражением радиоволн от *F*-слоя ионосферы зависела от мощности солнечной вспышки и варьировалась от 10-15 до 30-40 минут.

На всех субавроральных трассах во время магнитных бурь за счет образования

сильного спорадического слоя *Es* с высокой электронной концентрацией имело место существенное улучшение условий распространения с отражением от слоя *Es* по сравнению с распространением F-модой через верхнюю ионосферу. Образование спорадического слоя *Es* во время магнитной бури существенно расширяет возможности управления частотным ресурсом радиолиний для обеспечения надежной КВ радиосвязи на высокоширотных трассах.

Результаты исследования распространения КВ сигналов на субавроральных и среднеширотной трассах в Евроазиатском регионе позволяют сделать вывод, что для обеспечения надежной КВ радиосвязи в условиях геомагнитных возмущений, когда ионосферный канал подвержен плохо прогнозируемым значительным вариациям, необходимо осуществлять оперативный контроль условий распространения радиоволн с помощью современных средств наклонного ЛЧМзондирования для получения данных о диапазоне ионосферных изменений в различных гелиогеофизических условиях.

4. Разработаны предложения для повышения надежности радиосвязи в высокоширотной ионосфере. Учитывая особенности формирования В высокоширотной ионосфере каналов распространения КВ сигналов в условиях магнитно-ионосферных возмущений, обеспечения надежной для работы радиотехнических систем в стратегически важных районах Крайнего Севера представляется целесообразным расширить частотный диапазон ЛЧМ ионозонда до 30-60 МГц. Расширение диапазона частот крайне важно для высокоширотных трасс, где имеет место авроральное поглощение, связанное с высыпанием частиц и наблюдается эффект блэкаута коротких волн во время сильных возмущений. В то же время высыпание частиц во время магнитной бури сопровождается образованием развитой неоднородной структуры и интенсивного спорадического слоя *Es*. При этом за счет рассеяния радиоволн от ионосферных неоднородностей и отражения КВ сигналов от Es на частотах ~ 30-60 МГц может реализовываться дополнительный обеспечения канал радиосвязи эффективного ДЛЯ функционирования радиотехнических систем путем их адаптации к условиям распространения радиоволн по результатам наклонного зондирования ионосферы.

120

5. Определены направленно-скоростные характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) путем сопоставления результатов моделирования КВ сигналов в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере с экспериментальными данными наклонного ЛЧМ-зондирования, а также с помощью распределенной сети ионозондов с ЛЧМ. Показано, что на среднеширотной трассе Васильсурск Нижний короткой _ Новгород протяженностью 130 км по результатам моделирования ДЧХ наилучшее согласование экспериментальных и модельных ДЧХ имело место для ПИВ с оценочными параметрами: амплитуда возмущения $\delta \sim 0.1$, длина волны $\Lambda = 100$ км, скорость V ~110 м/с с ориентацией волнового вектора к горизонтали под углом $\beta = -45^{\circ}$ и азимутом $\alpha = 83^{\circ}$. В результате же работы сети синхронно работающих ионозондов с ЛЧМ в эксперименте 2019 года (станции Васильсурск – Казань – Йошкар-Ола) были получены результаты, свидетельствующие о направлении движения ПИВ с α ~160°. При этом видимые серповидные периодические искажения ДЧХ наблюдались на трассах различных направлений, что в случае единичного гармонического возмущения, используемого в задаче трехмерного моделирования, не должно было наблюдаться. Данное обстоятельство может быть свидетельством наличия в реальной ионосфере более сложной картины возмущений, чем одно гармоническое с одним периодом и направлением волнового вектора, использованное в процессе моделирования.

