

Статистические характеристики доплеровских спектров радиосигналов, отраженных от естественно-возмущенной ионосферы

С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 7 мая 2009 г.

Приведены результаты статистического анализа временных вариаций доплеровских спектров (ДС) радиосигналов на вертикальных трассах. Для зондирования ионосферы использовался доплеровский радар ВЧ диапазона. Анализ ДС проведен для дня солнечного затмения 1 августа 2008 г. и фоновых дней. Оценены статистические характеристики ДС и параметров турбулентной ионосферы. Показано, что затмение вызвало значительные возмущения в ионосфере.

Введение

Метод доплеровского зондирования (ДЗ) относится к эффективным высокочувствительным методам исследования нестационарных процессов в ионосфере [1]. Временное разрешение метода достигает $10 \div 60$ с. Высотное разрешение зависит от количества рабочих частот зондирующего сигнала и может составлять $10 \div 75$ км.

Метод ДЗ успешно применялся для исследования естественно-возмущенной ионосферы, а также ионосферы, возмущенной антропогенными источниками (см., например, [2-12]). При помощи этого метода установлено, что средняя ионосфера (высота $z \approx 100 \div 300$ км) редко бывает спокойной. В ней, как правило, присутствуют волновые возмущения (ВВ) с периодами $T \approx 5 \div 60$ мин [4]. Часто наблюдается диффузный характер (эффект “рассыпания”) доплеровских спектров (ДС) [4]. Обычно этот эффект вызывается рассеянием зондирующей радиоволны случайными неоднородностями ионосферы. До настоящего времени диффузные ДС детально не анализиро-

вались. В то же время они несут информацию об ионосферной турбулентности.

Целью настоящей работы является изложение результатов статистического анализа временных вариаций параметров ДС и оценок параметров ионосферной турбулентности.

В качестве примера выбраны временные вариации параметров ДС в день частного солнечного затмения (СЗ) 1 августа 2008 г., а также в соседние (фоновые) дни.

СЗ в месте расположения радиофизической обсерватории (РФО) Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина началось в 09:11, закончилось в 11:17 (здесь и далее UT). Максимальная фаза СЗ составляла 0.42. Она наблюдалась в 10:15.

Состояние космической погоды анализировалось по временным вариациям плотностей потоков протонов и электронов, H_p -компоненты геомагнитного поля, а также индексов авроральной и магнитной активности (AE , K_p и D_{st}).

Оказалось, что день СЗ 1 августа 2008 г. и фоновые дни были спокойными. Это обстоятельство существенно облегчало выделение возмущений, связанных с затмением.

Средства и методы

Доплеровский радар. Радар расположен в РФО Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина вблизи г. Харькова (49°38' с. ш., 36°20' в. д.), Украина [4]. Основные параметры вертикально вверх излучающего радиоимпульсы радара следующие: диапазон частот $f = 1 \div 24$ МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства – 1 кВт, длительность импульса $\tau \approx 500$ мкс, частота повторения импульсов – 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства – 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления $G \approx 1 \div 10$ в зависимости от частоты волны. Отношение сигнал/помеха q достигает $10^5 \div 10^6$. Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения и предварительную обработку сигнала в реальном масштабе времени.

Высотная протяженность отраженного сигнала существенно превышает величину $c\tau/2 \approx 75$ км (c – скорость света в вакууме). Поэтому используется стробирование по высоте с дискретностью $\Delta z = 75$ км в диапазоне действующих высот $z' = 75 \div 450$ км.

Комплексная амплитуда биений колебаний опорного генератора и отраженного сигнала в цифровом виде (частота опроса 10 Гц) записывается на жесткий диск, а затем при помощи преобразования Фурье вычисляются ДС в диапазоне возможных доплеровских сдвигов от -2.5 до $+2.5$ Гц на интервале времени 60 с (разрешение по частоте ~ 0.02 Гц).

Погрешность оценки доплеровского смещения частоты (ДСЧ) составляет $(1.8 \div 5.8) \cdot 10^{-3}$ Гц при $q = 10^3 \div 10^2$.

Для общего контроля состояния ионосферы использовались данные стандартного ионозонда. Ионозонд расположен в обсерватории рядом с доплеровским радаром. Основные параметры ионозонда следующие: импульсная мощность – 10 кВт, длительность импульсов – 50 мкс, диапазон частот – $1 \div 20$ МГц, диапазон исследуемых высот – $100 \div 400$ км.

Погрешность отсчета частоты на ионограммах не хуже 0.1 МГц, а критической частоты – 0.05 МГц.

Статистический анализ. Сигнал, представляющий собой временную зависимость ДСЧ $f_d(t)$ компонент ДС с наибольшей амплитудой, обрабатывался следующим образом. Вначале вычислялся тренд на интервале усреднения 40 мин с шагом 1 мин. Оказалось, что такой тренд имеет короткопериодические вариации, связанные с “просачиванием” высокочастотных гармоник через фильтр, которым является скользящее среднее. Для устранения этих вариаций полученный тренд дополнительно усреднялся на интервале 20 мин с шагом 1 мин. Затем он вычитался из исходного сигнала. Полученный после вычитания сигнал $\Delta f_d(t)$ снова подвергался усреднению на интервале 5 мин с шагом 1 мин. После этого анализировались разностный сигнал $\delta(t) = \Delta f_d(t) - \langle \Delta f_d(t) \rangle$ и среднее квадратическое отклонение (СКО) разностного сигнала $\sigma(t)$.

Для сигнала $\delta(t)$ рассчитывалась также нормированная автокорреляционная функция (АКФ) $\rho(\tau)$ на интервале $t_\delta = 30$ мин по известной формуле:

$$\rho(\tau) = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^{t_\delta} \delta(t)\delta(t-\tau)dt.$$

Для отображения результатов спектрального анализа зависимости $\Delta f_d(t)$ использовался графический формат, предложенный в работах [11-13] и включающий анализируемый сигнал, спектрограммы оконного преобразования Фурье (ОПФ) P_S , адаптивного преобразования Фурье (АПФ) P_A и вейвлет-преобразования (ВП) на основе вейвлета Морле P_W , определяемые из выражений

$$P_S = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t)g(t-\tau)\exp(-i\omega t)dt \right|^2,$$

$$P_A = \frac{1}{a} \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t)g\left(\frac{t-\tau}{a}\right)\exp\left[-i\pi\nu\left(\frac{t-\tau}{a}\right)\right]dt \right|^2,$$

$$P_W = \frac{1}{a} \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\Psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right)dt \right|^2,$$

а также энергограммы этих преобразований

$$E_S = \int_{-\infty}^{\infty} P_S(\tau) d\tau, \quad E_A = \int_{-\infty}^{\infty} P_A(\tau) d\tau,$$

$$E_W = \int_{-\infty}^{\infty} P_W d\tau.$$

Здесь $s(t)$ – анализируемый сигнал; τ – сдвиг по времени; $\omega = 2\pi/T$, T – период спектральной составляющей; a – параметр масштабирования, определяющий ширину оконной функции; $g(t)$ – окно Хемминга, имеющее вид: $g(t) = 0.54 + 0.46 \cos \pi t$; v – коэффициент ($v > 0$), равный числу периодов гармонической функции, укладываемых на ширине $g(t)$ при данном a ; $\psi(t) = \exp(-t^2/2) \cos 5t$ – материнский вейвлет Морле. Символом “*” обозначается комплексное сопряжение.

