

Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы

Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2000 г.

При помощи доплеровского радара (2.8 ÷ 3.5 МГц) в 1995-2000 гг. выполнены наблюдения за процессами в средней ионосфере (100 ÷ 300 км). Установлено, что вариации доплеровских спектров (ДС) отличаются большим разнообразием. Дана классификация видов ДС и вариаций средней частоты спектра. Оценены частоты появления этих видов. Описаны характерные суточные и сезонные вариации ДС. Приведены оценочные соотношения, связывающие параметры ДС с параметрами ионосферы. По данным наблюдений оценены характерные времена становления регулярной и нерегулярной структуры ионосферы (концентрации электронов и ее неоднородностей) в спокойных и возмущенных условиях. Полученные оценки параметров среды согласуются с известными из литературы и дополняют их.

За допомогою доплерівського радара (2.8 ÷ 3.5 МГц) в 1995-2000 рр. виконано спостереження за процесами в середній іоносфері (100 ÷ 300 км). Встановлено, що варіації доплерівських спектрів (ДС) характеризуються великим різноманіттям. Наведено класифікацію видів ДС і варіацій середньої частоти спектру. Оцінено частоти появи цих видів. Описано характерні добові та сезонні варіації ДС. Наведено оціночні співвідношення, що зв'язують параметри ДС з параметрами іоносфери. За даними спостережень оцінено характерні часи становлення регулярної та нерегулярної структури іоносфери (концентрації електронів та її неоднорідностей) в спокійних і збурених умовах. Одержані оцінки параметрів середовища погоджуються з відомими із літератури та доповнюють їх.

Введение

Ионосфера в качестве подсистемы входит в систему Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера – межпланетная среда – Солнце. “Снизу” и “сверху” в нее поступают потоки вещества, энергии и излучений различной природы. В результате этих воздействий в ионосфере в целом и в средней ионосфере (высоты $z \sim 100 \div 300$ км) в частности возникают нестационарные процессы с характерными временами от единиц секунд до 11 лет и более, которые исследованы недостаточно. Особенно плохо изучено взаимодействие упомя-

нутых подсистем. Дело в том, что для наблюдения быстро протекающих процессов требуется применение методов зондирования с высоким временным разрешением, для обработки данных наблюдений – использование быстродействующих ЭВМ. При длительных наблюдениях неизбежно увеличивается объем информации, подлежащей обработке, анализу и хранению. По указанным причинам измерения, выполненные ранее с использованием менее совершенных технических средств, были эпизодическими. В данной работе проведен морфологический анализ результатов наблюдений процессов в средней ионосфере

в 1995-2000 гг. Такой подход является актуальным не только с точки зрения проблем космической погоды, солнечно-земной физики и геофизики, но и с прикладной точки зрения, например, для селекции возмущений в ионосфере, вызванных заданным источником (предвестником землетрясения, стартом ракеты, радиоизлучением мощной системы и т. п.).

Целью работы является анализ вариаций характеристик радиосигнала (в основном доплеровских спектров), их классификация, оценка частоты появления вариаций определенного типа и обсуждение связи этих вариаций с нестационарными процессами в средней ионосфере. Насколько нам известно, наши наблюдения относятся к наиболее длительным и систематическим наблюдениям подобного рода (см., например, [1-5]).

Методика исследования

Для наблюдения нестационарных явлений в средней ионосфере удобным (простым, дешевым и весьма информативным) оказывается метод вертикального доплеровского радиозондирования (см., например, [1-9]). Доплеровский радар, подробнее описанный в работах [6, 9], состоит из двухканальной радиопередающей системы, двух передающих антенн, систем управления, обработки и регистрации. Диапазон рабочих частот $f = 1 \div 24$ МГц. В приведенных ниже исследованиях зондирование обычно велось на двух близких частотах в интервале от 2.8 до 3.5 МГц. Регистрация огибающей биений между колебаниями отраженного сигнала и опорного генератора производилась на магнитную ленту с частотой опроса 10 Гц. Спектральное оценивание на основе классического алгоритма быстрого преобразования Фурье осуществлялось ежеминутно по 512 отсчетам на интервале времени $\delta t = 51.2$ с. Для оценки периодов квазипериодических процессов ($T \approx 5 \div 20$ мин) в ионосфере дополнительно применялось быстрое преобразование Фурье на интервалах 64, 128 или 256 мин. Исходный временной ряд при этом образовывался из ежеминутных значений доплеровского смещения частоты, соответствующих

максимуму доплеровских спектров (ДС), полученных как описано выше.

Измерения выполнены за полуцикл солнечной активности с 1995 по 2000 г. Наблюдения проводились в разные сезоны, включая дни, близкие к зимнему и летнему солнцестоянию, весеннему и осеннему равноденствию, в течение суток, а также в окрестности утреннего и вечернего терминаторов. Общая продолжительность наблюдений около 5000 ч.

Для получения профиля $\partial N/\partial t$ (временной производной концентрации электронов $N(z)$) необходимо одновременное доплеровское зондирование на $10 \div 20$ частотах с шагом $0.5 \div 1$ МГц. В этом случае речь может идти об обращении соответствующего интегрального уравнения, связывающего доплеровскую частоту с профилем $\partial N/\partial t$. Если использовать только две частоты (например, $2 \div 3$ и $5 \div 10$ МГц), этот профиль получить не удастся, а можно лишь судить об одинаковости или различии процессов в E- и F-областях. При использовании двух близких частот (около 3 МГц) можно говорить лишь о процессах, усредненных по диапазону высот ниже области отражения радиоволн, которое имеет место на высотах около $130 \div 150$ км днем и $200 \div 250$ км ночью, но выше 100 км. (Ниже этой высоты показатель преломления ионосферы мало отличается от единицы и среда практически не дает вклада в эффект Доплера.) Поскольку вклад различных высот в интегральный доплеровский эффект различен, высотное разрешение, грубо говоря, определяется либо характерным масштабом $L_N = (N(\partial z/\partial N)) \sim 20$ км, либо приведенной высотой нейтральной атмосферы, которая составляет $10 \div 20$ км (если она меньше $L_N/2$). Последнее справедливо при исследовании перемещающихся ионосферных возмущений (см. ниже).

Изучение поведения ДС позволяет качественно судить о нестационарных процессах в ионосфере, не решая уравнений, связывающих характеристики сигнала и параметры среды. Для оценки величины вариаций последних необходим пересчет характеристик ДС в параметры ионосферы.

Укажем, что доплеровская частота f_d зависит от показателя преломления плазмы n

следующим образом [1, 3]:

$$f_d = -2 \frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_{z_0}^{z_r} n(t, z) dz, \quad (1)$$

где t – время, z_r – высота отражения сигнала, z_0 – высота нижней границы ионосферы, c – скорость света в вакууме. Как известно, данное соотношение применимо в случае вертикального зондирования плоскостистой изотропной ионосферы.

Результаты наблюдений

На рис. 1 приведен пример длительных (около 35 ч) наблюдений за вариациями ДС. Здесь удачно сочетаются почти все особенности в поведении спектров, наблюдавшиеся в течение ряда лет.

ДС будем классифицировать по количеству мод в них и вариациям средней частоты в спектре. Классификация оказывается не только полезной при систематизации и морфологическом анализе банка данных с большим объемом наблюдений, но и необходимой при решении задачи распознавания и селекции возмущений определенного типа на фоне других, например, при обнаружении реакции ионосферы на старты и полеты космических аппаратов (см. следующую статью авторов в этом номере журнала).

Согласно первой классификации спектры будем именовать одномодовыми, многомодовыми (часто двух-, реже трех- или четырехмодовыми) и “рассыпанными” (т. е. спектры уширяются и в них исчезает максимум, см., например, [4]). Рассмотрим их подробнее.

1. Одномодовый ДС. Отраженный сигнал однолучевой, спектр имеет четко выраженный максимум энергии, смещение и ширина спектра не превышают 0.1 Гц (разрешение по частоте $\delta f \approx (\delta t)^{-1} \approx 0.02$ Гц). Такие ДС обычно наблюдаются в середине дня или ночи в отсутствие возмущений, вызванных воздействием указанных выше подсистем. Пример обсуждаемых ДС приведен на рис. 1 (19 октября 1998 г., 9:10 ÷ 10:30 UT,

здесь и далее в работе используется мировое время – UT).

2. Многомодовый ДС. Возникает при двух-, трех- или четырехлучевом сигнале. “Расстояние” между модами в ДС от 0.1 ÷ 0.2 до 1 ÷ 1.5 Гц (см. рис. 1, 19 октября 1998 г., 17:40 ÷ 18:35, 21:53 ÷ 22:33).

3. “Рассыпанный” ДС. Иногда также именуется диффузным (рассеянным). Такой спектр в определенном смысле является противоположностью одномодового спектра, так как он по существу мультимодовый. В этом случае спектр широкий (1 Гц и более) и не имеет сколь-нибудь выраженного максимума. Отраженный сигнал является многолучевым, что вызвано рассеянием радиоволны на случайных неоднородностях ионосферы. Отсутствует какой-либо максимум в распределении энергии по частотному спектру. Ширина ДС достигает значений 1 ÷ 1.5 Гц (см. рис. 1, 20 октября 1998 г., 8:55 ÷ 9:35).

Следует иметь в виду, что “рассыпание” спектров возникает также при наличии сильных помех от близких радиостанций (см. рис. 1, 19 октября 1998 г., 10:30 ÷ 10:55). В этом случае оно обычно не связано с процессами в ионосфере (исключение составляет случай сильного поглощения зондирующих сигналов, когда отношение сигнал/шум также невелико, но уже по другой причине).

