

ДОПЛЕРОВСКОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ КАК СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

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

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков

При помощи доплеровского радара (2.8–3.5 МГц) в 1995–2002 гг. выполнены наблюдения за процессами в средней ионосфере (100–300 км), вызванными вариациями состояния космической погоды. 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 получены оценки параметров среды.

1. Введение

Ионосфера как подсистема входит в систему Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера–межпланетная среда–Солнце. “Снизу” и ”сверху” в нее поступают потоки вещества, энергии и излучений различной природы. Не исключается и информационное (а не энергетическое) воздействие на ионосферу со стороны других подсистем. В результате этих воздействий в ионосфере возникают нестационарные процессы, обусловленные вариациями состояния космической погоды, с характерными временами от секунд до 11 лет и более. Целью работы является иллюстрация возможностей доплеровского зондирования ионосферы для мониторинга состояния космической погоды.

2. Методика исследования

Для наблюдения нестационарных явлений в средней ионосфере удобным оказывается метод доплеровского радиозондирования на вертикальных трассах [1–6]. Доплеровский радар описан в работах [2–4]. Регистрация огибающей биений производилась на магнитную ленту с частотой опроса 10 Гц. Спектральное оценивание осуществлялось ежеминутно по 512 отсчётам на интервале времени $\delta t_1 \approx 51.2$ с.

Измерения продолжительностью более 6000 час выполнены с 1995 по 2002 г. Наблюдения проводились в течение суток, в окрестности утреннего и вечернего терминаторов, а также в разные сезоны. При использовании двух близких частот ($f \approx 2.8$ – 3 МГц) можно говорить лишь о процессах ниже области отражения радиоволн (около 130–150 км днем и 200–250 км ночью). Высотное разрешение определяется либо приведенной высотой нейтральной атмосферы (около 10–20 км), либо характерным масштабом $L_N = \left| N(\partial z / \partial N) \right| \approx 15$ – 20 км (N — концентрация электронов).

Доплеровская частота f_d связана с показателем преломления плазмы n [1]:

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

где t — время, z_r — высота отражения сигнала, z_0 — высота начала ионосферы, c — скорость света в вакууме.

3. Результаты наблюдений

Доплеровские спектры будем классифицировать по их “ширине” и вариациям средней частоты в спектре. Согласно первой классификации спектры будем именовать одномодовыми, двухмодовыми (редко трех- или четырехмодовыми) и “рассыпанными”.

1. *Одномодовый ДС*. При этом спектр имеет четко выраженный максимум энергии, смещение и ширина спектра не превышают 0.1 Гц. Такие ДС обычно наблюдаются в середине дня или ночи в отсутствии возмущений. Пример обсуждаемых ДС приведен на рис. 1 (9:10–10:30 UT, здесь и далее в работе используется мировое время UT).
2. *Двухмодовый* (редко трех - или четырехмодовый) *ДС*. Он возникает при двухлучевом (трех- или четырехлучевом) сигнале. “Расстояние” между модами в ДС от 0.1–0.2 до 1–1.5 Гц (см. рис. 1, 17:40–18:35, 21:53–22:33).
3. *“Рассыпанный” ДС*. Он является противоположностью одномодового спектра. Отраженный сигнал отличается сильной многолучевостью, которая вызвана отражением радиоволны от сильно диффузной поверхности и ее рассеянием на случайных неоднородностях ионосферы. Отсутствует какой-либо максимум в распределении энергии по частотному спектру. Ширина ДС достигает значений 1–1.5 Гц (рис. 1, 2:00–2:30). “Рассыпание” спектров возникает также при наличии сильных помех (рис. 1, 10:30–10:55). В этом случае оно обычно не связано с процессами в ионосфере (исключение составляет случай сильного поглощения зондирующих сигналов).

