

Радиофизические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. на наклонных радиотрассах

К. П. Гармаш, С. Г. Леус, 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 24 февраля 2011 г.

Описаны результаты наблюдения за временными вариациями амплитуды и доплеровского смещения частоты радиоволн на четырех декаметровых радиотрассах в течение частного (фаза около 0.8) солнечного затмения в Центральной Европе. Обнаружено заметное уширение доплеровских спектров и знакопеременные вариации доплеровского смещения частоты, вызванные затмением. Вариации амплитуд под действием затмения были незначительными. Результаты измерений и расчетов эффектов солнечного затмения хорошо соответствовали друг другу.

Ключевые слова: солнечное затмение, доплеровские спектры, доплеровское смещение частоты, амплитуда отраженного сигнала, радиоволны ВЧ диапазона, наклонные радиотрассы

1. Введение

Известно, что солнечное затмение (СЗ) сопровождается значительными изменениями параметров среды и геофизических полей в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ). СЗ вызывает охлаждение атмосферного газа, уменьшение давления воздуха, генерацию волн плотности газа, уменьшение концентрации электронов во всех областях ионосферы, уменьшение температур электронов и ионов в ионосфере, а также другие процессы (см., например, [1-7]).

Возмущение параметров среды приводит к значительному изменению свойств атмосферно-ионосферного канала распространения радиоволн и существенным вариациям характеристик радиоволн различных диапазонов (см., например, [8-12]).

В целом регулярные эффекты солнечных затмений в системе ЗАИМ и их влияние на канал распространения радиоволн изучены более или менее хорошо. Значительно хуже дело обстоит с исследованием нерегулярных эффектов в системе ЗАИМ и их проявлений в вариациях характеристик радиоволн различных диапазонов.

С одной стороны, прохождение солнечной тени должно сопровождаться развитием гидродинамических неустойчивостей, турбулизацией атмосферного газа и ионосферной плазмы, генерацией волновых возмущений и т. п. С другой стороны, особенности нерегулярных эффектов в системе ЗАИМ, сопровождающих СЗ, зависят от активности Солнца, состояния космической погоды, времени суток и т. д.

По указанным причинам исследование эффектов СЗ в системе ЗАИМ и обусловленных затмением вариаций характеристик радиоволн остается актуальной задачей.

Целью настоящей работы является изложение результатов экспериментальных исследований вариаций доплеровских спектров, доплеровского смещения частоты (ДСЧ) и амплитуды отраженных от ионосферы радиоволн на наклонных декаметровых радиотрассах различной протяженности и ориентации.

2. Общие сведения о затмении

Затмение диска Солнца диском Луны 4 января 2011 г. начало наблюдаться на восходе светила в Северо-Западной Африке, в центре Алжира,

в 06:40 (здесь и далее всемирное время UT). В Марокко главная фаза СЗ, равная 0.37, имела место в 07:38. Затем лунная тень перемещалась по всей Европе и, в частности, двигалась через Испанию, Францию, Германию, Польшу, Беларусь, Россию и Украину. Максимальная фаза затмения (0.86) имела место в Северной Европе. Из Европы тень переместилась в Азию. Крайне незначительным СЗ было в Пакистане (главная фаза, равная 0.09, наблюдалась в 09:46). Затмение закончилось на востоке Казахстана в 11:01.

В Германии, Польше и Украине главная фаза затмения была практически одинаковой и составляла около 0.8, а функция покрытия диска $A_{\max} \approx 0.7$.

3. Состояние космической погоды

Состояние космической погоды контролировалось при помощи данных, получаемых на ИСЗ (ACE, GOES-8, GOES-12) и в мировых центрах сбора наземных геомагнитных данных, а именно WDC-C2 в Киото, Япония (D_{st} -индекс) и AFWA, США (K_p -индекс).

Опишем кратко состояние космической погоды в период с 1 по 5 января 2011 г., которое удобно представлять в терминах временных вариаций концентрации, скорости, температуры и давления солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, энергетической функции Акасофу ϵ , а также индексов магнитной активности (K_p и D_{st}).

С 1 по 5 января значения плотности, скорости, температуры и давления солнечного ветра не превышали соответственно $1.5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$, 420 км/с, $1.3 \cdot 10^5 \text{ К}$ и 4 нПа. Всплески ϵ не превышали 6 ГДж/с. Затмению предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс K_p изменялся от 0 до 3). Компонента межпланетного магнитного поля B_z хаотически варьировалась в пределах $\pm(5 \div 6)$ нТл. Малосущественными были флуктуации уровня компоненты B_z (около $\pm(4 \div 6)$ нТл). Значения индекса D_{st} также хаотически флуктуировали в пределах $\pm(10 \div 15)$ нТл.

В качестве контрольного дня выбран день 22 декабря 2010 г. Он был исключительно спокойным. Значения плотности, скорости, температуры и давления солнечного ветра не превышали соответственно $3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, 340 км/с, $3 \cdot 10^4 \text{ К}$ и 0.4 мПа. Компонента B_z изменялась в пределах $\sim (1 \div 2)$ нТл. Индекс D_{st} варьиро-

вался от ~ 2 до ~ 10 нТл. Значения K_p -индекса равнялись 0 и 0⁺.