Согласно второй классификации вариации ДС будем называть незначительными, квазипериодическими, аperiodическими и гигантскими. Опишем их подробнее.

1. Незначительные вариации ДС. Чаще всего такие спектры наблюдаются в середине дня или ночи в спокойные дни (см. рис. 1, 19 октября 1998 г., 9:10 ÷ 10:30). Обычно вариации доплеровской частоты Δf_d , соответствующей максимуму спектра, не превышают 0.1 Гц.

2. Квазипериодические вариации ДС. (См. рис. 1, 19 октября 1998 г., 12:40 ÷ 13:15; 20 октября 1998 г., 14:00 ÷ 14:40). Такие вариации вызваны отражением зондирующего радиосигнала от квазипериодических неоднородностей электронной концентрации, возникающих при распространении в ионосфере волн плотности (акусто-гравитаци-

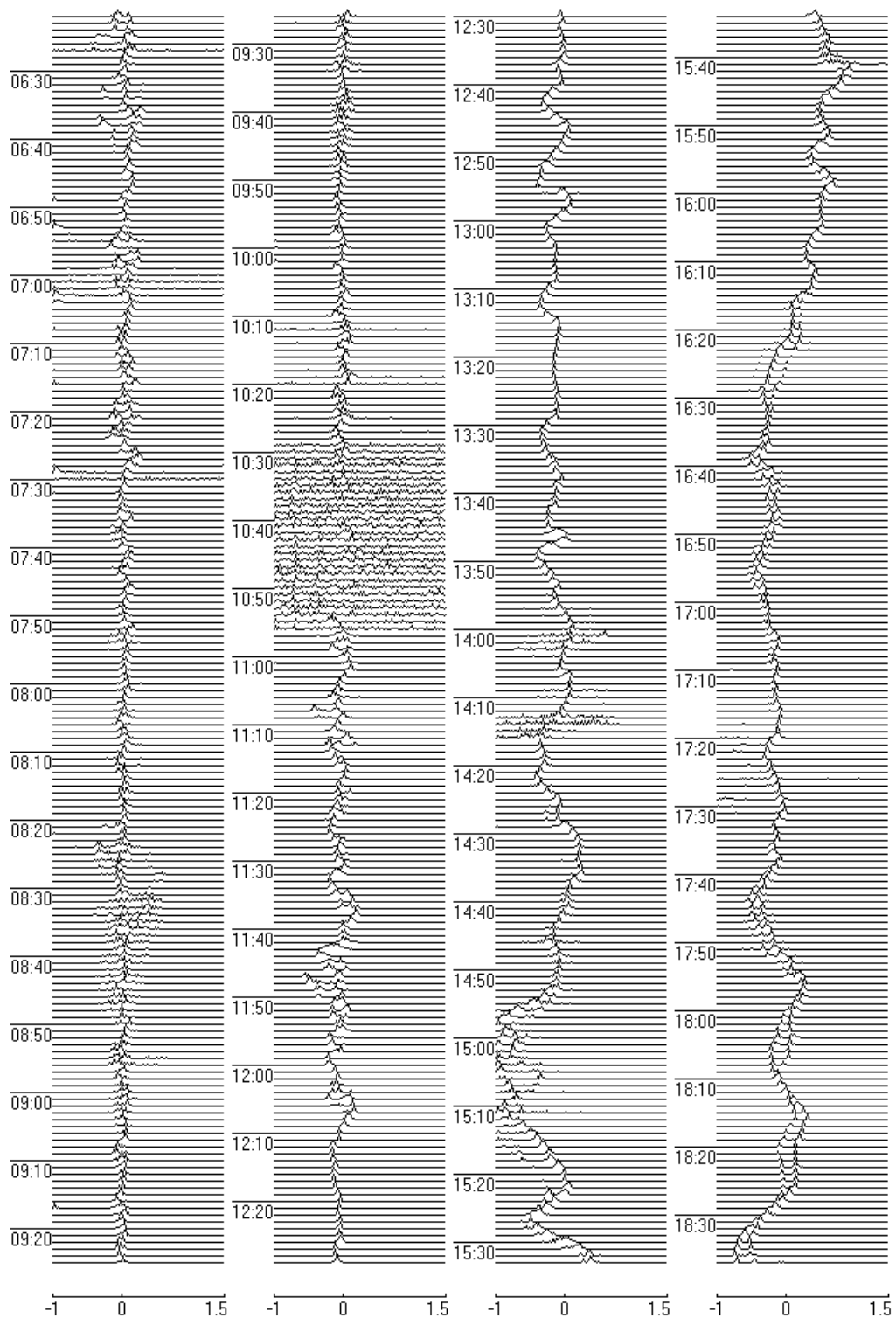


Рис. 1. Пример длительных наблюдений вариаций ДС (19-20 октября 1998 г. $f \approx 3.0$ МГц). На этом и других рисунках по горизонтальной оси указано доплеровское смещение частоты в Гц, а по вертикальной – время UT

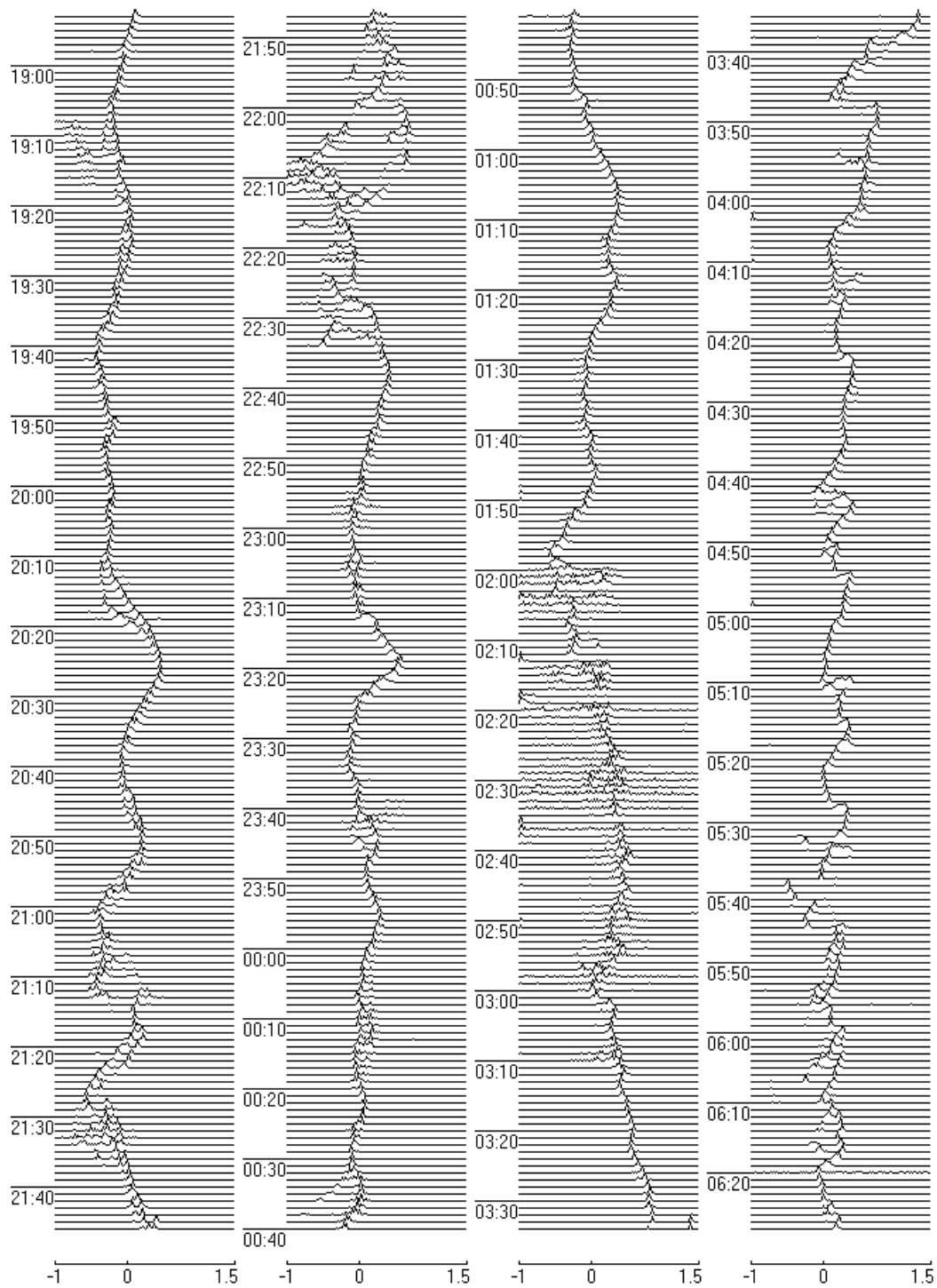


Рис. 1. (Продолжение)