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

1. *Незначительные вариации ДС*. Чаще всего такие спектры наблюдаются в середине дня или ночи в спокойные дни (рис. 1, 9:10–10:30). Обычно вариации доплеровской частоты Δf_d , соответствующей середине спектра, не превышают 0.1 Гц.
2. *Квазипериодические вариации ДС* (рис. 1, 12:40–13:15). Такие вариации вызваны отражением зондирующего радиосигнала от квазипериодических неоднородностей электронной концентрации, возникающих при распространении в ионосфере волн плотности. Доплеровским методом чаще всего регистрируются волновые процессы с периодом $T \approx 5–40$ мин. Амплитуда колебаний f_{da} обычно составляет 0.1–0.3 Гц, но иногда достигает 1 Гц.
3. *Аperiodические вариации ДС*. Они вызываются переходными процессами в ионосфере. Примеры таких вариаций также показаны на рис. 1 (23:10–23:25, 03:00–03:50). Аperiodические процессы в среде обусловлены неповторяющи-

мися 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* (рис. 1, 15:00–16:30, 21:55–22:10). Причина их возникновения такая же, как и у аperiodических вариаций. Отличие заключается в энергетике возмущающих среду источников. Сравнительно редко встречаются гигантские квазипериодические вариации (рис. 1, 20:10–21:00, 00:40–02:00). В обоих случаях величина $f_d \approx 1$ Гц.

Рассмотренные виды ДС и их вариаций — несколько идеализированные. Часто наблюдается их комбинация. Комбинированные вариации спектров возникают примерно в течение 60 % от времени наблюдения за процессами в ионосфере.

- *Дневные вариации ДС*. В невозмущенные дни обычно спектры одномодовые, смещение ДС во времени практически отсутствует. Пример таких спектров показан на рис. 1. В возмущенные дни имеют место значительные вариации как самих ДС, так и центральной части f_{d0} , соответствующей максимуму энергии в ДС (рис. 2). Величина изменений f_{d0} превышала 1 Гц. Значительные вариации f_{d0} вызваны прохождением в ионосфере перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Такие ПИВ генерируются и распространяются, например, при магнитных бурях. В данном случае период T этих возмущений около 10 мин. В целом мы наблюдали процессы с $T \approx 10$ –100 мин.
- *Ночные вариации ДС*. На рис. 3 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 с амплитудой до 0.8 Гц и T от 10 до 40 мин. Прохождение утреннего терминатора (01:25–02:00) вызвало уширение ДС до 0.6–1 Гц, фактически их “рассыпание”. После 04:30 ионосфера стала относительно спокойной.

Рис. 4 относится к наблюдениям в зимнюю ночь (18–19 декабря 1999 г.). Примерно до 02:10 ионосфера оставалась спокойной, затем наблюдался ярко выраженный процесс с $T \approx 15$ мин и амплитудой 0.2–0.3 Гц. С 03:20 до 04:10 среда опять оставалась спокойной, после 04:10 в течение 40 мин фиксировались колебания f_d с амплитудой 0.5–0.6 Гц и $T \approx 25$ мин, вызванные прохождением утреннего терминатора. После этого также отмечались квазипериодические процессы, но значительно меньшей амплитуды и с $T \approx 5$ –15 мин.

- *Утренние вариации ДС*. В спокойные дни наибольшие вариации ДС имеют место через 2–3 ч после прохождения утреннего терминатора, когда характерное время увеличения электронной концентрации в окрестности области отражения $t_r = |N \partial t / \partial N|$ уменьшается до 600 с, а f_d увеличивается на 0.5–0.6 Гц. Наибольший эффект наблюдается в октябре – январе. В мае – июле эта величина не превышает 0.1 Гц. Утренний рост f_d продолжается от 2 ч (летом) до 5 ч (зимой).

Ему предшествует уменьшение f_d на 0.05–0.10 Гц, наступающее через 1–2 ч после прохождения утреннего терминатора.