Таким образом, можно утверждать, что день затмения, 4 января 2011 г., и контрольный день, 22 декабря 2010 г., были спокойными. Это обстоятельство существенно облегчало идентификацию возмущений, вызванных откликом средней ионосферы на СЗ.

Состояние ионосферы над регионом частного затмения с фазой около 0.8 контролировалось при помощи ионозонда "Базис" (вблизи с. Гайдары, Украина географические координаты: 49°36' с. ш. 36°18' в. д.), ионозонда DPS-4 (вблизи с. Юлиусрух (Juliusruh), Швеция, географические координаты: 58°38' с. ш., 13°32' в. д.) и ионозонда DPS-4 (вблизи с. Прухониц (Pruhoniце), Чехия, географические координаты: 50° с. ш., 14°36' в. д.). Заметим, что ионозонды, расположенные вблизи с. Гайдары и с. Прухониц, находятся примерно на одной и той же широте, а ионозонды, дислоцирующиеся возле с. Прухониц и с. Юлиусрух, находятся примерно на одной и той же долготе.

4. Средства и методы

Для измерения ДСЧ и амплитуды отраженного сигнала (АОС) использовался приемный программно-аппаратный комплекс, описанный в работе [13]. Его основные параметры следующие: диапазон рабочих частот 1 ÷ 31 МГц, нестабильность частоты ~ 0.01 Гц, разрешающая способность по частоте ~ 0.01 Гц. Комплекс расположен в обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (вблизи с. Граково Харьковской области, Украина, географические координаты: 49°39' с. ш., 36°56' в. д.).

Для изучения ионосферных эффектов СЗ и их влияния на характеристики радиоволн выбраны четыре радиотрассы. Первые две – слабо наклонные, Гайдары – Граково, на частотах f , равных 3.2 и 4.2 МГц. Радиоволны с такими частотами отражались на высотах 145 ÷ 160 и 190 ÷ 215 км соответственно. Это позволило изучить эффекты СЗ в F-области ионосферы. В качестве источника сигналов на частотах 3.2 и 4.2 МГц использовался доплеровский ВЧ радар, расположенный в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (вблизи с. Гайдары Харьковской области, Украина, географические координаты: 49°38' с. ш.,

36°20' в. д.). Расстояние между радиопередающим и радиоприемным устройствами R , Гайдары – Граково, составляет около 50 км.

Для исследования эффектов СЗ в Е-области ионосферы выбраны две сильно наклонные радиотрассы. В качестве источника взяты радиосигналы вещательных декаметровых радиостанций, передатчики которых расположены приблизительно на той же широте, что и приемный комплекс. Радиостанция, вещающая на частоте $f \approx 6.005$ МГц, находится на территории ФРГ в г. Калл (Kall) с географическими координатами: 50°28' с. ш., 06°31' в. д.; передатчик имеет мощность $P \approx 100$ кВт и находится на расстоянии $R \approx 2100$ км от приемного комплекса. Вещание на частоте $f \approx 6.075$ МГц в рассматриваемый период осуществлялось с помощью передатчика, размещенного в Англии в г. Скелтон (Skelton) с географическими координатами: 54°44' с. ш., 02°54' в. д.; мощность передатчика $P \approx 300$ кВт, а $R \approx 2600$ км. Середина однокачковых радиотрасс Калл – Граково и Скелтон – Граково находится над Польшей.

5. Результаты наблюдений

Вариации доплеровских спектров. Временные вариации доплеровских спектров (ДС) в день СЗ и в контрольный день приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что в контрольный день на слабо наклонных трассах (частоты 3.2 и 4.2 МГц) спектры были практически одноמודовыми. На большей частоте ДС лишь слегка “размыты”. На сильно наклонных трассах, которым соответствовали частоты 6.005 и 6.075 МГц, ДС существенно “размывались”, особенно в интервале времени с 07:00 до 10:00. Ширина ДС достигла 1.5 Гц, но основная энергия концентрировалась в полосе частот 0.3÷0.5 Гц.

В день СЗ поведение ДС было иным. До начала затмения ДС на частотах 3.2 и 4.2 МГц были практически одноמודовыми. Вблизи главной фазы СЗ ширина ДС достигала 1 и 1.3 Гц соответственно. Это продолжалось не менее 1 ч (примерно до 09:50). ДС оставались отчасти “размытыми” и после окончания затмения в течение около 2 ч. На радиотрассах с частотами 6.005 и 6.075 МГц ДС были “размытыми” в течение всего времени наблюдений. Наибольшее уширение спектров имело место в интер-

вале времени с 08:30 до 10:00. Ширина спектров при этом достигала 1.2 Гц. Достаточно уверенно наблюдались две моды, одной из которых соответствовало ДСЧ, равное нулю.