Тем не менее, результаты моделирования и результаты определения направления и скорости ПИВ с помощью сети ионозондов хорошо согласуются с известными данными о параметрах среднемасштабных волновых возмущений.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$A\Gamma B -$	акустико-гравитационная волна
АЧХ –	амплитудно-частотная характеристика
БРПДС –	базовая радио приемно-передающая станция
ВЧХ –	высотно-частотная характеристика
ДБК —	дуга большого круга (ортодромия)
ДКМ —	декаметровый
ДКМВ —	декаметровые волны
Д ЧХ –	дистанционно-частотная характеристика
ИВЧДС –	ионосферно-волновая и частотно-диспетчерская служба
КВ –	короткие волны (коротковолновый)
КМ —	крупномасштабный
ЛЧМ —	линейная частотная модуляция
ЛЧМ-ионозонд –	ионозонд с использованием ЛЧМ
MM –	мелкомасштабный
ММП –	межпланетное магнитное поле
МНЧ –	максимальная наблюдаемая частота
МПЧ —	максимальная применимая частота
H3 –	наклонное зондирование
ННЧ —	наименьшая наблюдаемая частота
ОКП –	околоземное космическое пространство
ОРЧ –	оптимальная рабочая частота
ПИВ –	перемещающееся ионосферное возмущение
C3 –	солнечное затмение
CM –	среднемасштабный
IRI–	International Reference Ionosphere (модель ионосферы)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Комарович, В.Ф. КВ радиосвязь. Состояние и направления развития / В.Ф. Комарович, В.Г. Романенко // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № 12. С. 3-16..
- Goodman, J.M. HF Communication, Sciences and Technology / J.M. Goodman. New York, USA, 1992.
- Иванов, В.А. Аппаратура частотного обеспечения в адаптивной системе КВ радиосвязи / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, В.П. Урядов, В.В. Шумаев // Электросвязь. – 1995. – № 11. – С. 30-32.
- Иванов, В.А. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях (обзор) / В.А. Иванов, В.И. Куркин, В.Е. Носов, В.П. Урядов, В.В. Шумаев // Изв. Вузов Радиофизика. 2003. Т. 46, № 11. С. 919-952.
- Fenwick, R.B. Step by step to a linear frequency sweep / Fenwick R.B. and Barry G.H. // Electronics. - V. 38, July 1965. - P. 66.
- Филипп, Н.Д. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере / Н.Д. Филипп, Н.Ш. Блаунштейн, Л.М. Ерухимов и др. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 288 с.
- Hocke, K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances:1982-1995 / K. Hocke, K. Schlegel // Ann.Geophys. 1996. V. 14, P. 917-940.
- Афраймович, Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
- Вертоградов, Г.Г. Наклонное зондирование и прогнозирование максимально наблюдаемой частоты на трассах различной протяженности и ориентации / Г.Г. Вертоградов, В.Г. Вертоградов, Т.С. Родионов, В.П. Урядов // Изв. Вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2007. – № 3. – С. 23-27.
- 10. Урядов, В.П. Экстраполяция максимально применимой частоты путем адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным наклонного

зондирования в Евроазиатском регионе / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 12.

- Wagner, L.S. Delay, Doppler, and amplitude characteristics on HF signals received over a 1300-km transauroral sky wave channel / L.S. Wagner, J.A. Goldstein, M.A. Rupar, E.J. Kennedy // Radio Sci. – 1995. – V. 30, № 3. – P. 59-676.
- Angling, M. J. Measurements of Doppler and multipath spread on oblique highlatitude HF paths and their use in characterizing data modem performance / M. J. Angling, P.S. Cannon, N. C. Davies et al. // Radio Sci. –1998. – V. 33, № 1, – P. 97-107.
- Milan, S.E. Observations of the reduction in the available HF band on four high latitude paths during periods of geomagnetic disturbance / S.E. Milan, M. Lester, T.B. Jones, E.M. Warrington // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 1998. – V. 60. – P. 617-629.
- Урядов, В.П. Особенности распространения КВ сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений / В.П. Урядов, В.И. Куркин, Г.Г. Вертоградов и др. // Изв. Вузов Радиофизика. – 2004. – Т. 47, № 12. – С. 1041-1056.
- 15. Uryadov, V.P. Impact of heliogeophysical disturbances on ionospheric HF channels / V.P. Uryadov, F.I. Vybornov, A.A. Kolchev et al. // Advances in Space Research. - 2018, - V. 61, - P. 1837-1849.
- 16. Uryadov, V.P. Dynamic of the auroral oval during geomagnetic disturbances according to the data of oblique sounding of the ionosphere in the Eurasian longitudinal sector / V.P. Uryadov, A.A. Ponyatov, G.G. Vertogradov et al. // International Journal of Geomagnetism and Aeronomy. 2005. V. 6, №. 1.
- Урядов, В.П. Особенности распространения коротковолновых сигналов на трассах наклонного зондирования во время солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 95-109.