Более подробное описание графического формата и используемых преобразований изложено в работах [11-13].

Результаты анализа

Результаты измерений. Доплеровские измерения 31 июля, 1 и 2 августа 2008 г. проведены на частотах 3.2 и 4.2 МГц. В ходе СЗ критическая частота уменьшалась до 4.0 МГц. В результате этого радиоволна на большей частоте проникала сквозь ионосферу и непрерывные доплеровские измерения оказались невозможными. Опишем далее поведение ДС на частоте $f = 3.2$ МГц.

За день до СЗ временные вариации ДС были следующими (рис. 1). До 08:30 спектры оставались одномодовыми, флуктуации ДСЧ f_d были незначительными (в пределах ± 0.1 Гц). После 08:30 ДС приобрели диффузный характер. Диффузность усиливалась в интервале времени 09:40 – 11:10. Возникал эффект рассыпания ДС. Важно, что амплитуда биений при этом изменялась слабо, отношение сигнал/помеха оставалось достаточным для уверенной регистрации доплеровского эффекта. Ширина “рассыпанных” спектров достигала 1÷2 Гц (в невозмущенных условиях она не превышала 0.1 Гц).

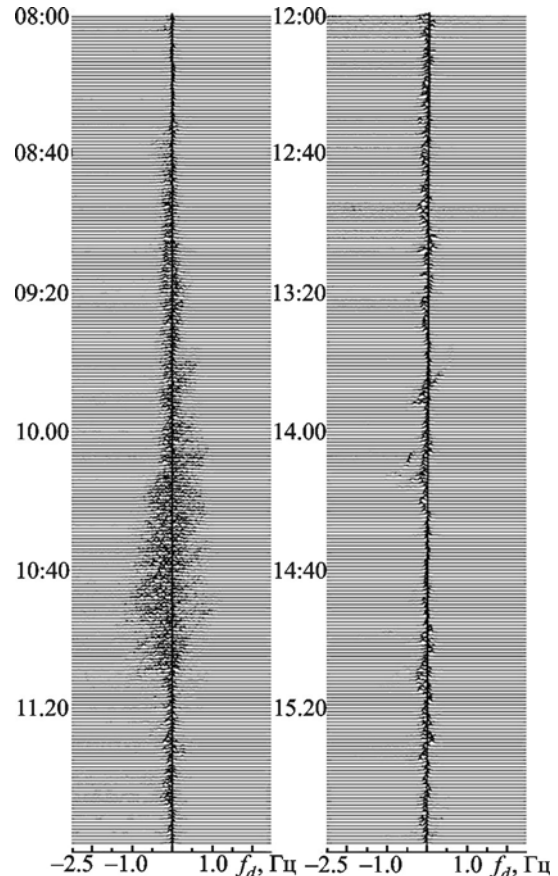


Рис. 1. Временные вариации ДС на частоте $f = 3.2$ МГц 31 июля 2008 г.

После 11:10 ДС уширились незначительно (до $0.2 \div 0.4$ Гц). В среднем в светлое время суток $f_d \approx 0$. После 11:40 в ионосфере эпизодически возникали квазипериодические процессы с квазипериодом $T \approx 5 \div 15$ мин. Их продолжительность составляла $20 \div 60$ мин. Амплитуда $f_{da} \approx 0.1 \div 0.2$ Гц.

В дневное время 2 августа временные вариации ДС были следующими (рис. 2). Среднее значение $f_d(t) \approx 0$. В интервале времени 08:25 – 08:50 наблюдался диффузный характер ДС. Ширина спектров увеличивалась до 0.5 Гц.

С 10:10 до 11:10 имело место значительное усиление диффузности (ширина ДС достигала 2 Гц). Уровень сигнала при этом оставался практически неизменным, отношение сигнала/помеха – большим.

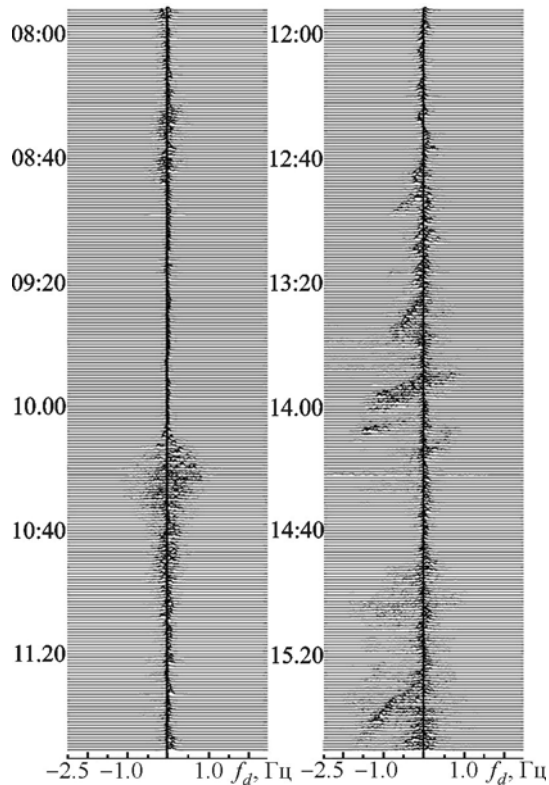


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для 2 августа 2008 г.

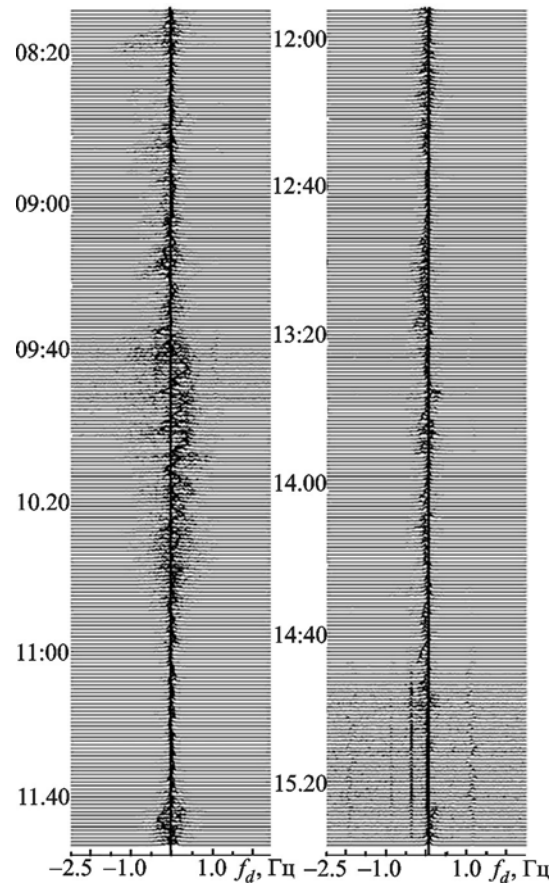


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для 1 августа 2008 г.