Далее опишем временные вариации составляющей в ДС, имеющей наибольшую энергию. Такие вариации именуется вариациями ДСЧ.

Вариации ДСЧ и АОС. Здесь и далее описываются временные вариации ДСЧ и АОС, усредненные по тридцати минутам.

Временные зависимости ДСЧ и АОС на частоте 3.2 МГц в контрольный день и день затмения показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что в день СЗ изменения во времени ДСЧ и АОС в целом были достаточно нерегулярными.

Усредненные значения ДСЧ изменялись во времени следующим образом. До начала СЗ значение ДСЧ было около 0.085 Гц. После 07:20 оно постепенно уменьшалось и достигло примерно -0.02 Гц в интервале времени 08:10 – 08:30. Около 08:35 ДСЧ равнялось нулю. Затем оно стало положительным и достигло максимального значения около 0.08 Гц в интервале времени 09:40 – 09:55. Вблизи 10:30 ДСЧ снова стало равным нулю, далее усредненные значения ДСЧ флуктуировали в пределах 0.02÷0.04 Гц.

Поведение усредненных значений АОС было следующим. Примерно за 1 ч до начала СЗ амплитуда медленно уменьшалась от $1.6 \cdot 10^4$ о. е. примерно в два раза. Уменьшение с такой же скоростью продолжалось до 08:10. С 08:10 до 08:50 имело место увеличение АОС от $4 \cdot 10^3$ до $8 \cdot 10^3$ о. е. Далее в течение примерно 50 мин амплитуда оставалась неизменной. После 09:40 наблюдалось медленное уменьшение АОС от $6 \cdot 10^3$ до $(3 \div 4) \cdot 10^3$ о. е.

В контрольный день усредненное поведение ДСЧ во времени было более монотонным. В частности, отсутствовало уменьшение ДСЧ в интервале времени 08:00 – 08:30 и его заметное увеличение в интервале времени 09:20 – 10:10.

Временные вариации АОС в контрольный день и день СЗ отличались в целом незначительно, за исключением интервалов времени 08:10 – 09:40 и 09:40 – 10:30. В первом интервале амплитуда в контрольный день составляла $(3.5 \div 4) \cdot 10^3$ о. е., а в день СЗ – $(7 \div 8) \cdot 10^3$ о. е., т. е. была примерно вдвое больше. Во втором интервале в контрольный день амплитуда была $(4 \div 6) \cdot 10^3$ о. е., а в день СЗ – $(3 \div 4) \cdot 10^3$ о. е., т. е. в 1.3÷1.5 раза меньше.