- Cannon, P.S. Morphology of the high-latitude ionosphere and its implication for HF communications systems / P.S. Cannon // IEE Proc., Part I. 1989. V. 136. P. 1-10.
- Besprozvannaya, A.S. Dynamics of the high-latitude ionosphere and variation of HF radio wave propagation conditions during wordl storms/ A.S. Besprozvannaya, V.M. Lukashkin // Geomagn. Aeron. 1990. V. 30. P. 682-685.
- 20. Buonsanto, M.J. Ionospheric storms a review / M.J. Buonsanto // Space Sci. Rev.
 1999. V. 88. P. 563-601.
- Blagoveshchensky, D.V. High-latitude ionospheric phenomena diagnostics by high-frequency radio wave propagation observations / D.V. Blagoveshchensky, L.V. Egorova, and V.M. Lukashkin // Radio Sci. 1992. –V. 27. P. 267-274.
- Blagoveshchensky, D.V. Irregular HF radio propagation on a subauroral path during magnetospheric substorms / D.V. Blagoveshchensky, T.D. Borisova, J.W. MacDougall // Ann. Geophys. – 2006. – V. 24. – P. 1839-1849.
- Goodman, J. A long-term investigation of the HF communication channel over middle- and high-latitude paths / J. Goodman, J. Ballard, E. Sharp // Radio Sci. – 1997. – V. 32, №. 4. – P. 1705-1715.
- 24. Иванов, В.А. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях
 / В.А. Иванов, В.И. Куркин, В.Е. Носов и др. // Изв. вузов. Радиофизика. –
 2003. Т. 46, № 11. С. 919.
- McNamara, L.F. Spatial correlations of foF2 deviations and their implications for global ionospheric models: 1. Ionosondes in Australia and Papua New Guinea / L.F. McNamara, P.J. Wilkinson // Radio Sci. – 2009. – V. 44, RS2016, – doi: 1029/2008RS003955.
- 26. Ivanov, V.A. Forecasting and updating HF channel parameters on the basis of oblique chirp sounding / V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, V.V. Shumaev, V.P. Uryadov // Radio Sci. 1997. V. 32, № 3. P. 983-988.
- 27. Арефьев, В.И. Методы диагностики характеристик ионосферы для заданного региона и коррекция моделей ионосферы в интересах повышения точности прогнозирования распространения декаметрового диапазона / В.И. Арефьев,

М.К. Кочерова, А.Б. Талалаев, В.В. Тихонов // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. – 2016. – №1. – С. 33-51.

- Крашенинников И.В. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001 / И.В. Крашенинников, И.Б. Егоров, Н.М. Павлова // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 4. С. 526.
- Егоров, В.А. Метод региональной адаптации модели ионосферы IRI с использованием данных со станций возвратно-наклонного зондирования / В.А. Егоров, К.А.Тетерин // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity. – 2015. – P. 127-129.
- Смирнов, В.М. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга состояния ионосферы в режиме реального времени / В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова, С.И. Тынянкин и др. // Гелиогеофизические исследования. 2013. вып. 4. С. 32–38.
- Reilly, M.H. Oblique ionograms and HF propagation assessment / M.H. Reilly, E.K. Yamamura // Proc. IEEE MILCOM Conf. Los Angeles Calif. Oct. 1984. – 1984. – P. 100-104.
- Reilly, M.H. Sounder updates for statistical model predictions of maximum usable frequencies on HF sky wave paths / M.H. Reilly, M. Daehler // Radio Sci. – 1986. – Vol.21. – №.6. – P. 1001-1008.
- 33. Kouris, S.S. On the day-to-day variation of the MUF over Europe / S.S. Kouris, D.N.
 Fotiadis, R. Hanbaba // Phys.Chem.Earth. 2000. V. 25, №. 4. P. 319-325.
- McNamara, L.F. The Ionosphere: Communications, Surveillance, and Direction Finding / L.F. McNamara. – Malabar, USA: Krieger, 1991.
- Fotiadis, D.N. On the global behavior of the day-to-day MUF variation / D.N. Fotiadis, G.M. Baziakos, S.S. Kouris // Adv. Space Res. – 2004. – V. 33. – P. 893– 901.
- 36. Araujo-Pradere, E. A. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity / E. A. Araujo-Pradere, T. J.

Fuller-Rowell, M.V. Codrescu, D. Bilitza // Radio Sci. – 2005. – V. 40. – doi:10.1029/2004RS003179.

- Deminov, M. G. Statistical properties of variability of the quiet ionosphere F2-layer maximum parameters over Irkutsk under low solar activity / M. G. Deminov, G.F. Deminova, G.A. Zherebtsov, N. Polekh // Adv. Space Res. -2013. - Vol. 51. - P. 702-711.
- Forbes, J.M. Variability of the ionosphere / J.M. Forbes, S.E. Palo, X. Zhang // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. - 2000. - V. 62. - P. 685-693.
- Rishbeth, H. Patterns of F2 layer variability / H. Rishbeth, M. Mendillo // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2001. – V. 63. – P. 1661–1680.
- Kazimirovski, E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: A review / E.S. Kazimirovski // Ann Geophys. – 2002. – V. 45. – P. 1–29.
- Ruohoniemi, J.M. Dependencies of high-latitude plasma convection: Consideration of interplanetary magnetic field, seasonal, and universal time factors in statistical patterns / J.M. Ruohoniemi, R.A. Greenwald // J. Geophys. Res. – 2005. – V. 110, A09204. – doi:10.1029/2004JA010815.
- Брюнелли, Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе. М.: Наука, 1988. – 527 с.
- 43. Урядов, В.П. Особенности распространения коротковолновых сигналов на трассах наклонного зондирования во время солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 95-109.
- 44. Datta, R. Solar eclipse effect on sporadic E ionization / R. Datta // J.Geophys. Res. 1973. V. 78 (1). P. 320-322. doi:10.1029/JA078i001p00320.
- Chen, G. Enhancement and HF Doppler observations of sporadic-E during the solar eclipse of 22 July 2009 / G. Chen, Z. Zhao, G. Yang et al. // J. Geophys. Res. – 2010115, A09325. – doi:10.1029/2010JA015530.
- 46. Chimonas, G. Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse / G. Chimonas,
 C.O. Hines // J. Geophys. Res. 1970. V. 75 (4), 875, doi:10.1029/
 JA075i004p00875.