После 11:20 в ионосфере наблюдался квазипериодический процесс с $T \approx 10 \div 15$ мин. Его продолжительность была не менее 60 мин. Примерно с 12:40 и до 14:10 имели место значительные (и даже гигантские [4]) вариации ДСЧ. Значения f_d , оставаясь отрицательными, при этом изменялись на $1 \div 1.5$ Гц за время $10 \div 15$ мин. ДС носили скорее диффузионный характер.

Следующие гигантские вариации ДСЧ наблюдались в интервале времени 15:25 – 15:40. Значения f_d достигали -1.3 Гц в течение примерно 15 мин.

В день СЗ поведение ДС было иным (рис. 3). Примерно с 08:00 и до 09:00 имели место квазипериодические вариации f_d . Величина квазипериода составляла $4 \div 6$ и иногда 10 мин, а амплитуда – около 0.05 Гц.

Примерно с 09:15 – 09:20 (т. е. после начала СЗ) амплитуда колебаний стала увеличиваться от 0.2 до 0.3 Гц, значение квазиперио-

да было около $5 \div 10$ мин. Характер колебаний существенно изменился после 09:41, примерно через 30 мин после начала затмения. Второй раз характер колебаний изменился примерно в 10:15 – 10:19, в момент главной фазы СЗ. В целом квазипериодический процесс с амплитудой $f_{da} \approx 0.15 \div 0.20$ Гц имел место в течение 90 мин, т. е. примерно до 11:00. После этого его амплитуда не превышала 0.05 Гц. В интервале времени 11:40 – 12:30 спектры стали носить диффузный характер.

После 13:30 ДС были преимущественно одномодовыми, эпизодически они уширялись примерно до 0.3 Гц.

Важно отметить, что в интервале времени с 09:10 до 10:50 ДС приобретали диффузионный характер, ширина спектров достигала $0.5 \div 0.8$ Гц.

Добавим также, что с 09:11 до 10:00 эпизодически появлялась мода с $f_d \approx -0.4$ Гц, но ее амплитуда и продолжительность были небольшими, поэтому она часто “тонула” в диффузном спектре. В целом же в интервале времени с 09:40 и до 10:50 преобладала мода с $f_d \approx 0.3 \div 0.4$ Гц.

После 11:00 в среднем $f_d(t) \approx 0$.

Статистические характеристики ДСЧ. Временная зависимость ДСЧ показана на рис. 4, а. Ее особенности описаны выше. Рассмотрим поведение тренда, показанного сплошной линией на рис. 4, б. В период времени с 08:20

до 08:48 значение f_{dt} было близко к нулю. Затем имело место его постепенное уменьшение до минимального значения -0.04 Гц в момент времени 09:15. Далее на протяжении примерно 50 мин наблюдался рост функции $f_{dt}(t)$, которая достигла нуля в 09:32 и максимального значения около 0.13 Гц в момент времени 10:03. Важно, что минимальное значение тренда по абсолютной величине было примерно в три раза меньше его максимального значения. На интервале времени 13:03 – 14:20 функция $f_{dt}(t)$ убывала, плавно приближаясь к нулю.

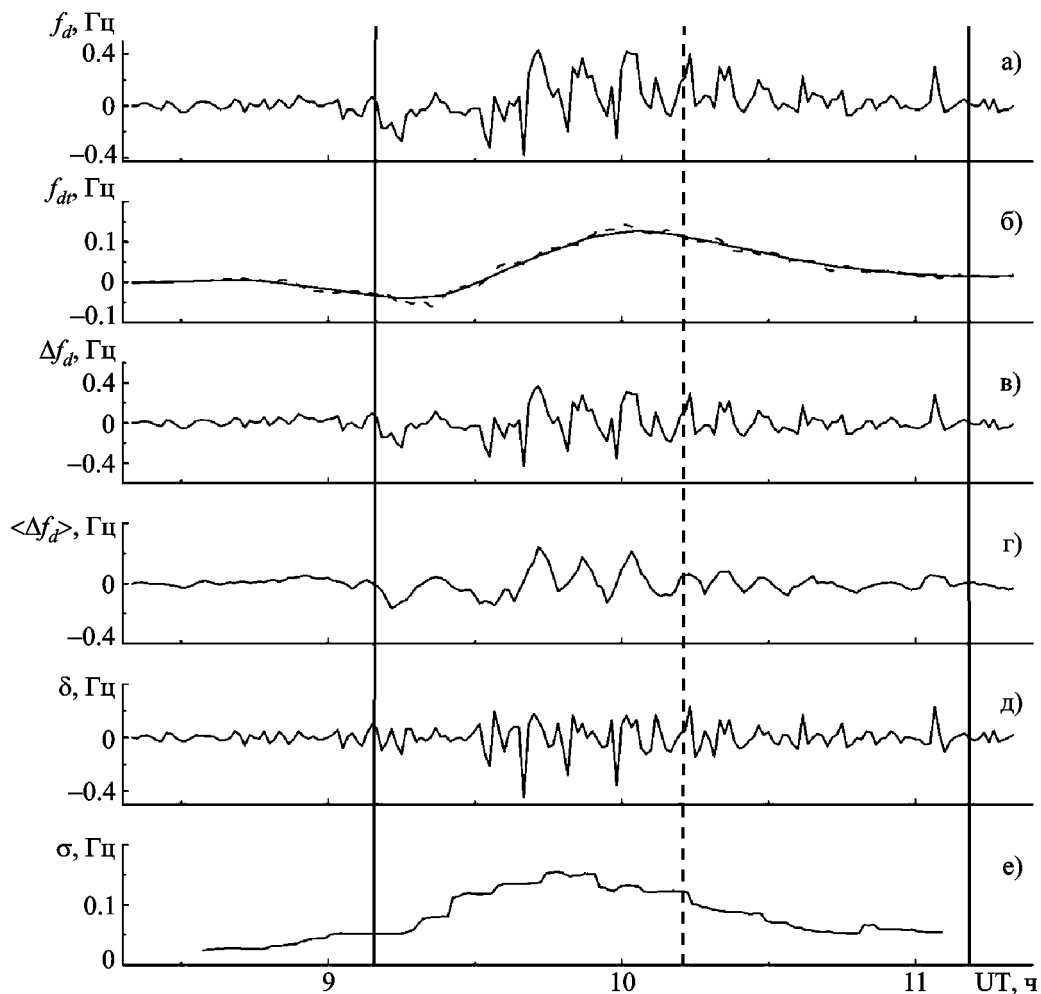


Рис. 4. Временные вариации ДСЧ f_d на частоте $f = 3.2$ МГц 1 августа 2008 г. (а), неусредненного (итрихи) и усредненного тренда f_{dt} (б), разности ДСЧ и тренда Δf_d (в), усредненной разности $\langle \Delta f_d \rangle$ (г), разностного сигнала δ (д) и СКО σ (е). Вертикальными линиями здесь и далее показаны моменты начала, главной фазы и окончания СЗ

Зависимость $\Delta f_d(t)$ носила нестационарный и, на первый взгляд, квазислучайный характер (см. рис. 4, в). Лишь в интервале времени 09:30 – 10:30 можно увидеть квазипериодический процесс с амплитудой около 0.3 Гц. В остальное время вариации Δf_d обычно не превышали ± 0.1 Гц.