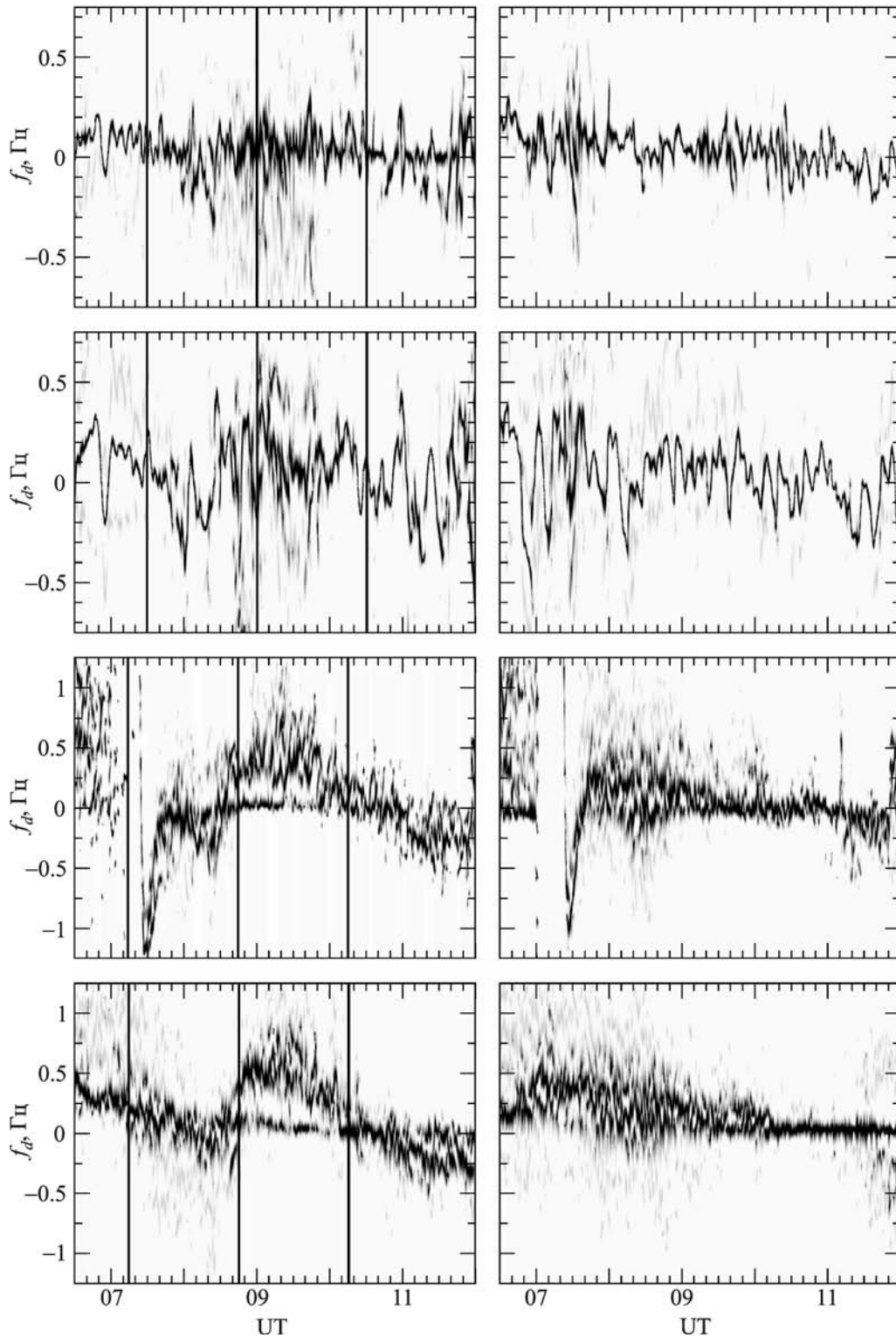


Рис. 1. Временные вариации ДС в день затмения 4 января 2011 г. (левые панели) и в контрольный день 22 декабря 2010 г. (правые панели) на частотах 3.2, 4.2, 6.005 и 6.075 МГц (панели сверху вниз). Здесь и далее вертикальные линии показывают моменты начала, главной фазы (около 08:45 для сильно наклонных трасс и около 09:00 для слабо наклонных трасс) и окончания затмения вблизи вершины траектории радиоволны