- *Вечерние вариации ДС.* Максимальные значения $N(t)$ достигаются в окрестности времени $t_0 \approx 12$ ч. При этом $f_d \approx 0$ в течение 2–3 ч в зимнее время и 4–6 ч в летнее время. После этого $N(t)$ начинает уменьшаться с характерным временем около 1 ч. Это приводит к отрицательному смещению $f_d(t)$ на 0.2–0.3 Гц в зимнее время. С мая по сентябрь наблюдается локальный максимум N в вечернее время. Поэтому на фоне медленного уменьшения $f_d(t)$ отмечается локальное ее увеличение продолжительностью около 1–2 ч. При этом $\Delta f_d \leq 0.1$ Гц. Сказанное выше относится к спокойным условиям.
- *Вариации ДС при прохождении терминатора.* Проанализировано 156 событий, из них 77 случаев, соответствующих утреннему терминатору. Поскольку движение границы области тень – свет происходит на фоне других процессов, то вариации ДС отличаются большим разнообразием (см. рис. 1). Имеют место все перечисленные выше виды ДС (табл. 1) и их вариаций (табл. 2). В вечернее время реакция начинается в момент захода Солнца на уровне Земли и длится не менее 50 мин, в утреннее время она начинается примерно за 50 мин до восхода Солнца на уровне Земли и заканчивается с наступлением этого момента. Наблюдалось увеличение (уменьшение) значения постоянной составляющей f_d в утреннее (вечернее) время суток в среднем на 0.28 ± 0.02 Гц, а также генерация квазипериодических возмущений с $T \approx 15.1 \pm 1.1$ мин и средней амплитудой колебаний центральной частоты в ДС 0.29 ± 0.03 Гц, длительность реакции составляет 1–2 час.

4. Обсуждение

Проведенные исследования показали, что средняя ионосфера чутко реагирует на вариации состояния космической погоды. Она сравнительно редко бывает невозмущенной (около 30 % времени наблюдений). Эффект “рассыпания” имеет место в 35–40 %, а квазипериодические процессы наблюдаются в 25–30 % от всего времени наблюдения.

Свяжем далее фиксируемые вариации ДС с изменениями электронной концентрации N в средней ионосфере. Для этого из (1) получим оценочные соотношения. При $n^2 \approx 1 - f_p^2/f^2$, где f_p — плазменная частота, имеем

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

Модельные расчеты показали, что до 50 % вклада в f_d дает сравнительно узкая область высот (10–20 км) в окрестности z_r . С учетом этого из (2) получим оценочную формулу: $|f_d| \approx f L_g / ct_r$, где $N_r = N(z_r)$, L_g — групповой путь волны в ионосфере. Отсюда