В усредненном сигнале $\langle \Delta f_d(t) \rangle$ квазипериодический процесс прослеживался более четко (см. рис. 4, г). Стала возможной визуальная оценка его периода, который примерно равнялся 10 мин, и амплитуды, которая с 09:40 до 10:12 составляла около 0.15 Гц, а в интервале времени 10:12 – 10:45 была близка к 0.05 Гц.

Из рис. 4, д видно, что в разностном сигнале $\delta(t)$ в отдельные интервалы времени име-

ли место квазипериодические колебания продолжительностью 30 ± 60 мин. Максимальные отклонения δ от нулевого значения составили +0.25 и -0.45 Гц.

СКО σ вначале было близко к 0.03 Гц (см. рис. 4, е). Затем, постепенно увеличиваясь, оно достигло максимального значения 0.15 Гц в 09:48, после чего опять стало уменьшаться и к концу интервала наблюдения стало равным 0.05 Гц.

Результаты корреляционного анализа. Из рис. 5 видно, что интервал корреляции всех АКФ по нулевому уровню был близок к 1 мин. При временных сдвигах $\tau = 2 \div 3$ мин наблюдалась отрицательная корреляция, причем значения ρ лежали в диапазоне от -0.7

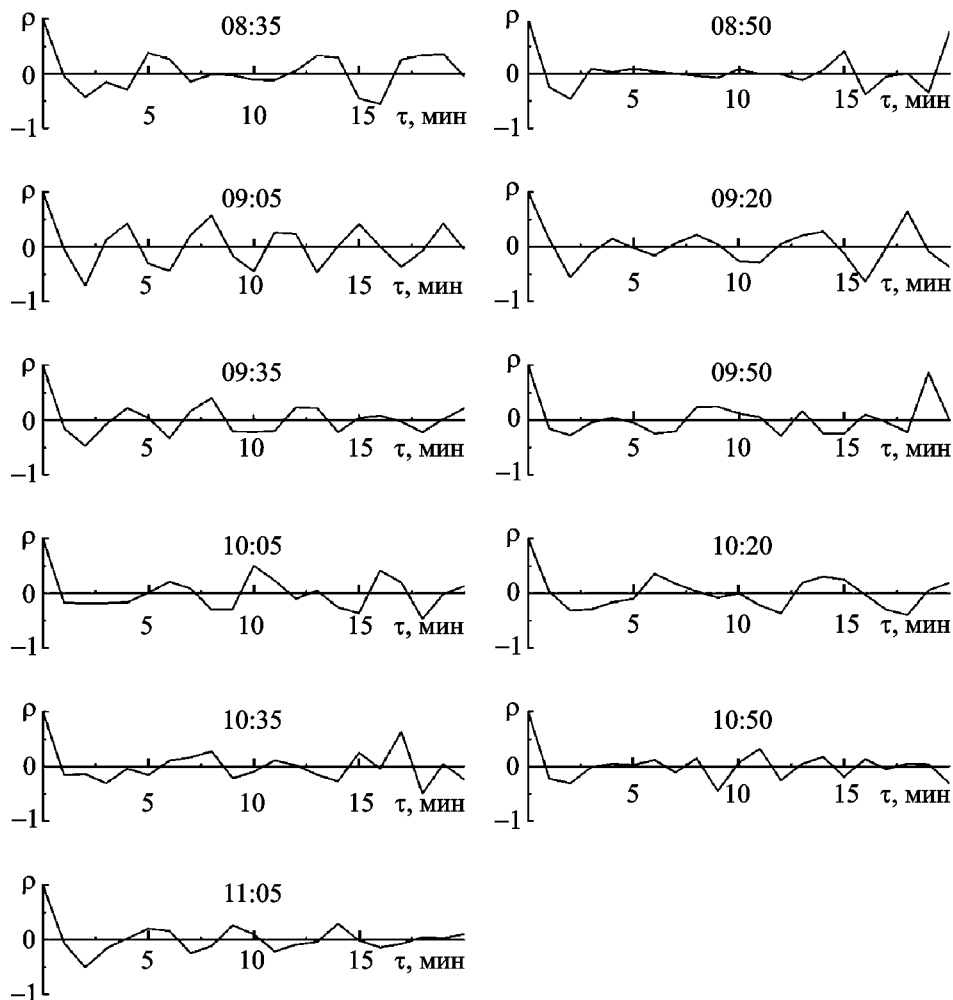


Рис. 5. АКФ сигнала $\delta(t)$ 1 августа 2008 г. для различных интервалов времени

до -0.3 . После начала затмения через время $\Delta t = 0 \div 15$ мин АКФ носила колебательный характер, что указывает на наличие в анализируемом сигнале спектральной составляющей с периодом, близким к 5 мин. При больших запаздываниях колебания АКФ были нерегулярными и лишь при Δt , равном 45 мин, вновь прослеживалось наличие колебательного процесса с периодом около 5 мин.

Результаты спектрального анализа. Применение ОПФ, АПФ и ВП позволило произвести более точную время-периодную локализацию спектральных составляющих ДСЧ $\Delta f_d(t)$. Как видно из рис. 6, в анализируемом сигнале имели место колебания с периодами T , равными $4 \div 5$, $9 \div 12$, $20 \div 22$ мин, а также около 55 мин.

Процесс с $T \approx 55$ мин был существенно ослаблен за счет вычитания тренда. Такое колебание существовало всего около часа с 09:00 до 10:00, таким образом его продолжительность примерно равнялась периоду.

Колебание с $T = 20 \div 22$ мин наблюдалось в интервале времени 09:15 – 10:15, т. е. его продолжительность составила около $3T$. Имело место уменьшение периода и интенсивности колебания с течением времени.

Продолжительность регистрации спектральной составляющей с $T = 9 \div 12$ мин также составила около 1 ч (6 периодов). Колебание наблюдалось с 09:45 до 10:45. И тоже имело место уменьшение его интенсивности со временем.

Наконец, процесс с $T = 4 \div 5$ мин возникал трижды в течение времени наблюдения. Колебание началось около 09:36 и длилось около 15 мин (3 периода). Второе оно наблюдалось в 10:10 – 10:20 (продолжительность – около 2 периодов). Третий цуг колебания имел место примерно через час после второго, его продолжительность была близка к 10 мин. Интенсивность этого колебания была существенно меньше интенсивностей колебаний, описанных выше.

Следует отметить, что благодаря применению ОПФ удалось более точно определить длительность спектральной составляющей с $T \approx 55$ мин и периоды более высокочастотных составляющих, в то время как АПФ дало возможность установить продолжительность колебаний с периодами $4 \div 5$, $9 \div 12$ и $20 \div 22$ мин и период низкочастотной спектральной

составляющей. Применение ВП позволило выявить тонкую структуру этих процессов.

Результаты расчетов

Основные соотношения. Для отражающейся от ионосферы радиоволны с частотой $f \approx 3 \div 4$ МГц уровень амплитуды обыкновенной компоненты существенно превышает уровень амплитуды необыкновенной компоненты. Для первой из них условие отражения имеет вид

$$f = f_{pr}, \quad (1)$$

где $f_{pr} = f_p(z_r)$ – плазменная частота на высоте отражения z_r . Основной вклад в ДСЧ дает область высот, прилегающая к высоте отражения радиоволны, где показатель преломления радиоволны n заметно отличается от единицы.