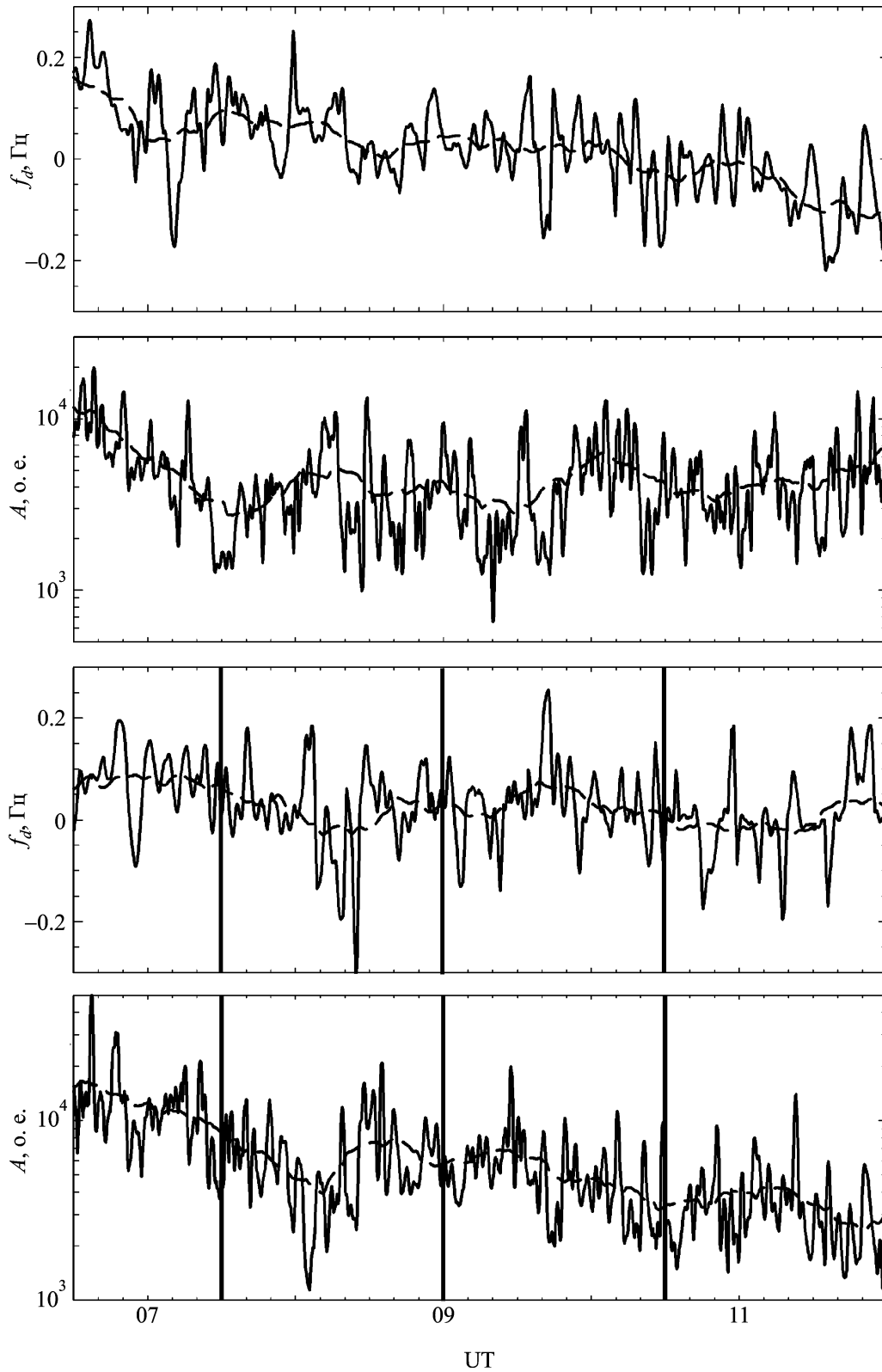


Рис. 2. Временные вариации ДСЧ и АОС на частоте 3.2 МГц в контрольный день 22 декабря 2010 г. (верхние панели) и в день затмения (нижние панели). Здесь и на последующих рисунках пунктиром показаны результаты усреднения на интервале времени 30 мин

Временные вариации ДСЧ и АОС на частоте 4.2 МГц показаны на рис. 3. Обе характеристики радиоволны сильно флуктуировали во времени. В день СЗ за 1 ч до его начала ДСЧ в среднем составляло около 0.1 Гц. Примерно с 07:20 и до 08:10 имело место уменьшение ДСЧ от 0.1 до -0.15 Гц. Затем ДСЧ увеличивалось в течение 30 мин от -0.1 до 0.075 Гц. Последующие 100 мин ДСЧ незначительно флуктуировало в пределах $0.06 \div 0.11$ Гц. Примерно после 10:30 ДСЧ стало отрицательным. До начала затмения АОС в среднем равнялась $2 \cdot 10^4$ о. е. В интервале времени 07:40 – 09:00 она уменьшалась от $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^3$ о. е. Далее в течение примерно 100 мин амплитуда незначительно изменялась (от $2 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^3$ о. е.).

В контрольный день ДСЧ в среднем варьировалось незначительно, от -0.05 до 0.1 Гц. Средние значения АОС были близки к 10^4 о. е.

Опишем далее временные вариации ДСЧ и АОС на сильно наклонных радиотрассах.

На частоте 6.005 МГц (рис. 4) ДСЧ на стадии покрытия диска Солнца было отрицательным (около -0.2 Гц). После 08:30 оно становится положительным. Максимальное значение ДСЧ, равное 0.4 Гц, имело место в 09:37.

Поведение АОС было следующим. Примерно до 08:40 она равнялась $1.8 \cdot 10^4$ о. е. С 08:40 и до 10:50 АОС в основном убывала от 10^4 до $6 \cdot 10^2$ о. е. Далее она варьировалась незначительно.

В контрольный день на частоте 6.005 МГц поведение ДСЧ было иным. В интервале времени 08:00 – 10:00 оно было положительным и постепенно уменьшалось от 0.2 до 0 Гц. Далее примерно в течение двух часов ДСЧ флуктуировало возле 0 Гц.

АОС практически монотонно уменьшалась от $2 \cdot 10^4$ до 10^3 о. е. с 08:00 до 11:00.

На частоте 6.075 МГц (рис. 5) до начала затмения ДСЧ уменьшалось от 0.4 до 0 Гц. На стадии покрытия диска Солнца ДСЧ постепенно уменьшалось от 0.16 до -0.03 Гц. Минимальное значение ДСЧ наблюдалось в интервале времени 08:10 – 08:20. Далее ДСЧ увеличивалось и достигло максимального значения, равного 0.46 Гц около 09:20. Затем оно постепенно уменьшалось от 0.46 до -0.30 Гц. Последнее имело место в интервале 11:30 – 11:40.

АОС на частоте 6.075 МГц с 06:30 до 12:00, незначительно флуктуируя, уменьшилась от $2 \cdot 10^7$ до $7 \cdot 10^4$ о. е.

В контрольный день ДСЧ с 06:30 до 07:15 увеличивалось от 0.10 до 0.35 Гц, а затем медленно убывало от 0.35 до 0 Гц. В интервале времени 10:20 – 12:20 ДСЧ было близко к нулю.

АОС в интервале времени 06:30 – 07:40 слабо изменялась. Затем имело место практически монотонное убывание в течение четырех часов усредненных значений АОС от $6 \cdot 10^6$ до 10^5 о. е.

6. Результаты расчетов

Основные соотношения для ДСЧ. Исходя из определения ДСЧ для радиоволны с траекторией s , имеем:

$$f_d(t) = -\frac{f}{c} \frac{dL_p}{dt} = -\frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_s n(s) ds, \quad (1)$$

где $L_p = \int_s n(s) ds$ – фазовый путь, n – показатель преломления, c – скорость света в вакууме, f – частота радиоволны.