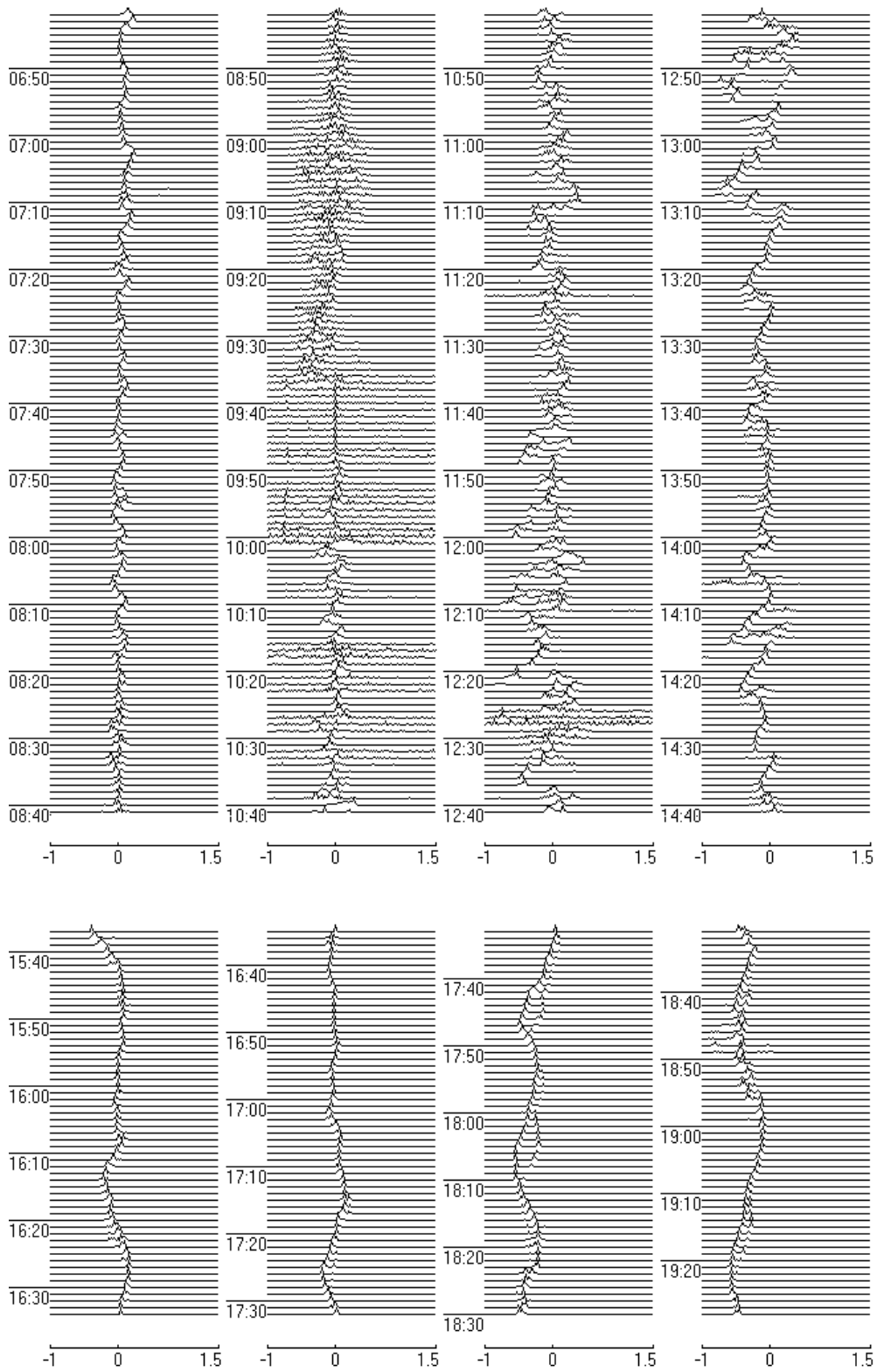


Рис. 1. (Продолжение)

онных волн). Период этих волн изменяется в широких пределах. Доплеровским методом чаще всего регистрируются волновые процессы с периодом $T \approx 5 \div 40$ мин. Амплитуда колебаний f_{da} обычно составляет $0.1 \div 0.3$ Гц, но иногда достигает 1 Гц.

3. Аперiodические вариации ДС. Они называются переходными процессами в ионосфере. Примеры таких вариаций также показаны на рис. 1 (19 октября 1998 г., 23:10 ÷ 23:25; 20 октября 1998 г., 03:00 ÷ 03:50). Аперiodические процессы в среде обусловлены эпизодическими процессами (вспышками на Солнце, магнитными бурями, падением крупных метеорных тел и т. п.). Величина f_d обычно составляет несколько десятых долей Гц.

4. Гигантские вариации ДС. (См. рис. 1, 19 октября 1998 г., 15:00 ÷ 16:30; 21:55 ÷ 22:10). Причина их возникновения та же, что и у аперiodических вариаций. Отличие заключается в величинах энергий возмущающих среду источников. Сравнительно редко встречаются гигантские квазипериодические вариации (рис. 1, 19 октября 1998 г., 20:10 ÷ 21:00; 20 октября 1998 г., 00:40 ÷ 02:00). В обоих случаях величина $\Delta f_d \approx 1$ Гц.

Рассмотренные виды ДС и их вариаций – несколько идеализированные. Часто наблюдается их комбинация. Примерами таких комбинаций могут быть квазипериодические или аперiodические вариации одномодовых или двухмодовых ДС и т. п. Заметим, что подобные комбинации имеют место примерно в течение 60 % всего времени наблюдения.

Дневные вариации ДС. В невозмущенные дни спектры обычно одномодовые, смещение ДС во времени практически отсутствует. Пример таких спектров, результат наблюдений в первой половине дня 20 октября 1998 г., показан на рис. 1. Появление и исчезновение эффекта “рассыпания” спектров иллюстрируют дневные измерения выполненные 27 июля 1998 г. (рис. 2). Умеренно спокойным был также день 16 сентября 1999 г. (рис. 3). Лишь изредка возникало уширение ДС. Существенные вариации спектров наблюдались в интервале 18:00 ÷ 20:30.

В возмущенные дни имеют место значительные вариации как самих ДС, так и цент-

ральной части f_{d0} , соответствующей максимуму энергии в ДС. Примером такого дня является 15 января 1999 г. (рис. 4). Величина изменений f_{d0} превышала 1 Гц. Эти значительные вариации f_{d0} вызваны прохождением в ионосфере перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), направление движения которых горизонтально и параллельно магнитному меридиану [10]. Такие ПИВ генерируются и распространяются во время магнитных бурь. В данном случае период этих возмущений около 10 мин.

Ночные вариации ДС. Пример результатов наблюдений в ночное-утреннее время зимой (14-15 февраля 1999 г.) показан на рис. 5. Примерно с 23.30 до 01.20 ионосфера оставалась спокойной. В интервале времени 01:20 ÷ 02:30 имело место смещение ДС примерно на 0.5 Гц, наблюдался слабо выраженный квазипериодический процесс. Затем в течение часа ионосфера снова оставалась достаточно спокойной. С 03.30 до 04.10 зафиксирована реакция на утренний терминатор. После 04.30 опять появился ярко выраженный квазипериодический процесс ($T \approx 15 \div 20$ мин, $f_{da} \approx 0.2 \div 0.3$ Гц).

Следующий пример результатов наблюдений в ночное время относится к весеннему сезону (15-16 мая 2000 г.). В эту ночь ионосфера была возмущенной, отмечался квазипериодический процесс с $T \approx 15 \div 20$ мин, $f_{da} \approx 0.3$ Гц (рис. 6). С 22.35 до 23.20 имело место уменьшение доплеровского смещения частоты до 0.5 Гц, затем после 23.20 наблюдается значительный (на $0.5 \div 0.6$ Гц) рост f_d , продолжавшийся около 40 мин, т. е. возвращение в область нулевых смещений. Такое поведение ДС совпало с прохождением утреннего терминатора. Позднее ионосфера оставалась относительно спокойной.

На рис. 7 показаны результаты наблюдений за ионосферой в ночное и утреннее время осенью (16-17 сентября 1999 г.). С 23.30 до 04.25 ионосфера была сильно возмущенной, отмечался квазипериодический процесс со значительной амплитудой (до 0.8 Гц) и переменным периодом – от 10 до 40 мин. Прохождение утреннего терминатора (01:25 ÷ 02:00)