Условие (1) совпадает с условием отражения радиоволны от негиротропной ионосферы. Это позволяет в первом приближении не учитывать наличие магнитного поля. На высотах $z \geq 100$ км также можно пренебречь влиянием соударений электронов с тяжелыми частицами. При этом

$$n^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}. \quad (2)$$

Выражение для ДСЧ имеет вид [1]:

$$f_d = -2 \frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_0^{z_r} n dz, \quad (3)$$

где z_r и n в общем случае зависят от времени. При движении области отражения со скоростью v из (3) следует, что

$$f_d = -2f \frac{v}{c}, \quad (4)$$

где $v = dz_r/dt$. Если же изменяется во времени n , то

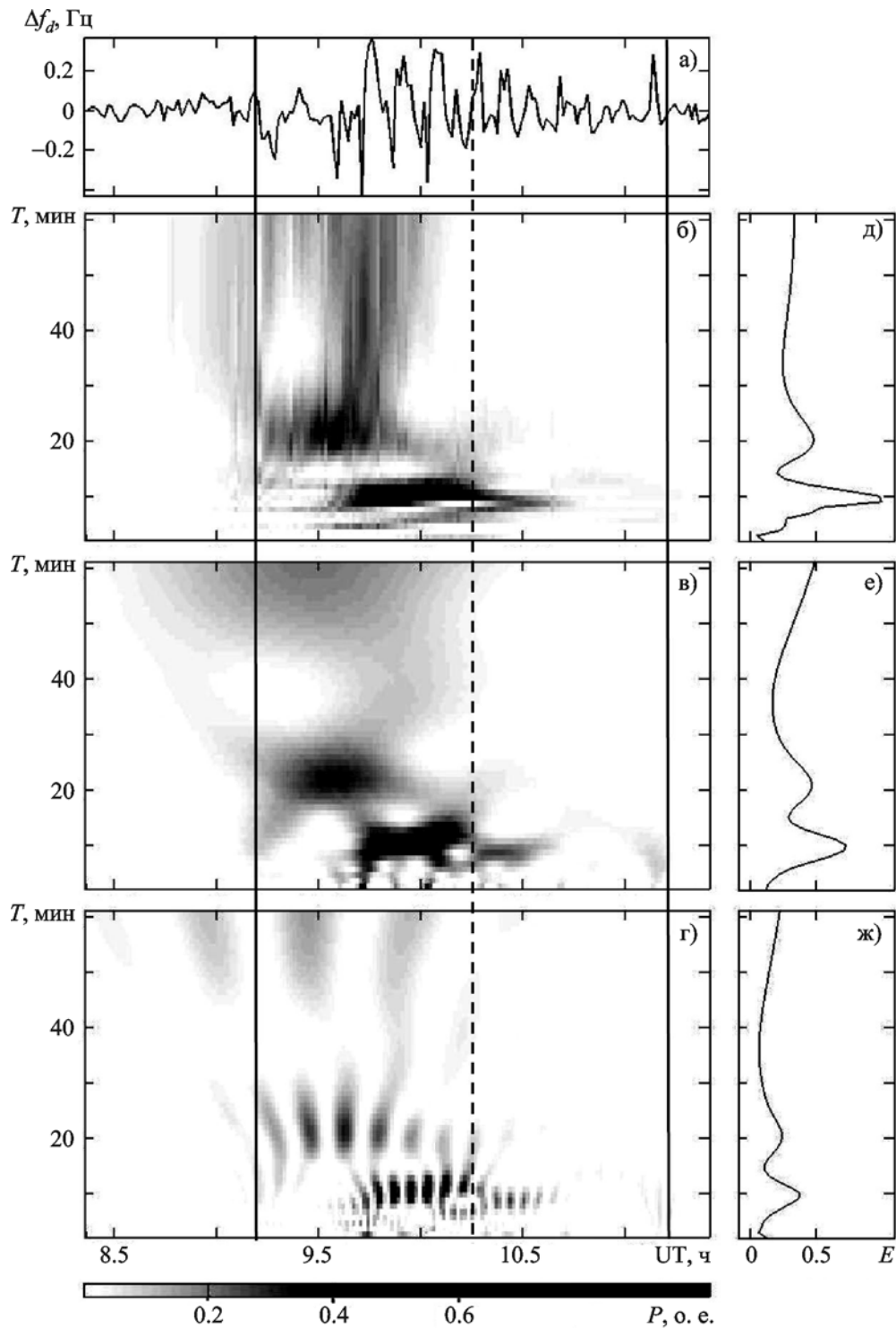


Рис. 6. Результаты спектрального анализа временных вариаций Δf_d 1 августа 2008 г.: а) – анализируемый сигнал; б), в), г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП на основе вейвлета Морле сигнала; д), е), ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ и ВП на основе вейвлета Морле сигнала

$$f_d = -2 \frac{f}{c} \int_0^{z_f} \frac{\partial n}{\partial t} dz. \quad (5)$$

$$L_e = \int_0^{z_f} \frac{f_p^2}{f^2 n_0} dz,$$

При флуктуациях ν из (4) получаем для СКО ДСЧ следующее выражение:

$$\sigma_f = 2f \frac{\sigma_\nu}{c}, \quad (6)$$

где σ_ν – СКО флуктуаций скорости движения области отражения.

При наличии флуктуаций показателя преломления ниже области отражения радиоволны с характерным временем τ для

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial \Delta n}{\partial t}$$

получаем оценку

$$\left| \frac{\partial \Delta n}{\partial t} \right| \approx \frac{|\Delta n|}{\tau}. \quad (7)$$

Из (2) после статистического усреднения случайных флуктуаций Δn и ΔN имеем

$$\sigma_n = \frac{\tilde{\beta}}{2} \tilde{\sigma}_N, \quad (8)$$

где $\tilde{\sigma}_N = \sigma_N / N_0$, $\tilde{\beta} = (n^2 - 1)/n$, σ_N – СКО флуктуаций ΔN концентрации электронов N в ионосфере.

С учетом (7), (8) из (5) получаем

$$\sigma_f^2 = \left(\beta \frac{f}{c\tau} \right)^2 \int_0^{z_f} \int_0^{z_f} \frac{\Delta N(z')}{N_0(z')} \frac{\Delta N(z'')}{N_0(z'')} dz' dz''. \quad (9)$$

Здесь $\beta = L_N / L_e$, L_e – эффективный масштаб, задаваемый следующим соотношением:

где индекс “0” относится к невозмущенным параметрам среды, L_N – характерный масштаб изменения N_0 . Для линейного слоя $\beta = 1.5$. При выводе (9) считалось, что характерный масштаб изменения $\Delta N / N_0$ существенно меньше, чем характерный масштаб изменения $\tilde{\beta}$.