Поскольку $L_p = L_p(n)$, $n = n(N)$, $N = N(A(t))$, где N – концентрация электронов, $A(t)$ – функция покрытия диска Солнца, из (1) следует, что

$$f_d(t) = -\frac{f}{c} \frac{dL_p}{dn} \frac{dn}{dN} \frac{dN}{dA} \frac{dA}{dt}.$$

Всегда $dL_p/dn > 0$. Для плазмы $dn/dN < 0$, при затмении $dN/dA < 0$. Поэтому знак f_d определяется знаком dA/dt . До начала СЗ, в момент его главной фазы и после окончания СЗ $dA/dt = 0$. До наступления главной фазы $dA/dt > 0$, $f_d < 0$, после нее – $dA/dt < 0$, $f_d > 0$. Максимальное по модулю значение ДСЧ имеет место в моменты времени t_0 , когда модуль произведения $|(dN/dA)(dA/dt)|$ достигает максимума. Таких момента два: при $t_0 = \tau/4$ и $t_0 = 3\tau/4$, где τ – продолжительность затмения. При $\tau \approx 180$ мин, $\tau_0 \approx 45$ мин и $t_0 \approx 135$ мин.

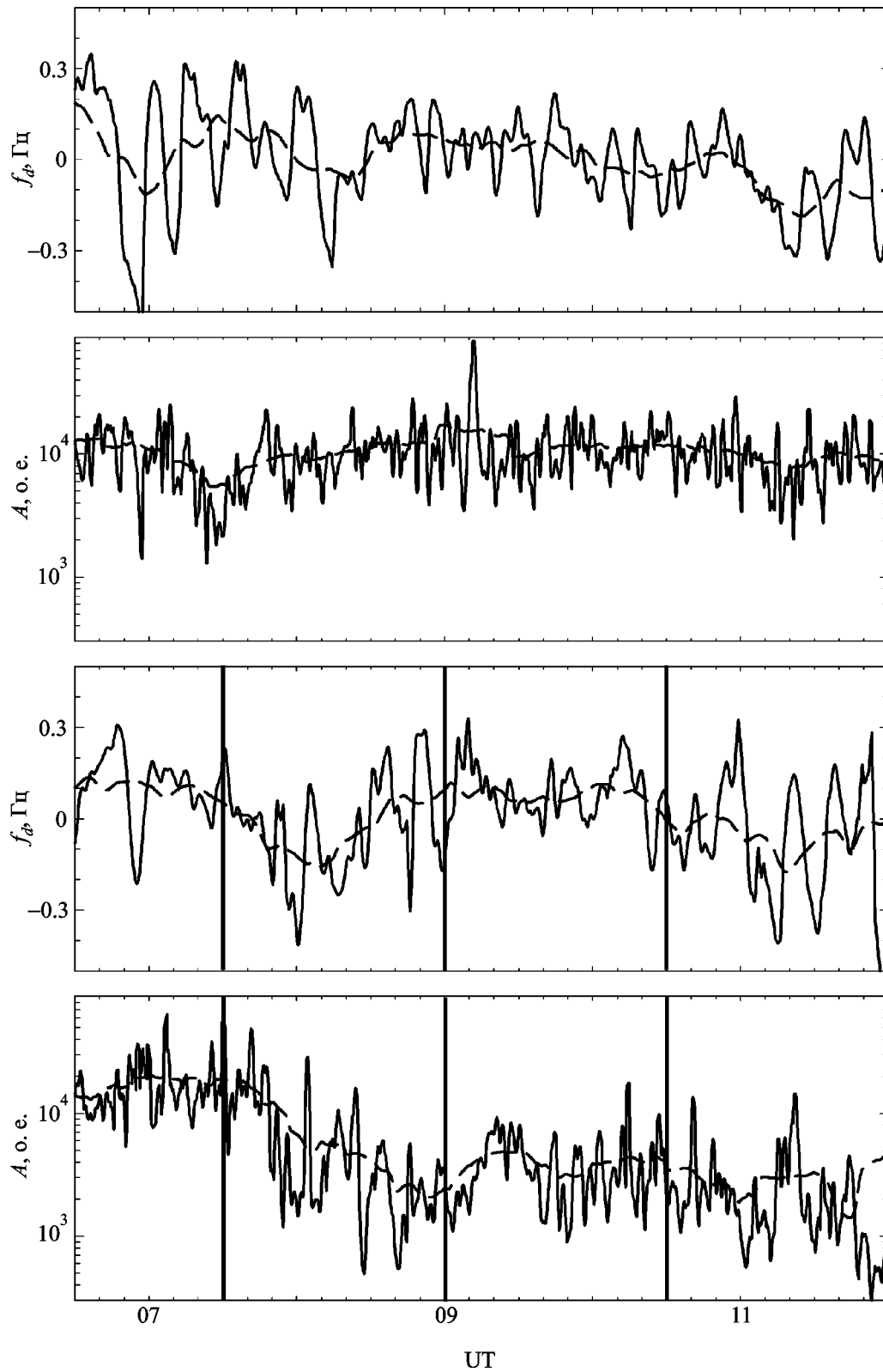


Рис. 3. Временные вариации ДСЧ и АОС на частоте 4.2 МГц в контрольный день 22 декабря 2010 г. (верхние панели) и в день затмения (нижние панели)