- 47. Урядов, В.П. Ионосферные эффекты солнечного затмения 20 марта 2015г. на трассах наклонного зондирования в евроазиатском долготном секторе / В.П. Урядов, А.А. Колчев, Ф.И. Выборнов и др. // Изв. Вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 6. С. 477-488.
- Zerefos, C.S. Evidence of gravity waves into the atmosphere during the March 2006 total solar eclipse / C.S. Zerefos et al. //Atmos. Chem. Phys. – 2007. – P. 4943– 4951. – doi:10.5194/acp-7-4943-2007.
- 49. Fritts, D.C. Gravity wave forcing in the middle atmosphere due to reduced ozone heating during a solar eclipse / D.C. Fritts, Z. Luo // J. Geophys. Res. 1993. V. 98 (D2). P. 3011–3021. doi:10.1029/92JD02391.
- 50. Hanuise, C. HF Doppler observations of gravity waves during the 16 February 1980 solar eclipse / C. Hanuise, P. Broche, G. Ogubazghi // J. Atmos. Terr. Phys. 1982.
 V. 44. P. 963–966. doi:10.1016/0021-9169(82)90060-5.
- Chen, G. Gravity waves and spread Es observed during the solar eclipse of 22 July 2009 / G. Chen, Z. Zhao, Y. Zhang et al. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, A09314. doi:10.1029/2011JA016720.
- 52. Ларюнин, О.А. Численный синтез ионограмм в горизонтально-неоднородной ионосфере на основе модели комбинированного параболического слоя / О.А. Ларюнин. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3.
- 53. Вертоградова, Е.Г. Диагностика, моделирование и прогнозирование характеристик декаметровых радиоволн в естественно возмущенной и искусственно модифицированной ионосфере. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Вертоградова Елена Геннадьевна; ФГАОУ высшего профессионального образования «Южный федеральный университет». Ростов-на-Дону, 2014.
- 54. Bowman, G.G. A review of some recent work on mid-latitude spread F occurrence as detected by ionosondes / G.G. Bowman // J. Geomagn. Geoelectr. 1990. V.
 42. P. 109.

- 55. Черкашин, Ю.Н. Экспериментальные исследования вариаций МПЧ на трассах наклонного зондирования / Ю.Н. Черкашин, И.Б. Егоров, В.П. Урядов, А.А. Понятов // Изв. вузов Радиофизика. – 2003. – Т. 46, № 12. – С. 1011-1016.
- Бертоградов, Г.Г. Мониторинг волновых возмущений методом наклонного зондирования ионосферы / Г.Г. Вертоградов, В.Г. Вертоградов, В.П. Урядов // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. 49, № 12. – С. 1015-1029.
- 57. Костров, Л.С. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы / Л.С. Костров, В.Т. Розуменко, Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. 1999. Т. 4, № 3. С. 209-226.
- Черногор, Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы / Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59-106.
- 59. Бурмака, В.П. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов / В.П. Бурмака, В.И. Таран, Л.Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 4. С. 518-534.
- MacDougall, J.W. Travelling ionospheric disturbance properties deduced from Super Dual Auroral Radar measurements / J.W. MacDougall, D.A. Andre, G.J. Sofko, C.S. Huang, A.V. Koustov // Ann. Geophysicae. – 2001. – V. 18. – P. 1550-1559.
- Ho, C.M. Ionospheric total electron content perturbations monitored by the GPS global network during two Northern Hemisphere winter storms / C.M. Ho, A.J. Mannucci, L. Sparks et al.// J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 409-420.
- Афраймович, Э.Л. Спектр перемещающихся ионосферных возмущений по данным глобальной сети GPS / Э.Л. Афраймович, Е.А. Косогоров, О.С. Лесюта, И.И. Ушаков // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2001. – Т. 44, № 10. – С. 828-839.
- Borries, C. Storm induced large scale TIDs observed in GPS derived TEC / C. Borries, N. Jakowski, V. Wilken // Ann. Geophys. – 2009. – V. 27, №. 4. – P. 1605-1612.