При размере неоднородностей l , дающих основной вклад в обратное рассеяние радиоволн, и толщине слоя с неоднородностями $L \gg l$ из (9) следует, что

$$\sigma_f = \beta \frac{f}{c\tau} \tilde{\sigma}_N \sqrt{Ll}. \quad (10)$$

При обратном рассеянии радиоволн имеет место закон Брегга. При этом

$$l = \frac{\lambda}{2}.$$

Для $f = 3.2$ МГц получаем $\lambda \approx 94$ м, $l \approx 47$ м.

Если исчезновение неоднородностей N вызвано амбиполярной диффузией, то

$$\tau = \frac{l^2}{D_z} = \frac{l^2}{D \sin^2 I},$$

где D – продольная по отношению к геомагнитному полю компонента тензора амбиполярной диффузии, D_z – ее вертикальная составляющая, $I \approx 66.4^\circ$ – наклонение геомагнитного поля в РФО.

Если же время τ характеризует движение неоднородностей в вертикальном направлении, то интервал корреляции

$$\tau_k = \frac{l}{\sigma_\nu}. \quad (11)$$

По σ_ν и l можно вычислить параметр, имеющий смысл эффективного коэффициента диффузии

$$D_e = \sigma_\nu l = \sigma_\nu^2 \tau_k. \quad (12)$$

При квазипериодических вариациях N с периодом T из соотношения (5) можно получить следующее уравнение для оценки амплитуды δ_{Nm} относительных вариаций $\delta_N = \Delta N / N_0$:

$$f_{dm} = f \frac{2\pi\beta L}{cT} \delta_{Nm}, \quad (13)$$

где f_{dm} – амплитуда квазипериодических вариаций ДСЧ; L – характерный масштаб, который можно полагать равным меньшей из двух величин L_e или $2H$, H – приведенная высота нейтральной атмосферы.

Параметры турбулентных процессов. Примерно за 0.5 ч до СЗ $\sigma_f \approx 0.025$ Гц (см. рис. 4). С 08:50 до 09:00 значение σ_f выросло от 0.025 до 0.05 Гц. Таким оно оставалось в течение ближайших 15 мин. После 09:15 σ_f увеличивалось до максимального значения $\sigma_{fmax} \approx 0.15$ Гц, которое наблюдалось в интервале времени 09:45 – 09:56. Затем σ_f в течение часа уменьшалось от 0.15 до 0.05 Гц.

Результаты оценок статистических параметров среды по соотношениям (6), (11) и (12) приведены в табл. 1. Считалось, что $l \approx 47$ м.

Заметим, что расчет для дневной модели ионосферы в условиях минимальной солнечной активности дает, что значения D , равные $1.3 \cdot 10^2$ и $1.4 \cdot 10^2$ м²/с, имеют место на высотах около 115 и 122 км. Зондирующая волна

перед СЗ и в его главную фазу отражалась, как показал анализ ионограмм, соответственно вблизи высот 116 и 120 км.

Таким образом, флуктуации значения ДСЧ вызваны, скорее всего, флуктуациями скорости движения высоты отражения в результате образования и диффузионного расплывания неоднородностей N .

Наряду с флуктуациями ДСЧ имело место значительное (до 1÷1.5 Гц) уширение ДС. Рассмотрим это подробнее.

Уширение σ_{fs} ДС также описывается соотношением (10). Если в этом соотношении положить $\tau = \tau_k = 7 \div 27$ с, значение $L \approx L_N \approx 57$ км (L – характерный масштаб изменения $N(z)$, который определен из анализа ионограмм) и $\tilde{\sigma}_N = 0.03 \div 0.10$, получим, что при $\beta = 1.3$ (вычислено по профилю $N(z)$) $\sigma_{fs} \approx 0.03 \div 1$ Гц. Верхнее значение σ_{fs} близко к наблюдаемому, однако оно имеет место лишь при достаточно сильной ($\tilde{\sigma}_N = 0.1$) неоднородной структуре и малых $\tau_k \approx 7$ с, т. е. больших значениях σ_f , равных 0.15 Гц.

Более правдоподобным механизмом уширения ДС в этом эксперименте является рассеяние зондирующей радиоволны на неоднородностях N в пределах слоя E_s (он наблюдался в дневное время 1 и 2 августа 2008 г.). Слой E_s находится на высоте $z \approx 100$ км, где могла быть существенной турбулентная диффузия. Известно, что коэффициент турбулентной диффузии D_t здесь может составить $5 \cdot 10^3 \div 10^4$ м²/с [14]. Тогда для $l \approx 47$ м величина $\tau_t = l^2 / D_t \approx 0.22 \div 0.44$ с. Полагая, как и в предыдущем случае, $\tilde{\sigma}_N = 0.03 \div 0.10$, при $L \approx 1$ км, $\beta = 1.3$, $\tau_t \approx 0.22 \div 0.44$ с, получим, что $\sigma_{fs} \approx 0.2 \div 1.4$ Гц. Большее значение $\sigma_{fs} \approx 1.4$ Гц близко к наблюдаемому. Оно имеет место при $D_t \approx 10^4$ м²/с и $\tilde{\sigma}_N \approx 0.1$.

Параметры квазипериодических процессов. В период СЗ были ярко выражены три квазипериодических процесса: с $T \approx 4 \div 5$ мин и $f_{dm} \approx 0.1 \div 0.2$ Гц, $T \approx 9 \div 12$ мин и $f_{dm} \approx 0.2 \div 0.3$ Гц, а также $T \approx 20 \div 22$ мин и $f_{dm} \approx 0.1 \div 0.2$ Гц. Из соотношения (13) следует, что этим колебаниям соответствуют значения δ_{Nm} , равные 1.7÷3.4, 6.8÷10.2 и 6.8÷13.6 %.

Таблица 1. Статистические характеристики параметров среды

σ_f , Гц	0.025	0.05	0.075	0.10	0.15
σ_ν , м/с	1.18	2.35	3.5	4.7	7.0
τ_k , с	26.8	20	13.4	10	6.7
D_e , м ² /с	55	$1.1 \cdot 10^2$	$1.65 \cdot 10^2$	$2.2 \cdot 10^2$	$3.3 \cdot 10^2$

Параметры квазирегулярных процессов. Квазирегулярный процесс описывается трендом $f_{dt}(t)$ (см. рис. 4, б). Используя выражения (2), (5) и (7), легко показать, что изменению ДСЧ от -0.05 до 0.15 Гц соответствует относительное изменение N , даваемое следующим соотношением:

$$\Delta f_{dt} = \beta \frac{fL}{c\tau_c} \frac{\Delta N}{N_{\min}},$$

где $L \approx L_N \approx 57$ км, τ_c – характерное время изменения N . Определив $\tau_c \approx 45$ мин из рис. 4, б, получим, что $\Delta N/N_{\min} \approx 0.7$, тогда $N/N_{\min} \approx 1.7$. Такие значения N/N_{\min} нельзя объяснить открыванием диска Солнца после окончания СЗ. Кроме того, максимальные значения f_{dt} наблюдались еще на стадии покрытия диска Солнца. Естественно предположить, что появился дополнительный источник увеличения N .

Обсуждение

После начала СЗ 1 августа 2008 г. ДС носили диффузный характер. Поскольку отношение сигнал/помеха было значительно больше единицы, диффузный характер ДС можно объяснить влиянием турбулентной структуры ионосферы. Оцененные параметры этой структуры (σ_v , τ_k , D_e , $\tilde{\sigma}_N$) близки к тем, что описаны в литературе.