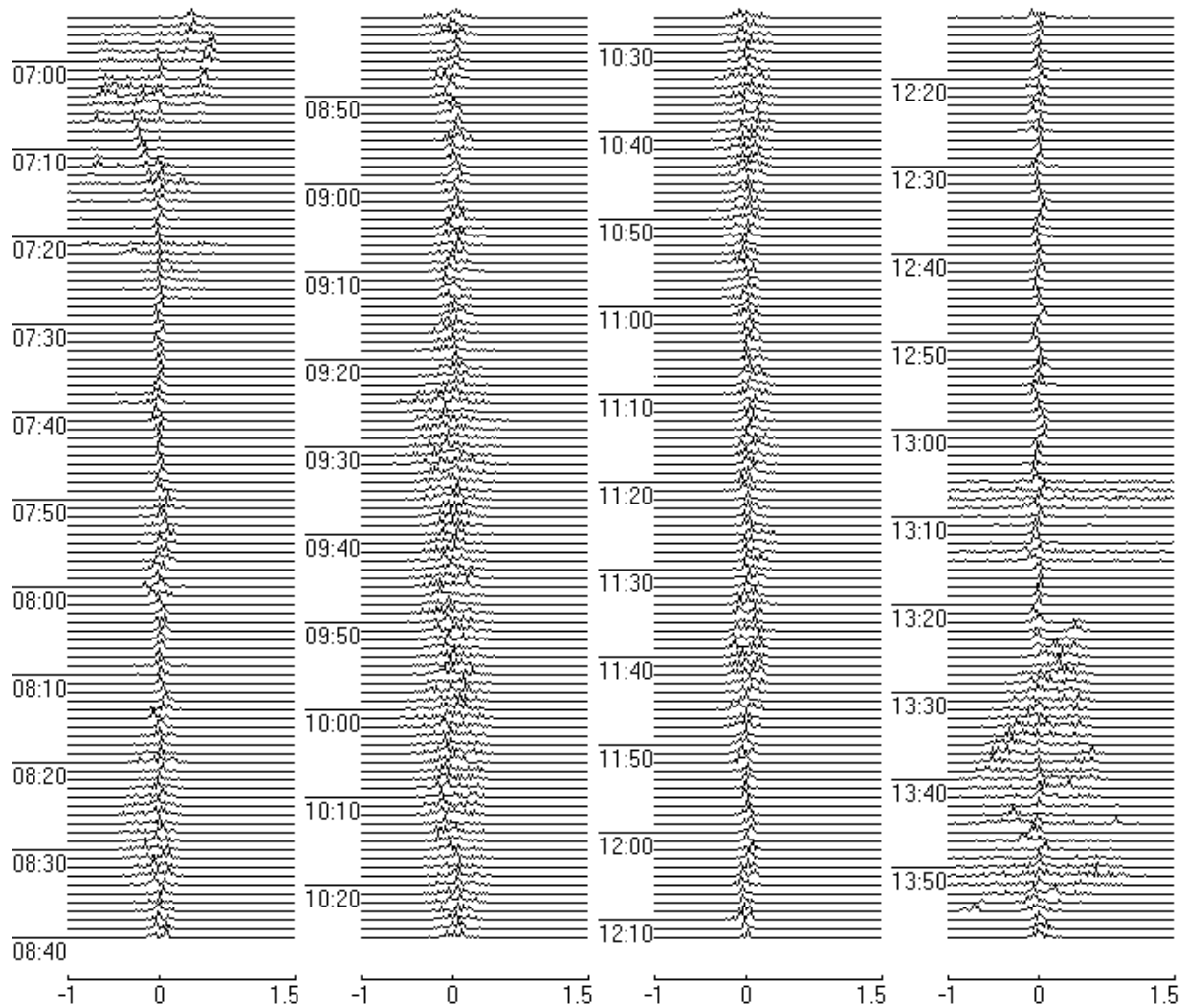


Рис. 2. Иллюстрация появления и исчезновения многолучевости (эффекта “рассыпания” спектров) в дневное время летом (27 июля 1998 г., $f \approx 3.0$ МГц)

вызвало уширение ДС до $0.6 \div 1$ Гц, фактически их “рассыпание”. После 04.30 ионосфера стала относительно спокойной.

На рис. 8 приведены результаты наблюдений в конце осени (28-29 ноября 1998 г.). Ночная ионосфера сильно возмущена, все время имело место “рассыпание” ДС.

Рис. 9 иллюстрирует вариации ДС в зимнюю ночь (18-19 декабря 1999 г.). Примерно до 02:10 ионосфера оставалась спокойной, затем наблюдался ярко выраженный квазипериодический процесс с периодом около 15 мин и амплитудой $0.2 \div 0.3$ Гц. С 03:20 до 04:10 среда опять оставалась спокойной, после 04:10

в течение 40 мин фиксировались сильные колебания f_d (с амплитудой $0.5 \div 0.6$ Гц и периодом 25 мин), вызванные прохождением утреннего терминатора (04:20 ÷ 04:55). После этого также отмечались квазипериодические процессы, но значительно меньшей амплитуды и с переменным периодом ($5 \div 15$ мин).

Утренние вариации ДС. В спокойные дни наибольшие вариации ДС имеют место через $2 \div 3$ ч после прохождения утреннего терминатора, когда характерное время увеличения электронной концентрации в окрестности области отражения $t_r = |N \partial t / \partial N|$ уменьшается до

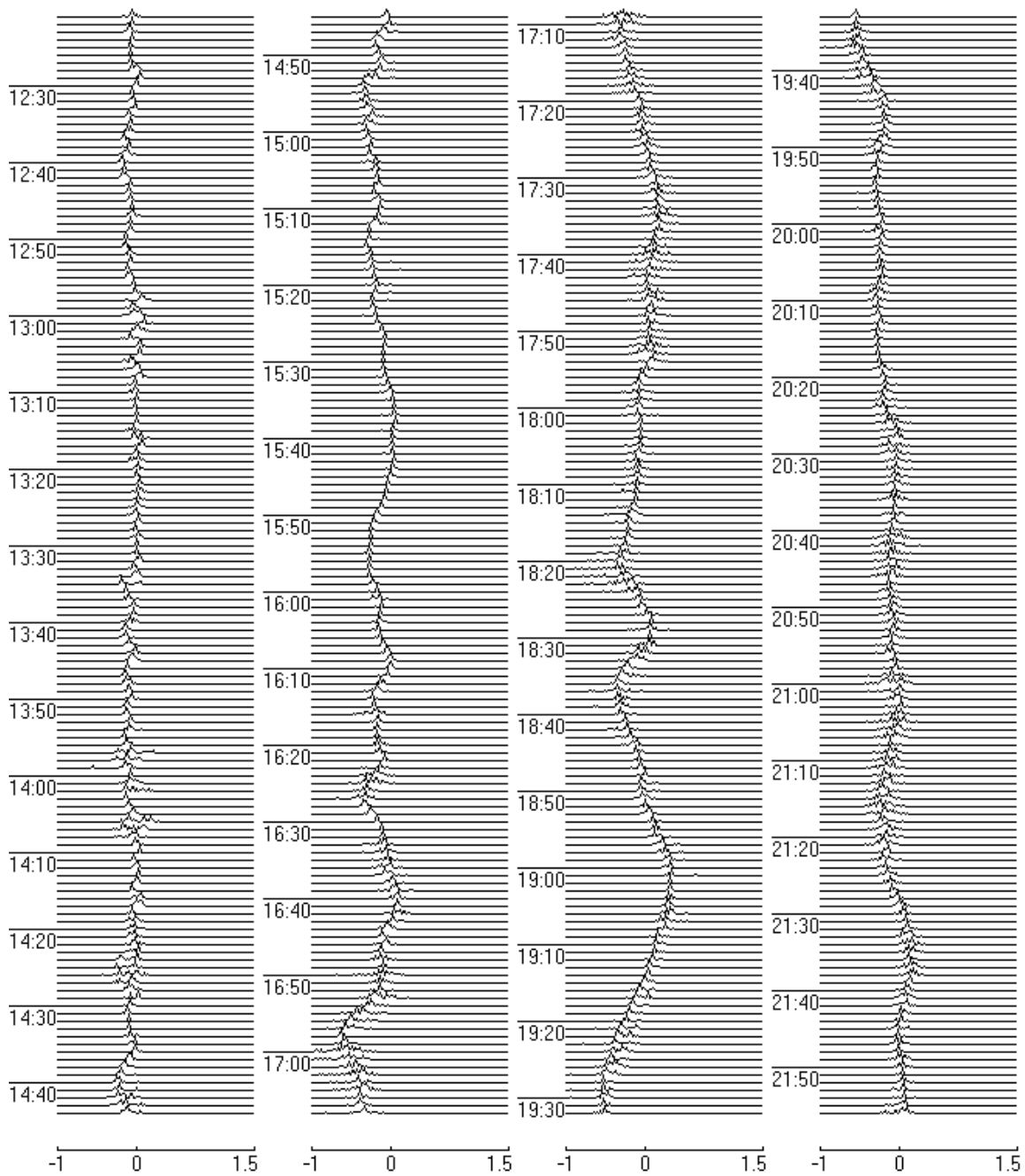


Рис. 3. Иллюстрация поведения ДС в умеренно спокойные дни осенью (16 сентября 1999 г., $f \approx 3.5$ МГц)

~ 600 с, а f_d увеличивается на $0.5 \div 0.6$ Гц. Наибольшие вариации наблюдаются в октябре – январе. В мае – июле Δf_d не превышает 0.1 Гц.

В целом утренний рост f_d продолжается от 2 ч (летом) до 5 ч (зимой).

Добавим, что указанному росту f_d предшествует значительное ($0.3 \div 0.7$ Гц) кратковременное ($1 \div 2$ ч) ее уменьшение, наступающее через $1 \div 2$ ч после прохождения утреннего терминатора. Иначе говоря, наблюдается послевосходный локальный минимум в зависимости $f_d(t)$.