$$\frac{\Delta N}{N_r} \approx \frac{|f_d| ct_r}{f L_g}. \quad (3)$$

- *Апериодические вариации ДС.* Полагая $f_d \approx 0.1$ Гц, $t_r \approx 300$ с, из формулы (3) имеем $\Delta N / N_r \approx 1-3$ % для ночного и дневного времени соответственно. В случае гигантских вариаций ДС $\Delta N / N_r \approx 10-30$ %. Поскольку $N_r \approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ($f_p \approx 3$ МГц), то $\Delta N \approx 10^9-3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Дневные и ночные вариации обычно достаточно медленные. Им соответствует время $t_r \approx 3-8$ ч. При этом f_p изменяется со скоростью $0.2-0.5$ МГц/ч, чему соответствует $f_d \approx 0.03-0.1$ Гц. Такие значения наблюдаются в опытах. В утреннее и вечернее время $|df_p / dt| \approx 1-1.5$ МГц/ч, $t_r \approx 1-1.5$ ч. При этом $|f_d| \approx 0.3-0.5$ Гц, что также фиксируется в измерениях. Летом около 3-4 ч наблюдаются локальные послевосходные минимумы N , а около 20-21 ч — послезаходные максимумы N . Им соответствует $|df_p / dt| \approx 0.4-0.8$ МГц/ч, $t_r \approx (1.4-2.7) \cdot 10^3$ с и $|f_d| \approx 0.3-0.7$ Гц. Такие значения $|f_d|$ действительно имели место в опытах.
- *Квазипериодические вариации ДС.* В этом случае амплитудное значение производной $|\partial N_r / \partial t| = (2\pi/T)\Delta N_{r0}$, где ΔN_{r0} — амплитуда квазипериодических вариаций N_r . Тогда, с учётом выражения (3) $f_{da} \approx 2\pi f(L_g/ct)(\Delta N_{r0} / N_r)$. 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, а $\Delta N_{r0} / N_r \leq 2.5-25$ % (днем) или в 2 раза меньше (ночью) [7].
- *Эффект “рассыпания” ДС.* Для случайно-неоднородной структуры с характерным масштабом l , дисперсией $\sigma^2 = \langle \Delta N^2 \rangle$ и $\tilde{\sigma}^2 = \langle \Delta N^2 / N^2 \rangle$ имеем для дисперсии флуктуаций f_d

$$\sigma_f^2 \approx \left(\frac{f}{ct_{\Delta N}} \right)^2 \frac{Ll}{n^2} \tilde{\sigma}^2 = \left(f \frac{\sqrt{Ll}}{ct_{\Delta N}} \tilde{\sigma} \right)^2. \quad (4)$$

Здесь L — толщина слоя с неоднородностями, $L' = L / n^2$, $t_{\Delta N}$ — время становления ΔN . При среднем по высоте значении $\bar{n}^2 \approx 1/2$, $L \approx 150$ км, $L' \approx 30$ км, $t_{\Delta N} \approx 10^2-10^4$ с наблюдаемым в экспериментах $\sigma_f \approx 1$ Гц соответствует $l \approx 100$ м и $\tilde{\sigma} \approx 10^{-1}$.

5. Выводы

1. При помощи доплеровского радара выполнены наблюдения за процессами в средней ионосфере в 1995–2002 гг., отражающими изменения состояния космической погоды. Установлено, что вариации ДС отличаются большим разнообразием.
2. В невозмущенные периоды (около 30 % всего времени) в середине дня (10–14 ч) и середине ночи (22–02 ч) ДС изменяются слабо (f_d менее 0.1 Гц) и, как правило, остаются одномодовыми. В возмущенные периоды (около 70 % всего времени) ДС чаще всего уширяются, их средняя частота изменяется на 0.5–

1 Гц. Особенно сильные вариации (15 % всего времени) в среде приводят к изменению f_d на 1–2 Гц.

3. При прохождении терминатора реакция ионосферы начинается примерно за 50 мин до восхода Солнца на уровне Земли или же в момент захода Солнца на том же уровне. Реакция средней ионосферы сопровождается как аperiodическими, так и квазипериодическими процессами. Иногда терминатор “подавляет” имевшие место до его прохождения квазипериодические колебания. Статистический анализ 156 случаев прохождения солнечного терминатора показал, что заметная реакция на него регистрировалась во всех случаях. При этом наблюдались увеличение (уменьшение) значения постоянной составляющей доплеровского смещения частоты в утреннее (вечернее) время суток в среднем на 0.27 ± 0.02 Гц продолжительностью 1–2 ч, а также генерация квазипериодических возмущений в ионосфере со средним периодом $T \approx 15.2 \pm 1.1$ мин и средней амплитудой колебаний центральной частоты в ДС 0.28 ± 0.03 Гц.
4. Практически в течение всего года через 1–2 ч после восхода Солнца наблюдается локальное уменьшение f_d , а затем в течение 1–2 ч локальное увеличение f_d на 0.3–0.7 Гц.
5. С мая по сентябрь перед заходом Солнца на уровне Земли имеет место сначала рост f_d , а затем ее падение на такую же величину (0.3–0.7 Гц) продолжительностью 1–2 ч.
6. В утреннее (4–10 ч) и вечернее (14–20 ч) время f_d изменяется на 0.3–0.5 Гц.
7. Периоды ПИВ обычно составляют 10–40 мин, причём $\Delta N_{r0} / N_r \approx 1-3$ %. Иногда $\Delta N_{r0} / N_r$ достигает 10–30 %. Квазипериодические процессы фиксировались в 25–30 % от всего времени наблюдения.
8. Эффект “рассыпания” ДС отмечался в 35–40 % от всего времени измерений. Он обусловлен рассеянием зондирующих сигналов.