- 64. Kalikhman, A.D. Medium-scale travelling ionospheric disturbances and thermospheric winds in the F-region / A.D. Kalikhman // J. Atm. Terr. Phys. 1980. V. 42. P. 697-703.
- Waldock, J. A. The effects of neutral winds on the propagation of medium scale atmospheric gravity waves at mid-latitudes / J. A. Waldock, T. B. Jones // J. Atmos. Terr. Phys. – 1984. – V. 46 (3). – P. 217-231.
- 66. Crowley, G. A synoptic study of TIDs observed in the United Kingdom during the first WAGS campaign, October 10-18, 1985 / G. Crowley, I. W. McCrea // Radio Sci. 1988. V. 23, № 6. P. 905-917.
- 67. Урядов, В.П. Прогнозирование и экстраполяция МПЧ по данным наклонного зондирования ионосферы в евроазиатском регионе / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова: в 6-ти томах. Воронежский государственный университет, АО "Концерн "Созвездие". – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019. – С. 403-413.
- 68. Урядов, В.П. Адаптация модели IRI-2016 к условиям распространения радиоволн по данным наклонного зондирования / В.П. Урядов, А.М. Станченков, А.В. Першин, Ф.И. Выборнов, В.А. Яшнов, Д.А. Масляев // В книге: Труды XXIII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н.А. Железцова. Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский университет им. Н.И. Лобачевского, 2019. С. 179-182.
- 69. Вертоградов, Г.Г. Моделирование распространения декаметровых радиоволн в условиях волновых возмущений концентрации электронов / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 6. С. 462-473.
- 70. Вертоградов, Г.Г. Однопозиционное определение местоположения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне с помощью

широкоапертурного пеленгатора-дальномера и ЛЧМ-ионозондарадиопеленгатора / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Чайка, В.А. Валов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.С. Стародубровский // Известия вузов. Радиофизика. – 2017. – Т. 60, № 12. – С. 1072-1092.

- 71. Вертоградов, Г.Г. Определение местоположения источников радиоизлучения в КВ диапазоне. 2. Использование ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Чайка, В.А. Валов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.С. Стародубровский // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции. В 5-и томах. – Воронеж: ООО «Вэлборн», 2018. – Т. 3. – С. 223-229.
- Вертоградов, Г.Г. Определение местоположения источников радиоизлучения в КВ диапазоне. 1. Использование пеленгатора-дальномера / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Чайка, В.А. Валов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.С. Стародубровский // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции (17-19 апреля 2018 г.). В 5-и томах. – Воронеж: ООО «Вэлборн», 2018. – Т. 3. – С. 213-222.
- Вертоградов, Г.Г. Траекторный синтез ионограмм на слабонаклонной трассе в условиях волновых возмущений / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // В сборнике: Распространение радиоволн Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах (Казань, 1-6 июля 2019 г.). – Казань: КФУ, 2019. – С. 372-375.
- 74. Урядов, В.П. Волновые возмущения во время авроральной суббури по данным наклонного зондирования ионосферы / В.П. Урядов, А.А. Колчев, Ф.И. Выборнов, И.А. Егошин, В.В. Шумаев, А.В. Першин, А.Г. Чернов // В сборнике: Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолаборатории. Материалы докладов. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2018. – С. 183-186.

- 75. Вертоградов, Г.Г. Моделирование квазивертикального зондирования ионосферы в условиях волновых возмущений / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // В сборнике: Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолаборатории. Материалы докладов. Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2018. С. 187-190.
- 76. Вертоградов, Г.Г. Оценка точности определения местоположения источника радиоизлучения с помощью ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Чайка, В.А. Валов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.С. Стародубровский // В сборнике: Распространение радиоволн Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции (Казань, 1-6 июля 2019 г.). В 2-х томах. – Казань: КФУ, 2019. – С. 376-379.
- 77. Шейнер, О.А. Оценка степени ионосферных возмущений по поведению нового ионосферного индекса / О.А. Шейнер, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62, № 4. – С. 509-517.
- 78. Урядов, В.П. Вариации диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Известия вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 2. С. 83-94.
- 79. Урядов, В.П. Диапазон изменений ключевых параметров ионосферного КВ канала по данным наклонного зондирования на субавроральной трассе в условиях магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.М. Станченков // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, в 6 т. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. С. 387-397.
- 80. Урядов, В.П. Вариации ключевых параметров ионосферного КВ канала на субавроральной трассе в условиях магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.А. Пичененко, А.В.

Першин // В книге: Труды XXIV научной конференции по радиофизике, посвященной посвящённой 75-летию радиофизического факультета. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2020. – С. 156-159.