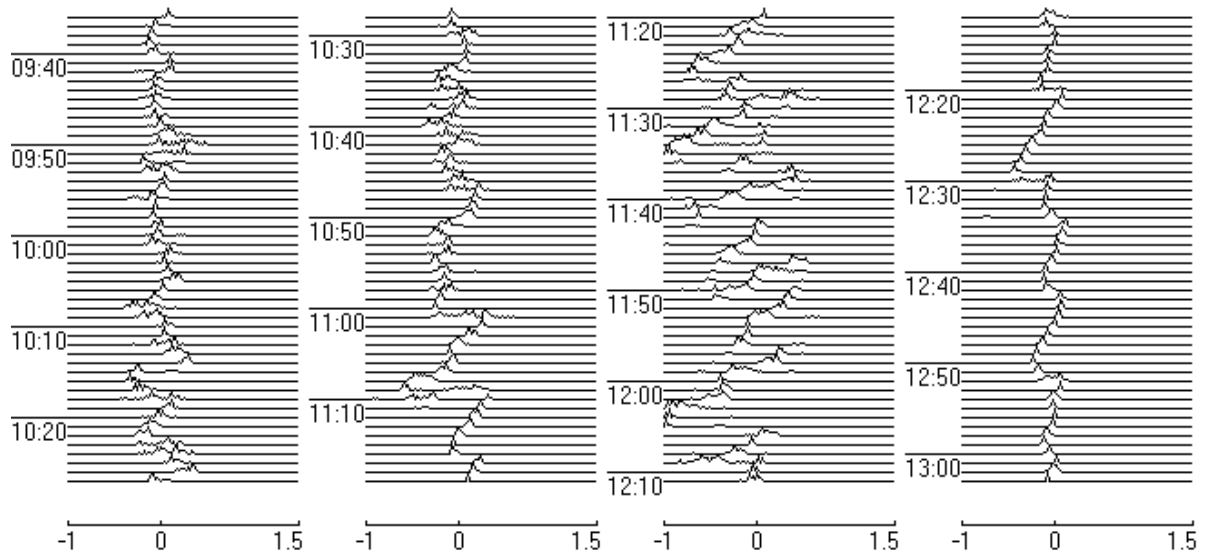


Рис. 4. Пример характерных для возмущенных дней зимой значительных вариаций, как самих ДС, так и центральной части f_{d0} , соответствующей максимуму энергии в ДС (15 января 1999 г., $f \approx 3.0$ МГц)

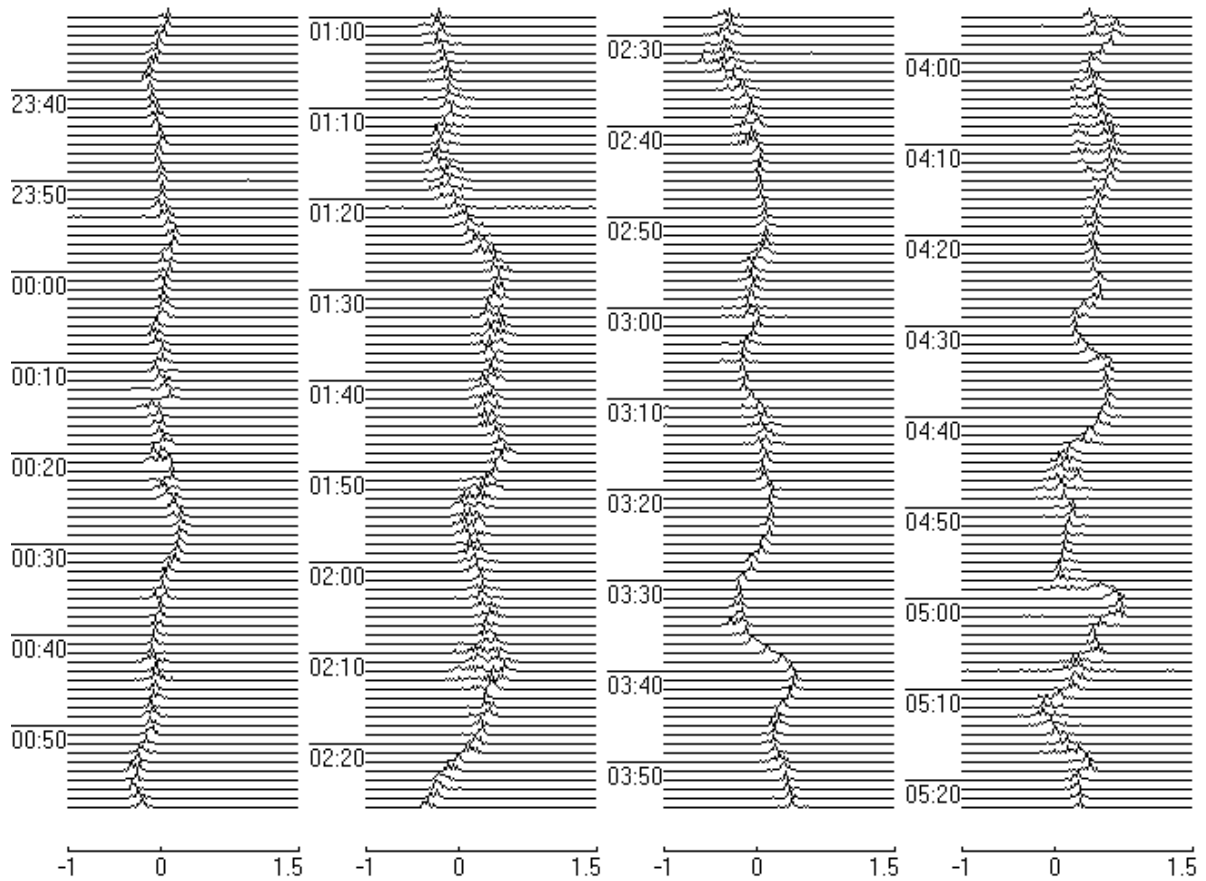


Рис. 5. Иллюстрация ночных вариаций ДС в возмущенной ионосфере зимой (ночь 14-15 февраля 1999 г., $f \approx 3.5$ МГц)

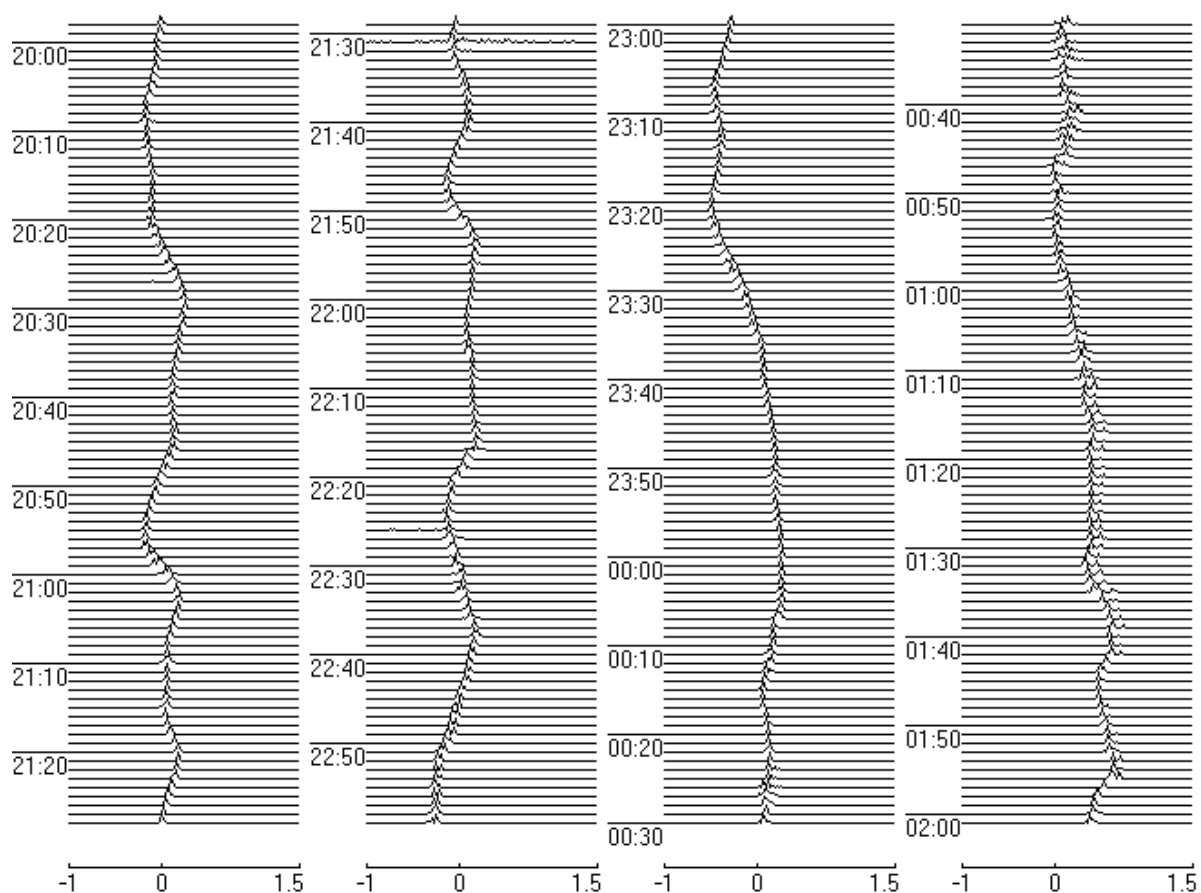


Рис. 6. Иллюстрация ночных вариаций ДС в возмущенной ионосфере весной (15-16 мая 2000 г., $f \approx 3.5$ МГц)

В возмущенные дни описанные вариации ДС маскируются более сильными и случайными процессами в ионосфере.

Вечерние вариации ДС. Максимальные значения электронной концентрации достигаются в окрестности времени $t_0 \approx 12$ ч. При этом $f_d \approx 0$ в течение примерно $2 \div 3$ ч в зимнее время и $4 \div 6$ ч в летнее время. После этого $N(t)$ начинает уменьшаться с характерным временем около $4 \cdot 10^3$ с. Это приводит к отрицательному смещению доплеровской частоты на $0.2 \div 0.3$ Гц в зимнее время. С мая по сентябрь наблюдается локальный максимум N в вечернее время. Поэтому на фоне медленного уменьшения $f_d(t)$ отмечается локальный максимум продолжительностью около $1 \div 2$ ч. При этом его величина не превышает $0.5 \div 0.7$ Гц.

Сказанное выше относится к спокойным условиям. В возмущенные дни такое поведение $f_d(t)$ нарушается более сильными процессами.

Вариации ДС при прохождении терминатора. Здесь будут рассмотрены вариации спектров сигнала, которые наблюдаются непосредственно при прохождении терминатора.