В течение первых 20 мин $\overline{f_d} \approx -0.05$ Гц. С 09:40 значение $\overline{f_d}$ становится положительным. С 10:00 и до 11:00 значение $\overline{f_d}$ изменялось от 0.15 до 0 Гц. На усредненный ход ДСЧ накладывался квазипериодический процесс общей длительностью $\Delta T \approx 70 \div 75$ мин, среднее значение $f_{da} \approx 0.2$ Гц.

Важно, что 1 августа 2008 г. зависимость $\overline{f_d}(t)$ также была асимметричной относительно момента времени наступления главной фазы затмения t_e . Кроме того, значения $\overline{f_d} > 0$ наблюдались как до момента t_e , так и после него. Это означает, что область отражения двигалась вниз не только в ходе открывания диска, но и при его покрытии (после 09:10). Причиной такого поведения $\overline{f_d}(t)$ могло быть

увеличение концентрации электронов в течение фазы покрытия и фазы открывания диска Солнца.

Возможность высыпания электронов. Механизм увеличения N через 20 мин после начала СЗ не очень понятен. Он может быть связан с высыпанием “мягких” электронов из радиационного пояса.

СЗ, являясь высокоэнергетическим источником возмущений в атмосфере и геокосмосе, способно привести к уменьшению “поперечной” энергии частиц радиационного пояса на $1 \div 10$ кэВ и вызвать высыпание частиц с широким спектром энергией (от ~ 0.1 до 100 кэВ) [15].

Возможность высыпания электронов с энергиями $40 \div 80$ кэВ обсуждается в работе [15]. Разумеется, спектр электронов не является моноэнергетическим. В потоке частиц могут присутствовать и электроны с энергиями $\epsilon_e \sim 0.1 \div 1$ кэВ. Они приводят к дополнительной ионизации соответственно нижней части F- и E-области.

Результаты оценки ожидаемых эффектов приведены в табл. 2. Расчеты производились по методике, описанной в [15]. При этом считалось, что $\alpha \approx \alpha_0 \approx 2 \cdot 10^{-13}$ м³/с, $N/N_{\min} = 1.7$ (см. выше), диаметр затененной области $D_e \approx 4000$ км, продолжительность затмения по всему земному шару $\Delta t_e \approx 4.5$ ч.

В табл. 2 приведены результаты оценок плотности потока электронов p , плотности потока энергии Π , мощность P высыпающихся на площади $S_e = \pi D_e^2/4$ частиц и суммарная энергия этих частиц $E = P \Delta t_e$. Перечисленные параметры имеют разумные значения, что свидетельствует в пользу гипотезы о дополнительной ионизации потоком высыпающихся “мягких” электронов.

Волновой отклик ионосферы. Метод ДЗ показал наличие ВВ в ионосфере в день СЗ. Волновые процессы с $T = 4 \div 5$ мин и $T = 9 \div 12$ мин заметно усилились примерно через 25 и 34 мин соответственно. Учтем, что ДСЧ пропорционально производной от $N(t)$, а следовательно, опережает по фазе примерно на $T/4 \approx 2.5$ мин при ($T \approx 10$ мин) колебание $N(t)$. Это означает, что квазипериодический процесс усилился примерно через 33 мин после начала СЗ.

Таблица 2. Основные параметры выпадающих электронов и производимой ими ионизации

z , км	120	130	140	150	160	170	180
$N_0 \cdot 10^{-11}$, м ⁻³	1.0	1.1	1.2	1.3	1.8	2.3	2.8
$q_{eo} \cdot 10^{-9}$, м ⁻³ · с ⁻¹	2.0	2.4	2.9	3.4	6.5	10.6	15.7
$q_e \cdot 10^{-9}$, м ⁻³ · с ⁻¹	5.8	6.9	8.4	9.8	18.8	30.6	45.3
$\Delta q_e \cdot 10^{-9}$, м ⁻³ · с ⁻¹	3.8	4.5	5.5	6.4	12.3	20.0	29.6
ε_e , кэВ	3	2	1	0.8	0.6	0.4	0.3
$\Pi \cdot 10^4$, Вт · м ⁻²	4.2	5.0	6.1	7.0	13.5	22.0	32.6
$p \cdot 10^{-11}$, м ⁻² · с ⁻¹	8.8	15.6	38.1	54.7	140.6	343.8	679.2
P , ГВт	5.3	6.3	7.7	8.8	17.0	27.6	40.9
E , ТДж	84.8	100.8	123.2	141.1	272	441.6	654.4

11 августа 1999 г. заметное усиление ВВ тоже началось примерно через 35 мин после начала СЗ. Максимальная его амплитуда наблюдалась через 45 мин после этого момента [5].

Таким образом, квазипериодический процесс генерируется примерно через 30 ÷ 35 мин после первого визуального контакта небесных тел. Практически в этот же момент времени производная от освещенности атмосферы достигает максимального значения. Это обстоятельство позволяет предположить, что квазипериодический процесс генерируется над местом наблюдения.

Обсудим значения периодов колебаний, которые наблюдались методом ДЗ (около 4 ÷ 5, 9 ÷ 12 и 20 ÷ 22 мин, а также широкополосный процесс с $T \approx 60 \div 100$ мин).

Метод ДЗ более чувствителен при прочих равных условиях к быстро протекающим процессам. В соответствии с соотношением (13) к большим ДСЧ приводят колебания с меньшими периодами. Минимальный период внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере на высотах 100 ÷ 150 км примерно равен периоду Брента–Вяйсяля, который близок к 10 мин. Это обстоятельство объясняет, почему в вариациях ДСЧ преобладают периоды $T \approx 9 \div 12$ мин. Колебания с $T \approx 20 \div 22$ мин возможно являются второй гармоникой. Период 4 ÷ 5 мин близок к периоду Брента–

Вяйсяля на высотах мезосферы (60 ÷ 100 км). Возможность того, что колебания параметров среды на этих высотах модулировали ДСЧ, представляется маловероятной. Дело в том, что амплитуда ДСЧ при этом была бы крайне незначительной из-за малости отношения f_p^2/f^2 вдали от области отражения радиоволн.

Более правдоподобной причиной является распространение инфразвуковых волн с $T \approx 4 \div 5$ мин вблизи высоты отражения радиоволн.

Судя по периодам ВВ мы наблюдали ионосферные проявления инфразвука ($T \approx 4 \div 5$ мин) и ВГВ ($T \approx 9 \div 12$ мин, $T \approx 20 \div 22$ мин), которые генерировались в термосфере в результате перемещения охлажденной в пределах лунной тени области термосферы.

ВГВ, вызванные затмениями, предсказаны в [16] и наблюдались ранее рядом авторов (см., например, [2, 17-21]). В то же время авторы работ [22-25] ВГВ не обнаружили. Поэтому исследование ВВ, генерируемых СЗ, остается актуальной задачей. Наши результаты, похоже, свидетельствуют в пользу генерации ВВ затмениями.

Мы, в отличие от авторов работы [16], считаем, что инфразвук и ВГВ могут генерироваться не сверхзвуковым движением области тени, а перепадом температур в области тени и вне ее.