- 81. Урядов, В.П. Наклонное зондирование ионосферы в условиях магнитной активности в сентябре 2017 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. В 6-ти томах. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019. С. 361-368.
- 82. Урядов, В.П. Влияние солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 г. на характеристики сигналов наклонного зондирования ионосферы / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.М. Станченков, Д.А. Масляев // В книге: Труды XXIII научной конференции по радиофизике, посвященной 100летию со дня рождения Н.А. Железцова. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2019. – С. 183-186.
- 83. Vybornov, F. On the results of a special experiment on the registration of traveling ionospheric disturbances by a system of synchronously operating chirp ionosondes
 / F. Vybornov, O. Sheiner, A. Pershin, A. Kolchev, E. Zykov, A. Chernov, V. Shumaev // Atmosphere. 2022. V. 13, № 1.
- 84. Выборнов, Ф.И. Применение пространственно-разнесенных ЛЧМ-станций для регистрации перемещающихся ионосферных возмущений / Ф.И. Выборнов, Н.В. Бахметьева, Е.Ю. Зыков, А.А. Колчев, А.В. Першин, А.Г. Чернов, В.В. Шумаев // В сборнике: Распространение радиоволн. Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции. Калининград. 2021. С. 352-357.
- Бахметьева, Н.В. Результаты работы среднеширотной сети ЛЧМ станций зондирования ионосферы в 2020-2022 годах / Н.В. Бахметьева, Ф.И. Выборнов, Е.Ю. Зыков, А.Ю. Клинов, А.А. Колчев, А.В. Першин, О.А.

Шейнер, В.В. Шумаев, А.Г. Чернов // В сборнике: Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию М.Т. Греховой. Материалы конференции. Нижний Новгород, 2022. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022. – С. 138-141.

- 86. Шумаев, В.В. Отчет о НИР «Разработка, изготовление и натурные испытания макета программно-управляемого цифрового синтезатора сигналов заданной частотно-временной структуры» / Научный руководитель, к.ф.-м.н. В.В. Шумаев. ООО «СИТКОМ». – Йошкар-Ола, 2010. – 37 с.
- 87. Uryadov, V.P. Results of observations of the ionosphere response to a partial solar eclipse on 11.08.2008 according to data from a network oblique sounding paths in the Eurasian region / V.P. Uryadov, F.I. Vybornov, A.V. Pershin, O.A. Sheiner, V.I. Kurkin // В сборнике: 2020 33rd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. URSI GASS 2020. 33. 2020. C. 9232238.
- 88. Урядов, В.П. Результаты наблюдений частного солнечного затмения 11 августа 2018 года на сети трасс наклонного зондирования ионосферы в евроазиатском регионе / В.П. Урядов, В.И. Куркин, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, О.А. Шейнер // Physics of Auroral Phenomena. 2020. Т. 43, № 1. С. 138-141.
- 89. Урядов, В.П. Результаты наблюдений частного солнечного затмения 11 августа 2018 г. по данным наклонного зондирования / В.П. Урядов, Д.А. Масляев, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.М. Станченков // В книге: Труды ХХІІІ научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н.А. Железцова. Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. 2019. Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2019. С. 187-190.

- Bilitza, D. The International Reference Ionosphere 2012 a model of international collaboration / D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang, C. Mertens, V. Truhlik, et al.// J. Space Weather Space Clim., 4(A07), –doi:10.1051/swsc/2014004.
- 91. Понятов, А.А. Компьютерное моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн: Препринт НИРФИ № 428 / А. А. Понятов, В.П. Урядов. Нижний Новгород, 1996. 20 с.
- 92. Space Weather Prediction Center: сайт. National oceanic and atmospheric administration (NOAA). URL: <u>www.swpc.noaa.gov</u> (дата обращения: 01.03.2019).
- 93. Крашенинников, И. В. Модель IRI: Анализ среднемесячных параметров в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности / И.В. Крашенинников, Н.М. Павлова, Ю.С. Ситнов // Гелиогеофизические исследования. – 2016. –спец. вып. 14. – С. 82-91.
- 94. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования / Е. Четыркин. М.: Статистика, 1977. – 200 с.
- 95. Часовитин, Ю.К. Глобальная эмпирическая модель распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере / Ю.К. Часовитин, А.В. Широчков, А.С. Беспрозванная, Т.Л. Гуляева, П.Ф. Денисенко, О.А. Арменская, С.Е. Иванова, А.И. Каширин, Н.М. Клюева, Е.А. Корякина, Л.С. Миронова, Т.Н. Сыкилинда, В.Б. Шушкова, В.И. Водолазкин, В.В. Соцкий, Н.Е. Шейдаков // Ионосферные исслед. – М.: МГК, 1988. – № 44.. – С. 6–13.
- 96. Solarmonitor.org: сайт. URL: <u>www.solarmonitor.org</u> (дата обращения: 25.09.2020).
- 97. Space Weather Prediction Center: сайт. National oceanic and atmospheric administration (NOAA). URL: <u>www.swpc.noaa.gov</u> (дата обращения: 28.02.2020).
- 98. SOHO LASCO CME CATALOG: сайт. URL: <u>https://cdaw.gsfc.nasa.gov</u> (дата обращения: 25.09.2020).