Проанализировано 116 событий, из них 67 случаев, соответствующих утреннему терминатору. Поскольку движение границы области тень – свет (или свет – тень) происходит на фоне других процессов, то вариации ДС отличаются большим разнообразием (см., например, рис. 1, 5, 6, 7, 9). Имеют место все перечисленные выше виды ДС (табл. 1) и их вариаций (табл. 2). Едва ли не единственной общей закономерностью в реакции ионос-

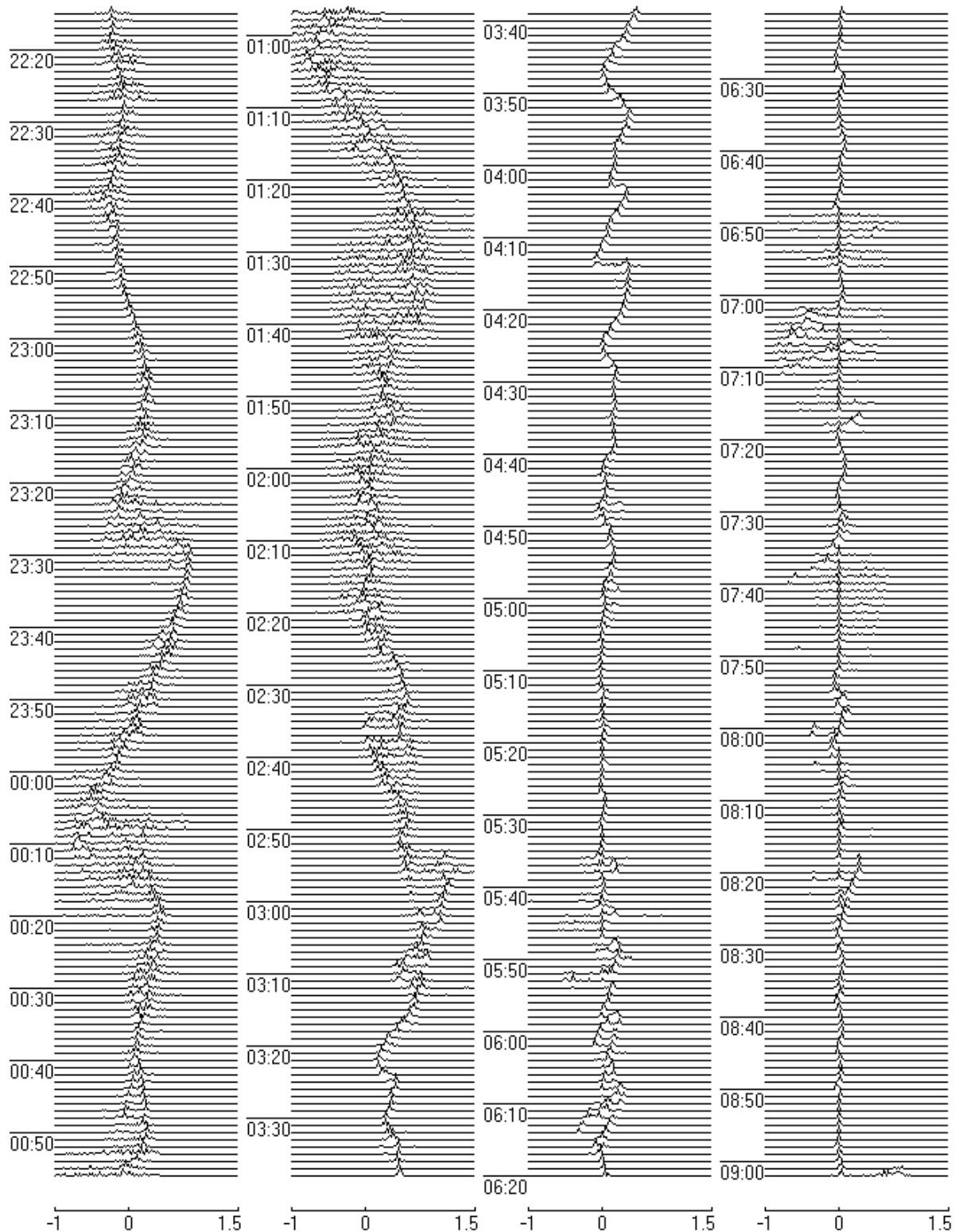


Рис. 7. Пример квазипериодического процесса со значительной амплитудой и переменным периодом в сильно возмущенной ионосфере в ночное и утреннее время осенью (16-17 сентября 1999 г., $f \approx 3.5$ МГц). Протекание утреннего терминатора вызвало уширение ДС, фактически их “рассыпание”

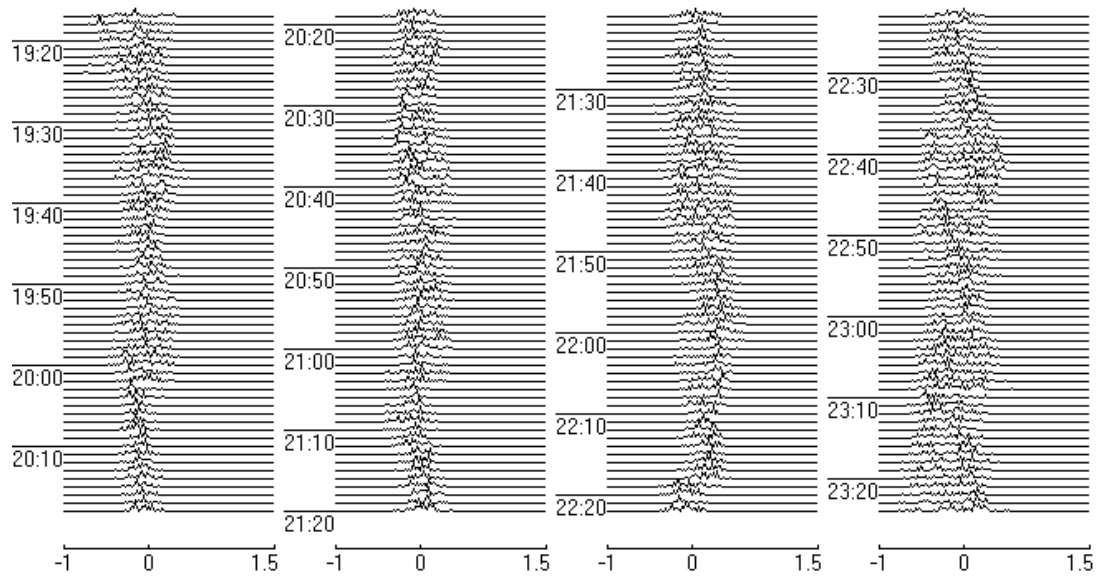


Рис. 8. Иллюстрация сильно возмущенной ночной ионосферы в конце осени, когда все время имело место “рассыпание” ДС (28-29 ноября 1998 г., $f \approx 3.0$ МГц)

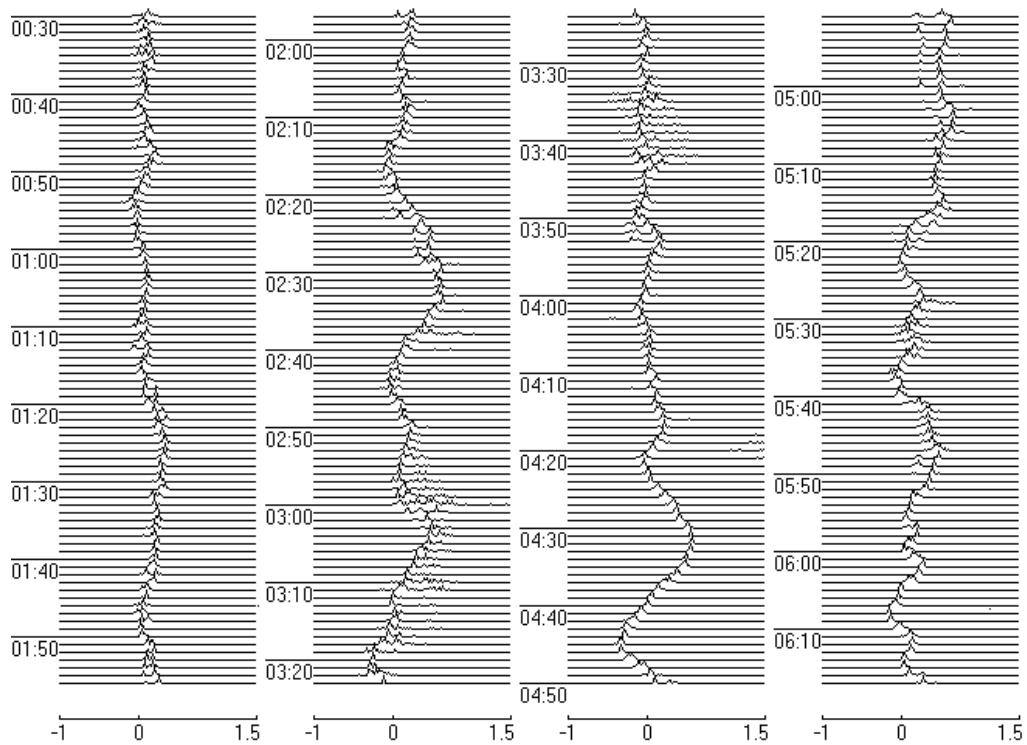


Рис. 9. Пример ярко выраженного квазипериодического процесса в спокойную зимнюю ночь и сильных колебаний f_d , вызванных прохождением утреннего терминатора (18-19 декабря 1999 г., $f \approx 3.5$ МГц)

феры на прохождение терминатора является ее длительность. Она составляет $\sim 50 \pm 10$ мин. В вечернее время реакция начинается в момент захода Солнца на уровне Земли и длится около 50 мин, в утреннее время она начинается примерно за 50 мин до восхода Солнца на уровне Земли и заканчивается с наступлением восхода.