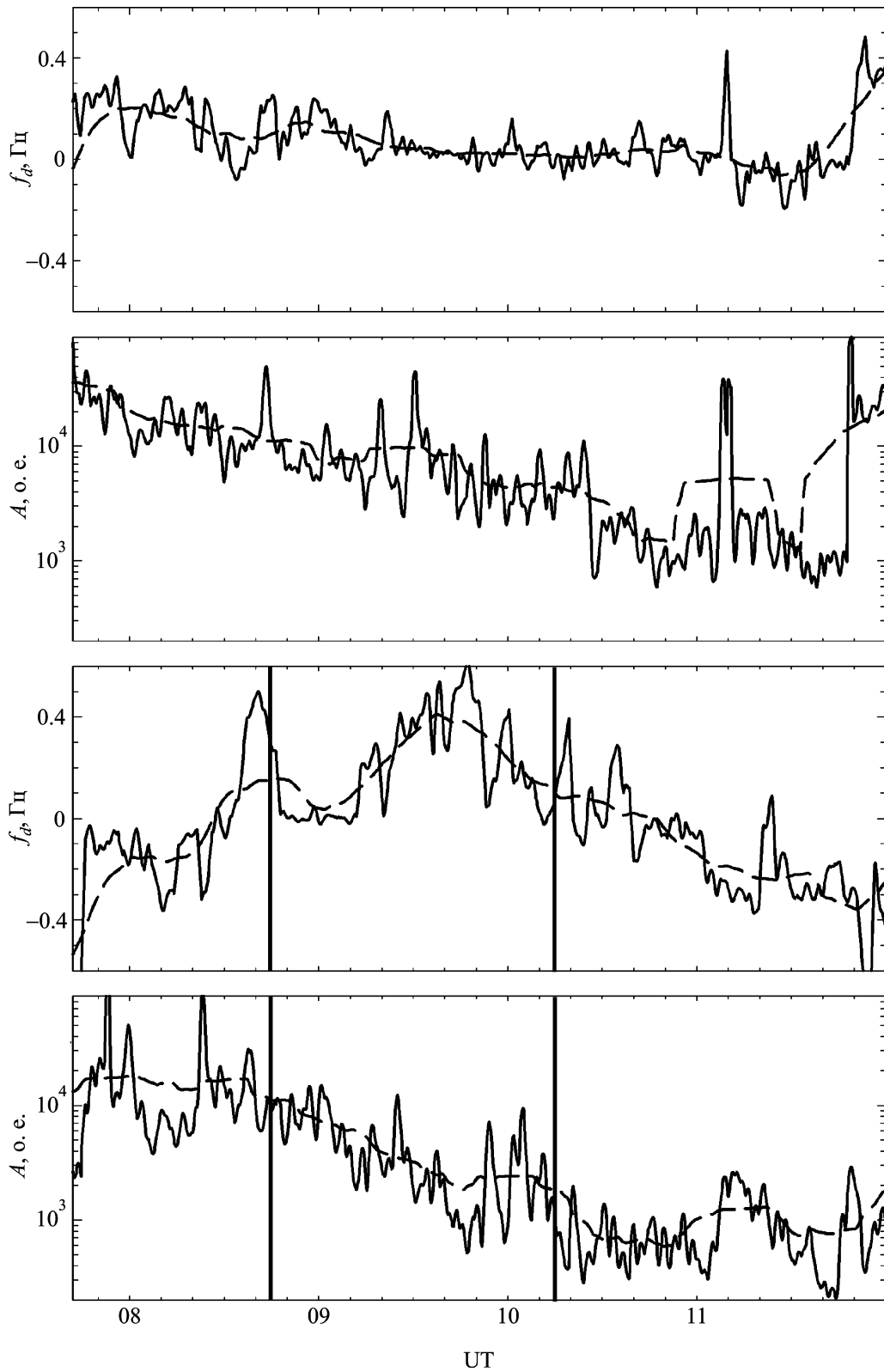


Рис. 4. Временные вариации ДСЧ и АОС на частоте 6.005 МГц в контрольный день 22 декабря 2010 г. (верхние панели) и в день затмения (нижние панели). Вертикальные линии показывают моменты главной фазы и окончания затмения