- 99. Нишида, А. Геомагнитный диагноз магнитосферы / А. Нишида. М.: Мир, 1980. – 299 с.
- 100. World Data Center for Geomagnetism: сайт. Kyoto. URL: <u>wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp</u> (дата обращения: 28.02.2020).
- 101. Данилов, А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения / А.Д. Данилов // Гелиогеофизические исследования. 2013. вып.5, С. 1-33.
- 102. Sodankylä Geophysical Observatory: сайт. URL: <u>www.sgo.fi</u> (дата обращения: 23.09.2020).
- 103. Рекомендация МСЭ R Р. 533-10. Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-радиолиний // Международный союз электросвязи. Женева. ITU 2010. 24 с.
- 104. Кнут, Р. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий / Р. Кнут, И. Вюрцбергер // Геомагнетизм и аэрономия. – 1976. – Т. 16, № 4, – С. 666-673.
- 105. Щука, Т.И. Спорадическая ионизация в нижней ионосфере (область Е) / Т.И. Щука // Ионосферно-магнитные возмущения в высоких широтах. под ред. О.А. Трошичева. Ленинград: Гидромет., 1986. С 163.
- 106. Whitehead, S.D. Production and Prediction of Sporadic E / S.D. Whitehead // Rev. Geophys. Space Phys. 1970. V. 8, №. 1, P. 65-144.
- 107. Blagoveshchensky, D.V. Space weather effects on radio propagation: study of the CEDAR, GEM and ISTP storm events / D.V. Blagoveshchensky, A.S. Kalishin, M.A. Sergeyeva // Ann. Geophys. – 2008. – V.26. – P. 1479-1490.
- 108. Earl, G. F. The frequency management system of the Jindalee over-the-horizon backscatter HF radar / G. F. Earl, B. D. Ward // Radio Sci. – 1987. – V. 22, №. 2. – P. 275-291.
- 109. Богута, Н.М. Использование ЛЧМ ионозонда в адаптивной системе КВ радиосвязи / Н.М. Богута, В.А. Иванов, Ю.В. Нога и др. // Радиотехника. 1993. № 4. С. 77-79.
- 110. Пономарчук, С.Н. Исследование особенностей возвратно-наклонного зондирования ионосферы на базе ЛЧМ-ионозонда / С.Н. Пономарчук, В.И.

Куркин, М.С. Пензин // Солнечно-земная физика. – 2017. – Т. 3, № 3. – С. 61-69.

- 111. Gonzalez, W.D. What is a geomagnetic storm? / W.D. Gonzalez, J.A. Joselyn, Y. Kamide et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, №.A4. P. 5771-5792.
- 112. Данилов, А.Д. Термосферно-ионосферное взаимодействие в период ионосферных бурь / А.Д. Данилов, Л.Д. Белик // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т. 31, № 2, – С. 209-222.
- 113. NASA Eclipse Web Site: сайт. URL: <u>http://eclipse.gsfc.nasa.gov</u> (дата обращения: 23.09.2020).
- 114. Anderson, D.N. Global theoretical ionospheric model (GTIM) / D.N. Anderson, D.T. Decker, C.E. Valladares // Solar-Terrestrial Energy Program Handbook of Ionospheric Models. – 1996. – August. – P. 133.
- 115. Blelly, P.L. Moment fluid models of the terrestrial high latitude ionosphere between 100 and 3000 km / P.L. Blelly, A. Robineau, D. Lummerzheim, J. Lilensten // Solar-Terrestrial Energy Program Handbook of Ionospheric Models. 1996. August. P. 53.
- 116. Fuller-Rowell, T.J. A coupled thermosphere ionosphere model (CTIM) / T.J. Fuller-Rowell, D. Rees, S. Quegan et al. // Solar-Terrestrial Energy Program Handbook of Ionospheric Models. 1996. August. P. 217.
- 117. Tashchilin, A.V. Numerical modeling the high-latitude ionosphere / A.V. Tashchilin, E.B. Romanova // Proceeding of COSPAR Colloquia Series. -2002. V. 14. P. 315.
- 118. Поляков, В.М. Полуэмпирическая модель ионосферы низкая и средняя солнечная активность / В.М. Поляков, В.Е. Суходольская, М.К. Ивельская, Г.В. Шапранова // Материалы МЦД-Б. Междуведомственный геофизический комитет при президиуме АН СССР. – М.: МЦД-Б, 1978. – 112 с.
- 119. Поляков, В.М. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий / В.М. Поляков, В.Е. Суходольская, М.К. Ивельская, Г.Е. Сутырина, Г.В. Дубовская, М.Ю. Бузунова // Материалы МЦД-Б.

Междуведомственный геофизический комитет при президиуме АН СССР. – М.: МЦД-Б, 1986. – 136 с.