Выводы

1. Обнаружено, что СЗ сопровождалось значительными вариациями статистических характеристик ДС на частоте 3.2 МГц. Практически в течение всего затмения спектры носили диффузный характер.

2. Несмотря на диффузность, в спектрах выделялись квазипериодические процессы с периодами $4 \div 5$ мин, $9 \div 12$ мин и $20 \div 22$ мин и амплитудами $0.1 \div 0.2$, $0.2 \div 0.3$ и $0.1 \div 0.2$ Гц соответственно, а также широкополосный (периоды $50 \div 100$ мин) процесс.

Первому процессу соответствовали колебания концентрации электронов с относительной амплитудой $1.7 \div 3.4$ %. Этот процесс возник через 25, 60 и 120 мин после начала затмения и суммарно продолжался около 35 мин.

Второму процессу соответствовали колебания концентрации электронов с относительной амплитудой $6.8 \div 10.2$ %. Этот процесс возник через 34 мин после начала затмения и продолжался около часа.

Третьему процессу соответствовали колебания концентрации электронов с относительной амплитудой $6.8 \div 13.6$ %. Этот процесс возник практически сразу после начала затмения и продолжался также около часа.

3. Квазипериодические процессы в ионосфере, скорее всего, были вызваны генерацией и распространением инфразвуковых волн ($T \approx 4 \div 5$ мин) и ВГВ ($T \approx 9 \div 12$ мин, $T \approx 20 \div 22$ мин).

4. Установлено, что примерно через 35 мин после начала затмения ДСЧ стало положительным, постоянная составляющая смещения $\overline{f_d} \approx 0.15 \div 0.20$ Гц. Такому значению $\overline{f_d}$ соответствовала направленная вниз скорость движения области отражения, в среднем равная 5 м/с. Значение $\overline{f_d}$ было положительным в интервале времени с 09:40 до 10:45. За это время область отражения сместилась вниз примерно на 20 км.

5. Положительные значения ДСЧ, которые были зарегистрированы еще до наступления главной фазы затмения и наблюдались до его

окончания и несколько дольше, могли быть вызваны стимулированным СЗ высыпанием электронов с энергиями $0.1 \div 1$ кэВ из магнитосферы.

6. Описанные особенности вариаций ДС отсутствовали в фоновые дни. Следовательно, такие вариации спектров были вызваны СЗ.

Авторы благодарны С. Г. Чулакову за проведение измерений на доплеровском радаре, Н. Н. Мухортовой за помощь в обработке результатов измерений, а В. Ф. Пушину за полезные советы.

Литература

1. Намазов С. А., Новиков В. Д., Хмельницкий И. А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении декаметровых радиоволн // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18, № 4. – С. 473-500.
2. Ishinose T., Ogawa T. Internal gravity waves deduced from HF Doppler data during the April 19, 1958 solar eclipse // J. Geophys. Res. – 1976. – Vol. 8, No. 13. – P. 2401-2404.
3. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, № 3. – С. 227-246.
4. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, №3. – С. 209-226.
5. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т.5, №4. – С. 361-370.
6. Борисов Б. Б., Егоров Д. А., Егоров Н. Е., Колесник А. Г., Колесник С. А., Мельчинов В. П., Нагорский П. М., Парфенов С. С., Решетников Д. Д., Смирнов В. Ф., Степанов А. Е., Тарашук Ю. Е., Тельпуховский Е. Д., Цыбиков Б. Б., Шинкевич Б. М. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2000. – Т. 40, № 3. – С. 94-103.

7. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т.8, №2. – С. 143-162.
8. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №1. – С. 5-28.
9. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т.44, №4. – С. 518-534.
10. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – №3. – С. 55-70.
11. Бурмака В. П., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – №11. – С. 3-24.
12. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681-702.
13. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 10, №10. – С. 39-49.
14. Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 272 с.
15. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, №4. – С. 371-375.
16. Chimonas G., Hines C. O. Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75. – P. 875-876.
17. Davis M. J., da Rosa A. V. Possible detection of atmospheric gravity waves generated by the solar eclipse // Nature. – 1970. – Vol. 226, No. 5221. – P. 1123-1128.
18. Broche P., Crochet M., de Maitre J. G. Gravity waves generated by the June 1973 solar eclipse in Africa // J. Atmos. Terr. Phys. – 1976. – Vol. 38, No. 12. – P. 1361-1364.
19. Bertin F., Hughes K. A., Kersley L. Atmospheric waves induced by solar eclipse of 30 June 1973 // J. Atmos. Terr. Phys. – 1977. – Vol. 39. – P. 457-461.
20. Buther E. C., Downing A. M., Kole K. D. Wavelike variations in the F-region in the path of totality of the eclipse of 23 October 1976 // J. Atmos. Terr. Phys. – 1979. – Vol. 41. – P. 439-444.
21. Jones T. B., Wright D. M., Milner J., Yeoman T. K., Reid T., Senior A., Martinez P. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2004. – Vol. 66, No. 5. – P. 363-374.
22. Beer T., May A. N. Atmospheric gravity waves to be expected from the solar eclipse of June 30 // Nature. – 1972. – Vol. 240, No. 5375. – P. 30-32.
23. Chandra H., Sethia G., Vyas G. D., Deshpande M. R., Vats H. O. Ionospheric effects of the total solar eclipse of 16 Feb. 1980 // Proc. Indian Nat. Acad. Sci. – 1980. – Vol. A47, No. 1. – P. 57-60.
24. Deshpande M. R., Chandra H., Sethia G., Vats H. O., Vyas G. D., Iyer K. N., Janve A. V. Effects of the total solar eclipse of 16 February 1980 on TEC at low latitudes // Proc. Indian. Nat. Acad. Sci. – 1982. – Vol. 48, No. 3. – P. 427-433.
25. Rama Rao P. V. S., Rao B. V. P. S., Nru D., Niranjan K. TEC observations at Waltair during the total solar eclipse of 16 February 1980 // Proc. Indian Nat. Acad. Sci. – 1982. – Vol. 48, No. 3. – P. 434-438.

**Статистичні характеристики
доплерівських спектрів радіосигналів,
відбитих у природньо-збуреній
іоносфері**

С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор

Наводяться результати статистичного аналізу часових варіацій доплерівських спектрів (ДС) радіосигналів на вертикальних трасах. Для зондування іоносфери використовувався доплерівський радар ВЧ діапазону. Аналіз ДС виконувався для дня сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. і фонових днів. Оцінено статистичні характеристики ДС і параметри турбулентної іоносфери. Показано, що затемнення викликало значні збурення в іоносфері.

Doppler Spectra Statistical Characteristics of Radio Signals Reflected in the Naturally Disturbed Ionosphere

S. V. Panasenko and L. F. Chernogor

The statistical analysis results of Doppler spectra (DS) time variations of radio signals at vertical incidence are shown. HF Doppler radar is used for ionosphere probing. The DS analysis is carried out for the day of solar eclipse, August 1, 2008, and days without eclipse. The statistical characteristics of DSs and parameters of turbulence ionosphere are estimated. The eclipse is shown to cause considerable disturbances in the ionosphere.