Таблица 1. Виды ДС при прохождении терминатора

Виды спектров	Число случаев	Частота появления, %
Одномодовый	36	31
Двухмодовый	16	14
“Рассыпанный”	44	38
Другие	20	17

Таблица 2. Виды вариаций ДС при прохождении терминатора

Вид вариаций	Число случаев	Частота появления, %
Квазипериодические	24	21
Апериодические	59	51
Гигантские	22	19
Другие	11	9

Обсуждение

Проведенные исследования показали, что средняя ионосфера сравнительно редко бывает невозмущенной (около 30 % времени наблюдений). Обычно ДС подвержены различным вариациям. Эффект “рассыпания” имеет место в течение 35 ÷ 40 %, а квазипериодические процессы наблюдаются

в течение 25 ÷ 30 % всего времени наблюдения.

Свяжем фиксируемые вариации ДС с изменениями электронной концентрации N в средней ионосфере. Для этого получим оценочные соотношения.

Пренебрегая изменениями z_0 и z_r во времени, перепишем выражение (1) в виде

$$f_d \approx -2 \frac{f}{c} \int_{z_0}^{z_r} \frac{\partial n}{\partial t} dz.$$

В доплеровском радаре используются передающая и приемная антенны с линейной поляризацией. На частотах $f \approx 3$ МГц показатель поглощения необыкновенной волны примерно на порядок больше, чем показатель поглощения обыкновенной волны. Поэтому принимаемый сигнал имеет преимущественно О-поляризацию. Выражение для показателя преломления n обыкновенной волны в общем случае достаточно сложное. Оно несколько упрощается, если пренебречь столкновениями между частицами плазмы. Вдали от области отражения ($n \approx 1$) имеет место квазипродольное распространение О-волны, а вблизи этой области – квазипоперечное. В последнем случае, а также в случае пренебрежения геомагнитным полем

$$n^2 \approx 1 - \frac{f_p^2}{f^2},$$

где f_p – плазменная частота. Тогда

$$f_d \approx \frac{f}{c} \int_{z_0}^{z_r} \frac{f_p^2}{f^2} \left(\frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial t} \right) dz. \quad (2)$$

Наши модельные расчеты показали, что до 50 % вклада в доплеровский эффект дает сравнительно узкая область высот (10 ÷ 20 км днем и 30 ÷ 40 км ночью) в окрестности z_r .

С учетом этого из (2) получим оценочную формулу:

$$f_d \approx \frac{f_{pr}^2}{cf} \left(\frac{1}{N_r} \frac{\partial N_r}{\partial t} \right) \int_{z_0}^{z_r} \frac{dz}{n} \approx \frac{f}{c} \left(\frac{1}{N_r} \frac{\partial N_r}{\partial t} \right) \int_{z_0}^{z_r} \frac{dz}{n}, \quad (3)$$

или

$$|f_d| \approx f \frac{L_g}{ct_r}, \quad (4)$$

где $t_r = |N_r \partial t / \partial N_r|$ – характерное время изменения N в окрестности высоты отражения, $N = N_r$, f_{pr} – плазменная частота на этой высоте ($f_{pr} \approx f$), L_g – групповой путь волны в ионосфере (он меньше действующей высоты на величину $z_0 \approx 100$ км). Модельные расчеты показали, что на частоте 3 МГц $L_g \approx 50 \div 300$ км в дневное и ночное время соответственно. Поскольку

$$\left| \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial t} \right| \approx \frac{\Delta N}{N_r t_r},$$

с учетом выражений (3), (4) имеем

$$\frac{\Delta N}{N_r} \approx \frac{|f_d| ct_r}{f L_g}. \quad (5)$$

Апериодические вариации ДС. Полагая $f_d \approx 0.1$ Гц, $t_r \approx 300$ с, из формулы (5) имеем $\Delta N/N_r \approx 1 \div 6$ % для ночного и дневного времени соответственно. В случае гигантских вариаций ДС $\Delta N/N_r \approx 10 \div 60$ %. Поскольку $N_r \approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ($f_{pr} \approx 3$ МГц), то $\Delta N \sim 10^9 \div 6 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$.

Дневные и ночные вариации обычно достаточно медленные. Им соответствует время $t_r \approx 3 \div 8$ ч. При этом f_p изменяется со скоростью $0.2 \div 0.5$ МГц/ч, чему соответствует

$f_d \approx 0.03 \div 0.1$ Гц. Такие значения наблюдаются на опыте.

В утреннее и вечернее время $|df_p/dt| \approx 1 \div 1.5$ МГц/ч, $t_r \approx 1 \div 1.5$ ч. При этом $|f_d| \approx 0.3 \div 0.5$ Гц, что также фиксируется в измерениях.

Летом около 3:00÷4:00 наблюдаются локальные послевосходные минимумы N , а около 20:00÷21:00 – предзаходные максимумы N . Им соответствует $|df_p/dt| \approx 0.4 \div 0.8$ МГц/ч, $t_r \approx (1.4 \div 2.7) \cdot 10^3$ с и $|f_d| \approx 0.3 \div 0.7$ Гц. Такие значения $|f_d|$ действительно имели место.

Квазипериодические вариации ДС. В этом случае амплитудное значение производной

$$\left| \frac{\partial N_r}{\partial t} \right| = \frac{2\pi}{T} \Delta N_{r0},$$

где ΔN_{r0} амплитуда квазипериодических вариаций N_r . Тогда, как следует из выражения (3),

$$f_{da} \approx 2\pi f \frac{L_g}{cT} \frac{\Delta N_{r0}}{N_r}.$$

Полагая $f_{da} \approx 0.1$ Гц, $T = 600$ с и $L_g \approx 100$ км, получим $\Delta N_{r0}/N_r \approx 1$ %. При гигантских вариациях $f_d \approx 1$ Гц и $\Delta N_{r0}/N_r \approx 10$ %. Замечая, что при распространении ПИВ характерным высотным масштабом является не L_g , а $2H_r/\bar{n}$, где H_r – приведенная высота атмосферы в окрестности высоты z_r , $\bar{n} \approx 0.5$ – среднее по высоте значение n . Дело в том, что амплитуда ПИВ с увеличением высоты, как известно, растет по экспоненциальному закону с масштабом $2H_r$ (см., например, [3, 11]). Для $f \approx 3$ МГц параметр $2H_r/\bar{n} \approx 40 \div 80$ км для дневного и ночного времени соответственно. При этом для обычных и гигантских вариаций ДС $\Delta N_{r0}/N_r \leq 2.5 \div 25$ % (днем) или в 2 раза меньше (ночью).

Эффект “рассыпания” ДС. Предположим, что в ионосфере возникла случайно-неоднородная структура с характерным масштабом l , дисперсией $\sigma^2 = \langle \Delta N^2 \rangle$, относительной дисперсией $\tilde{\sigma}^2 = \langle \Delta N^2 / N^2 \rangle$. Это приведет к флуктуациям доплеровской частоты

$$\Delta f_d \approx \frac{f}{c} \int_{z_0}^{z_r} \left(\frac{1}{N_r} \frac{\partial}{\partial t} \Delta N_r \right) \frac{dz}{n},$$

где $\langle \Delta f_d \rangle = 0$. Тогда дисперсия этих флуктуаций

$$\sigma_f^2 \approx \left(\frac{f}{c} \right)^2 \left\langle \left(\int_{z_0}^{z_r} \frac{1}{N} \frac{\partial}{\partial t} \Delta N_r \frac{dz}{n} \right)^2 \right\rangle = \left(\frac{f}{c} \right)^2 \times$$

$$\times \left\langle \int_{z_0}^{z_r} \frac{dz}{n(z)} \int_{z_0}^{z_r} \frac{1}{N_r(z)N_r(z')} \frac{\partial}{\partial t} \Delta N_r(z) \frac{\partial}{\partial t} \Delta N_r(z') \frac{dz'}{n(z')} \right\rangle.$$

Полагая для оценок, что $|\partial \Delta N_r / \partial t| \approx \Delta N_r / t_{\Delta N}$, получим

$$\sigma_f^2 \approx \left(\frac{f}{ct_{\Delta N}} \right)^2 \int_{z_0}^{z_r} dz \int_{z_0}^{z_r} \left\langle \frac{\Delta N_r(z) \Delta N_r(z')}{N_r(z)N_r(z')} \right\rangle \frac{dz'}{n(z)n(z')}.$$

При этом учтено, что флуктуации малы, т. е. $|\Delta N_r| \ll N_r$, и $n(z)$ может рассматриваться как регулярная функция. Здесь $t_{\Delta N}$ – характерное время становления (релаксации) неоднородной структуры. Считая далее, что толщина слоя с неоднородностями $L \gg l$, получим, что внутренний интеграл приближенно равен $\tilde{\sigma}^2 l / n^2$ (черта сверху означает усреднение по толщине слоя L). Тогда

$$\sigma_f^2 \approx \left(\frac{f}{ct_{\Delta N}} \right)^2 \frac{Ll}{n^2} \tilde{\sigma}^2.$$

Отсюда

$$\sigma_f \approx f \frac{\sqrt{L'l}}{ct_{\Delta N}} \tilde{\sigma}, \quad (6)$$

где $L' = L/n^2$.