Работа выполнена при поддержке Научно-Технологического Центра в Украине, проектное соглашения № 1772.

1. Davies K. *Ionospheric Radio*. Peter Peregrinus Ltd., London, 1990, XX, 580 pp.
2. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., et al. Perturbations in the ionosphere following U. S. powerful space vehicle launching//*Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 3, 1998, no. 2, с. 181–190.
3. Гармаш К. П., Костров Л. С., Розуменко В. Т. и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури//*Геомагнетизм и аэронаука*, т. 39, 1999, № 1, с. 72–78.
4. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высоко энергичными источниками. Часть 2//*Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*, 1999, №7, с. 3–5, № 8, с. 3–19.
5. Chernogor L. F., Kostrov L. S., Rozumenko V. T. HF Doppler probing the disturbances originating in the ionosphere from natural and anthropogenic sources. *VIIth International Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*. Proceedings. Kharkov, Ukraine, vol. 2, 2000, pp. 652–654.
6. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы//*Радиофизика и радиоастрономия*, т. 4., 1999, № 3, с. 209–226.

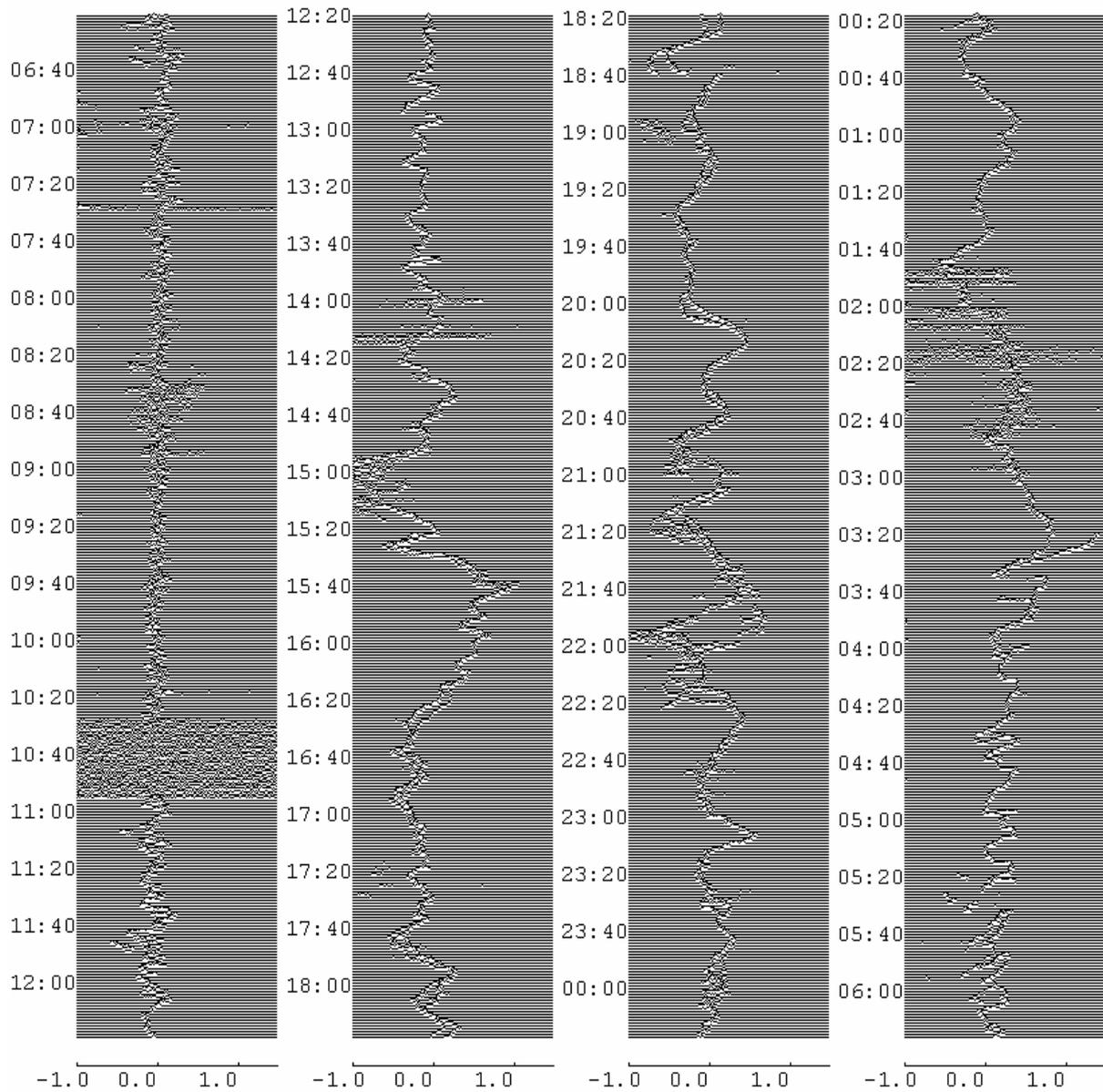


Рис. 1. Пример суточных наблюдений за вариациями доплеровских спектров, полученных 19–20 октября 1998 г. ($f \approx 3.0$ МГц)

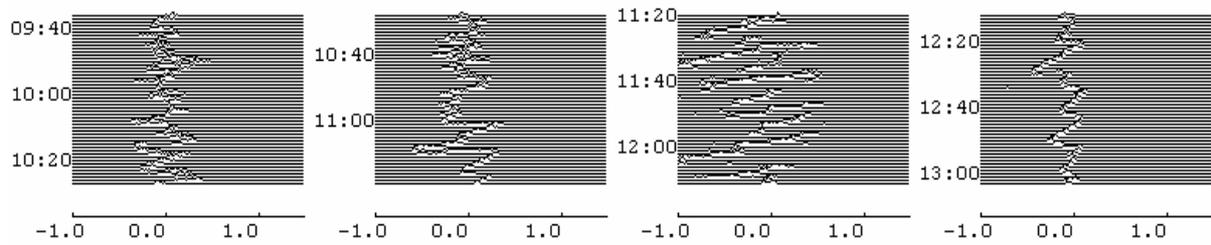


Рис. 2. Пример характерных для возмущенных дней зимой значительных вариаций, как самих доплеровских спектров, так и центральной части f_{d0} , соответствующей максимуму энергии в доплеровских спектрах, полученных 15 января 1999 г. ($f \approx 3.0$ МГц)