- 120. Титов, А.А. Трехмерная ассимиляционная модель ионосферы: теоретические и прикладные аспекты / А.А. Титов, Д.В. Соломенцев, Хаттатов В.У, Хаттатов Б.В., Мазакиров Р.В. // В сб. Одиннадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. – 2013. – XI.I.473.
- 121. McNamara, L. F. Validation of the Utah State University Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM) model predictions of the maximum usable frequency for a 3000 km circuit / L. F. McNamara, Dwight T. Decker, Judith A. Welsh and David G. Cole. // RADIO SCIENCE. – 2007 – V. 42, – RS3015, – doi:10.1029/2006RS003589.
- 122. McNamara, Leo F. Real-time specification of HF propagation support based on a global assimilative model of the ionosphere / Leo F. McNamara, Craig R. Baker, and William S. Borer // RADIO SCIENCE. – 2009. – V. 44. – RS0A15, – doi:10.1029/2008RS004004.
- 123. Shiokawa, K Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images / K Shiokawa, C. Ihara, Y. Otsuka, T. Ogawa // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, №. A1, 1052. doi:10.1029/2002JA009491.
- 124. Вертоградов, Г.Г. Особенности решения лучевых уравнений для крутопадающих на ионосферу декаметровых радиоволн / Г.Г. Вертоградов // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Материалы Международной научной конференции "Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ-2005". – Таганрог: ТРТУ, 2005. – 440 с. – С. 397-399.
- 125. Барабашов, Б.Г. Динамическая адаптивная модель связного декаметрового канала / Б.Г. Барабашов, Г.Г. Вертоградов // Радиотехника. – 1995. – № 12. – С. 29-32.

- 126. Барабашов Б.Г., Вертоградов Г.Г. Динамическая адаптивная структурнофизическая модель ионосферного радиоканала // Математическое моделирование. 1996. Т.8.№ 2. С.3-18.
- 127. Barabashov, B.G. Structural Physical Model of Ionosphere Channel / B.G. Barabashov, G.G. Vertogradov // Mill. Conf. on Antennas & Propag. AP2000: ESA (SP-444). 9-14 April 2000. Davos, Switzerland: ESA Publ. Div. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2000. V. 2. P. 17.
- 128. Вертоградов, Г.Г. Имитатор широкополосного ионосферного радиоканала / Г.Г. Вертоградов // Радиотехника и электроника. – 2003. –Т. 48, № 11. – С. 1322-1329.
- 129. Вертоградов, Г.Г. Имитатор декаметрового радиоканала / Г.Г. Вертоградов //
 Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2003. Т. 48, № 11. С.1322-1329.
- 130. Vertogradov, G.G. The computer simulation of the HF-channel / G.G. Vertogradov,
 E.G. Vertogradova // Proceeding of ICAP'11-P480, Manchester, UK, 17-20 April,
 2001. 2001. IEE 2001. V.2. P. 797-801.
- 131. Thébault, E. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation / E. Thébault, C. C. Finlay, C. D. Beggan et al. // Earth, Planets and Space 2015, 67:79 (27 May 2015). 2015. doi:10.1186/s40623-015-0228-9.
- 132. Hunsucker, R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A Review / R.D. Hunsucker // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20, №. 2. P. 293-315.
- 133. Bertin, F. Medium scale gravity waves in the ionospheric F-region and their possible origin in weather disturbances / F. Bertin, J. Testud, L. Kersley // Planet Space Sci. 1975. V. 23, №. 3. P. 493-507.
- 134. Bertin, F. The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere: an experimental study / F. Bertin, J. Testud, L. Kersley, P.R. Rees // J. Atm. Terr. Phys. – 1978. – V. 40, №.10-11. – P. 1161-1183.
- 135. Rice, C.J. Neutral atmospheric waves in the thermosphere and tropospheric weather systems / C.J. Rice, L.R. Sharp // Geophys. Res. Lett. 1977. V. 4, №.8. P. 315-318.

- 136. Waldock, J.A. Source regions of medium scale traveling ionospheric disturbances observed at mid-latitudes / J.A. Waldock, , T.B. Jones // J. Atmos. Terr. Phys. – 1987. – V. 49 (2). – P. 105-114.
- 137. Zhang, S. D. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30° N, 114° E) China / S. D. Zhang, F. Yi // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P. 665–673.
- 138. Fukushima, D. Observation of equatorial nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances in 630-nm airglow images over 7 years / D. Fukushima, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Ogawa // J. Geophys. Res. – 2012. – V. 117, A10324. – doi:10.1029/2012JA017758.
- 139. Hysell, D. L. Observational evidence for new instabilities in the mid-latitude E and F region / D. L. Hysell, M. Larsen, M. Sulzer // Ann. Geophys. 2016. V.34. P. 927–941.