Для практического использования формулы (6) необходимо знать величину времени релаксации $t_{\Delta N}$. Ее можно оценить, если задаться механизмом становления (релаксации) неоднородностей N . Например, при диффузионном расплывании

$$t_{\Delta N} \approx \frac{l^2}{D}, \quad (7)$$

где $D = 2kT_i / M_i \nu_{in}$ – компонента тензора амбиполярной диффузии вдоль геомагнитного поля. (Величина поперечной компоненты значительно меньше величины D). Здесь k – постоянная Больцмана, T_i – температура ионов, M_i – масса ионов, ν_{in} – частота соударений ионов с нейтралами. Из выражений (6), (7) получаем

$$\sigma_f \approx f \frac{D\sqrt{L'l}}{cl^2} \tilde{\sigma}. \quad (8)$$

Видно, что $\sigma_f \sim l^{-3/2}$. Поэтому из всего многомасштабного спектра ионосферной турбулентности наибольший вклад в флуктуации доплеровской частоты вносят мелкомасштабные случайные неоднородности. Сказанное, разумеется, справедливо в случае, если спектральная плотность $\Phi(l)$ неоднородной структуры слабо зависит от l . В противном случае требуется более последовательный учет многомасштабной неоднородной структуры N (интегрирование с “весом”, пропорциональным $\Phi(l)$).

Выполним оценки по формуле (8). В дневное время $\overline{n^2} \approx 1/4$, $L \approx 50$ км, $L' \approx 200$ км, $D \approx 3 \cdot 10^3$ м²/с. Тогда наблюдаемым в экспериментах $\sigma_f \approx 1$ Гц соответствует $l \approx 60$ м при

$\tilde{\sigma} \approx 3 \cdot 10^{-2}$. В ночное время $L \approx 150$ км, $L' \approx 600$ км, $D \approx 10^5$ м²/с, а $l \approx 800$ м.

Во избежание недоразумений сделаем одно разъяснение. Для вычисления доплеровского смещения частоты требуется интегрирование вдоль траектории луча или при обоснованных упрощениях – по высоте (см. формулу (1)). Это предполагает, что при вычислении величины фазового эффекта (к которому относится и эффект Доплера) справедливо лучевое приближение. Для его применения необходимо, чтобы $l \gg \lambda$ и $l \gg \sqrt{\lambda z}$, где λ – длина радиоволны, z – высота неоднородности. В нашем случае $\lambda \approx 100$ м, $l \approx 60 \div 80$ м, $\sqrt{\lambda z} \approx 3 \div 5$ км, т. е. требуемые неравенства не выполняются. При строгих расчетах необходим учет дифракционных эффектов, который, однако, при вычислении среднеквадратического отклонения фазы σ_ϕ приводит к множителю порядка единицы [13]. Например, для гауссовой корреляционной функции флуктуаций диэлектрической проницаемости в лучевой теории σ_ϕ завышено в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со строгим расчетом σ_ϕ в зоне дифракции Фраунгофера. Поскольку полученная нами формула (6) является оценочной, то учитывать в ней множитель $\sqrt{2}$ не имеет смысла.

Таким образом, приведенные выше оценочные соотношения позволяют пересчитать вариации ДС в вариации параметров ионосферы и дают возможность исследователю при морфологическом анализе вариаций доплеровских спектров сразу судить об изменениях параметров среды. Выполненные оценки согласуются с имеющимися в литературе (см., например, [3, 11, 12]) и представляются реальными.

Выводы

1. При помощи доплеровского радара на частотах 2.8 ÷ 3.5 МГц выполнены наблюдения за процессами в средней ионосфере в 1995-2000 гг. На большом (около 5000 ч наблюдений) статистическом материале установлено, что вариации ДС отличаются значительным разнообразием, что отражает многообразие нестационарных процессов в ионосфере,

вызванных воздействием на эту подсистему как “сверху”, так и “снизу”. Предложено две классификации ДС – по количеству мод и вариациям средней частоты в спектре. Согласно первой классификации спектры бывают одномодовыми, многомодовыми (часто двух-, реже трех- и четырехмодовыми) и “рассыпанными”. Согласно второй классификации вариации ДС бывают незначительными, аperiodическими, квазипериодическими и гигантскими.

2. В невозмущенные периоды (около 30 % всего времени наблюдения) в середине дня (10:00 ÷ 14:00) и середине ночи (22:00 ÷ 02:00) ДС изменяется слабо (f_d менее 0.1 Гц) и, как правило, остаются одномодовыми. В возмущенные периоды (около 70 % всего времени наблюдения) ДС, чаще всего, уширяются, их средняя частота изменяется на 0.5 ÷ 1 Гц. Особенно сильные вариации N (20 ÷ 25 % всего времени наблюдения) в среде приводят к изменению f_d на 1 ÷ 2 Гц.

3. При прохождении терминатора наблюдается реакция ионосферы на этот источник возмущений длительностью 50 ± 10 мин. Она начинается за ~50 мин до восхода Солнца на уровне Земли или же в момент захода Солнца на том же уровне. Вариации ДС при прохождении терминатора отличаются большим разнообразием, встречаются все виды перечисленных выше спектров. Реакция средней ионосферы сопровождается как аperiodическими, так и квазипериодическими процессами. Иногда терминатор “подавляет” существовавшие до его прохождения квазипериодические колебания.

4. Практически в течение всего года через 1 ÷ 2 ч после восхода Солнца наблюдаются кратковременный (~1 ч) минимум f_d (отрицательное смещение 0.3 ÷ 0.7 Гц), а затем постепенное увеличение f_d примерно на 0.1 Гц.

С мая по сентябрь перед заходом Солнца на уровне Земли имеет место локальный максимум $f_d \approx 0.3 \div 0.7$ Гц продолжительностью 1 ÷ 2 ч.

5. В утреннее (4 ÷ 10 ч) и вечернее (14 ÷ 20 ч) время f_d изменяется на 0.3 ÷ 0.5 Гц.

6. Периоды ПИВ при прохождении в ионосфере обычно составляют 10 ÷ 40 мин, $\Delta N_{r0}/N_r \approx 1 \div 3$ %. Иногда $\Delta N_{r0}/N_r$ достигает

ет $10 \div 30$ %. Квазипериодические процессы фиксировались в течение $25 \div 30$ % всего времени наблюдения.

7. Эффект “рассыпания” ДС отмечался в течение $35 \div 40$ % всего времени измерений. Он обусловлен рассеянием зондирующих сигналов на флуктуациях электронной концентрации с $\Delta N/N \sim 1$ % и/или их отражением от случайно-возмущенной области поворота радиолучей.

В работе использованы регистрации из банка данных, созданного в ходе исследований при поддержке УНТЦ (проектное соглашение №471).

Авторы благодарны В. А. Подносу, С. Г. Чулакову и С. Н. Шаптале за помощь в организации и проведении экспериментов, а Ю. Б. Милованову – за участие в обработке результатов.

Литература

1. С. А. Намазов, В. Д. Новиков, И. А. Хмельницкий. Изв. вузов. Радиофизика. 1975, **18**, №4, с. 473-500.
2. Ю. Е. Тарашук, П. М. Нагорский, Б. Б. Борисов, Н. Е. Егоров, В. В. Жибсаин, В. Ф. Киселев, Е. И. Петрушин, Н. И. Тимченко, Б. Б. Цыбиков. Нестационарные процессы в ионосфере Земли и их влияние на распространение коротких радиоволн. Томск, изд-во Томского университета, 1986, 164 с.
3. K. Davies. Ionospheric Radio. London, Peter Peregrinus Ltd., 1990, XX, 580 pp.
4. В. В. Адушкин, К. И. Горелый. ДАН. Россия, 2000, **373**, №1, с. 87-89.
5. В. П. Урядов, А. М. Леонов, А. А. Понятов, Г. Н. Бойко, С. П. Терентьев. Изв. вузов. Радиофизика. 2000, **43**, №8, с. 682-686.
6. L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal. Radio Phys. and Radio Astron. 1998, **3**, №2, с. 181-190.
7. К. П. Гармаш, Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. Геомагнетизм и аэронавигация. 1999, **39**, №1, с. 72-78.
8. L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko. VIIth International Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Proceedings. Kharkov, Ukraine. 2000, v. 2, pp. 652-654.
9. К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1999, №7, с. 3-5, №8, с. 3-19.
10. В. Ф. Пушин, Л. С. Костров. Вісник Харківського університету. Радіофізика та електроніка. 1999, №427, с. 23-28.
11. Б. Н. Гершман. Динамика ионосферной плазмы. Москва, Наука, 1974, 256 с.
12. М. Г. Гельберг. Неоднородности высокоширотной ионосферы. Новосибирск, Наука, 1986, 194 с.
13. С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Москва, Наука, 1978, 464 с.

HF Doppler Radar Observations of the Bottomside Ionosphere Perturbed by Natural Disturbances

L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko,
L. F. Chernogor

High-frequency radar observations of processes occurring in the bottomside ionosphere ($100 \div 300$ km) were performed at $2.8 \div 3.5$ MHz during 1995-2000. The observed Doppler spectrum variations display a great variety of forms, and the classification schemes of the spectra and of the variations in the mean spectrum frequency are given. The rate of appearance of these forms has been estimated, and characteristic diurnal and seasonal Doppler spectrum variations have been described. Approximate relations have been derived between the Doppler spectrum shape and ionospheric parameters. The measurements have been used to estimate the characteristic time scales of evolution of regular and irregular ionospheric structures (electron number densities and their irregularities) under quiet and disturbed conditions. These estimates and reports of known similar measurements are substantially in agreement and complement each other.