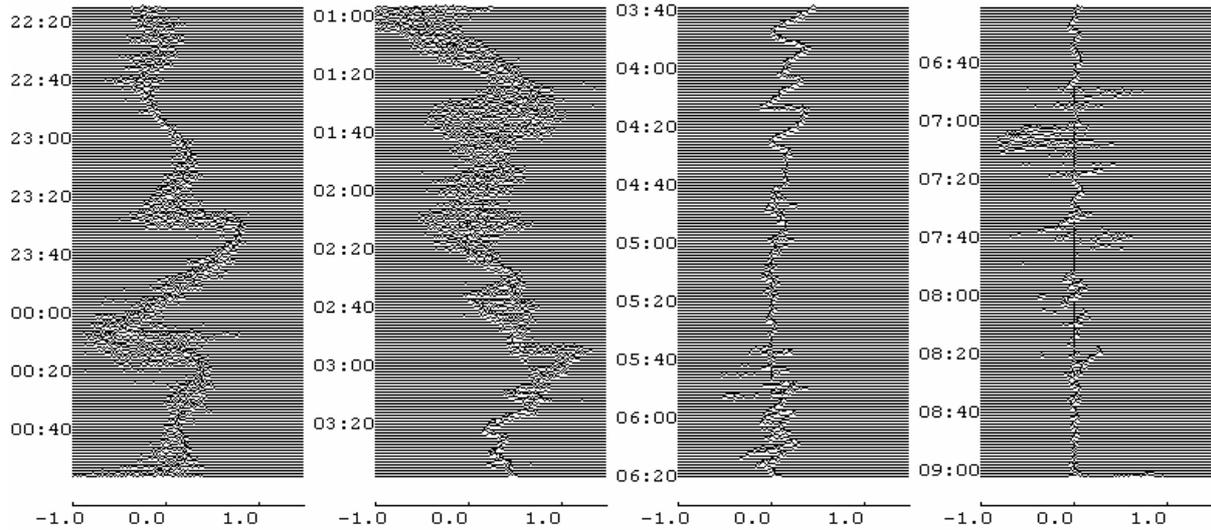


Рис. 3. Пример квазипериодического процесса со значительной амплитудой и переменным периодом в сильно возмущенной ионосфере в ночное и утреннее время осенью 16–17 сентября 1999 г. Прохождение утреннего терминатора вызвало уширение доплеровских спектров, фактически их “рассыпание” ($f \approx 3.5$ МГц)

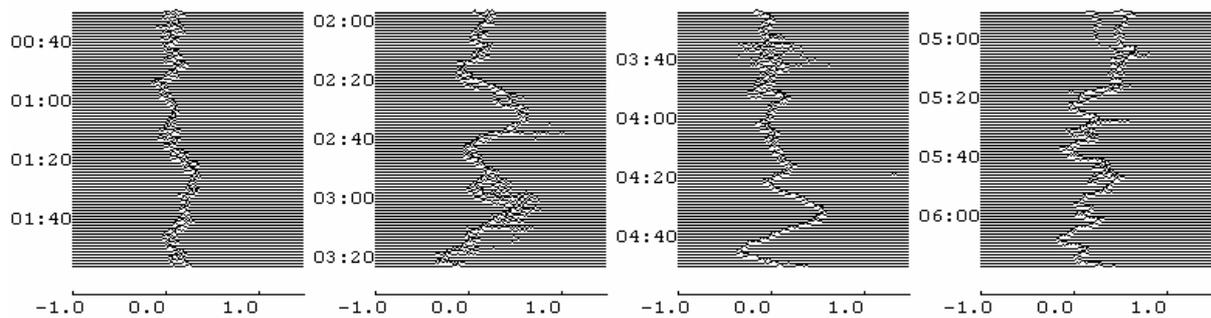


Рис. 4. Пример ярко выраженного квазипериодического процесса в спокойную зимнюю ночь и сильных колебаний f_d , вызванных прохождением утреннего терминатора 18–19 декабря 1999 г. ($f \approx 3.5$ МГц)

Таблица 1. Виды доплеровских спектров при прохождении терминатора

Виды спектров	Число случаев	Частота появления, %
Одномодовый	47	30
Двухмодовый	28	18
“Рассыпанный”	56	36
Другие	25	16

Таблица 2. Виды вариаций доплеровских спектров при прохождении терминатора

Вид вариаций	Число случаев	Частота появления, %
Квазипериодические	34	22
Апериодические	83	53
Гигантские	23	15
Другие	16	10