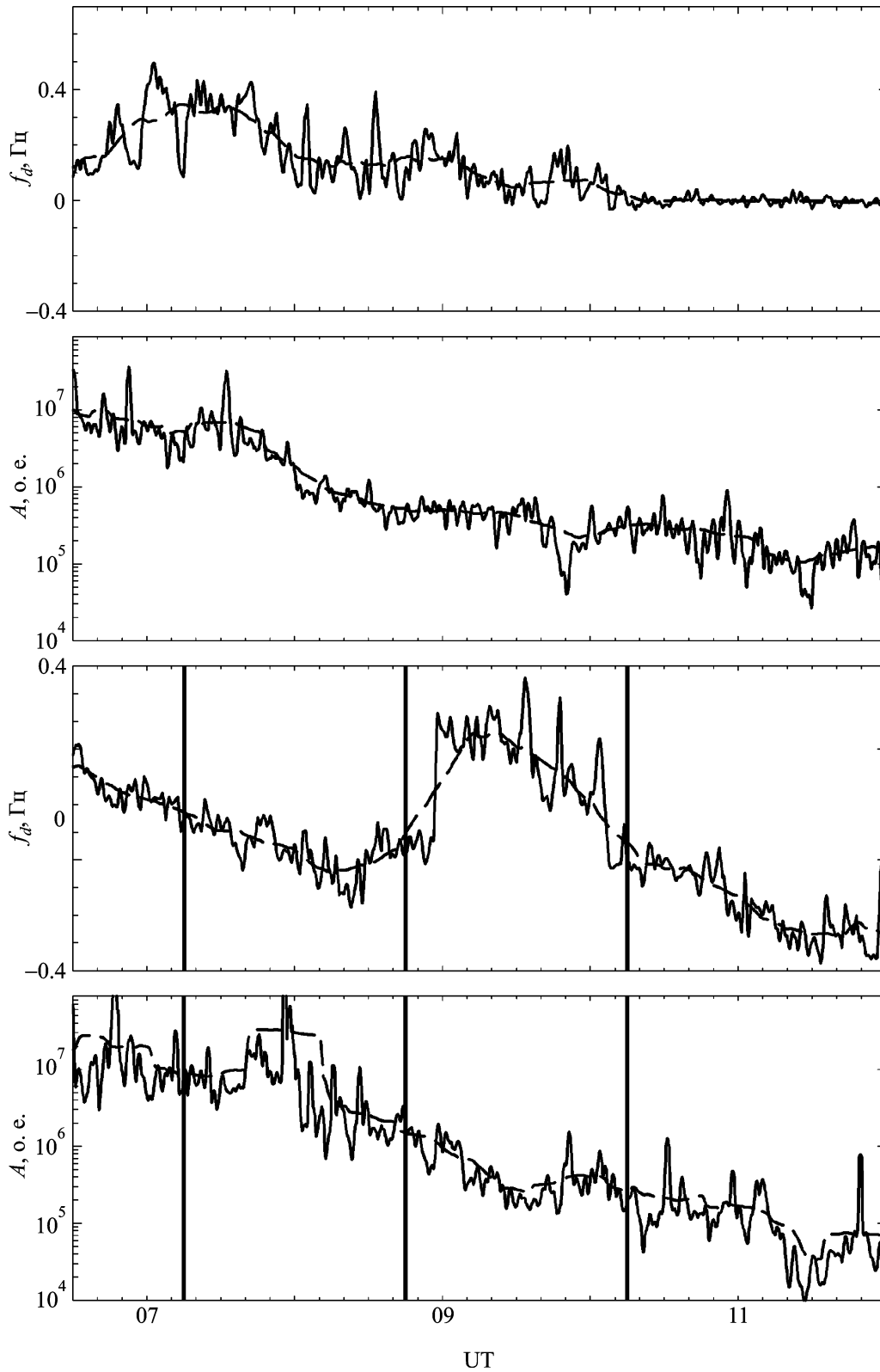


Рис. 5. Временные вариации ДСЧ и АОС на частоте 6.075 МГц в контрольный день 22 декабря 2010 г. (верхние панели) и в день затмения (нижние панели)

Таким образом, в стационарных условиях (когда в отсутствие СЗ $N \neq N(t)$) следует ожидать, что затмение приведет сначала к уменьшению f_d до $f_{d\min} = f_d(\tau/4)$, затем к его увеличению, обращению в нуль при $t = \tau/2$, дальнейшему росту и достижению $f_{d\max} = f_d(3\tau/4)$ с последующим уменьшением до нуля. Если фоновые значения N зависят от времени, зависимость $f_d(t)$ становится более сложной, что обычно и наблюдается в действительности.

При линейном законе изменения концентрации электронов N от высоты z и вертикальной трассы из (1) можно получить следующее приближенное выражение [11, 12]:

$$\Delta f_d = \frac{8}{3} f \frac{L_{N0}}{c\Delta t} \frac{\Delta N}{N_0}, \quad (2)$$

где $L_{N0} = N(dN/dz)^{-1}$ – вертикальный масштаб изменения N ; Δt – продолжительность изменения ДСЧ на величину Δf_d ; $\Delta N/N_0$ – относительное возмущение N ; N_0 – невозмущенная концентрация электронов.

С использованием ионограммы вертикального зондирования было установлено, что в начале СЗ радиоволны с частотами 3.2, 4.2 МГц на слабо наклонной трассе и 6.075 МГц на сильно наклонной трассе отражались на высотах около 145, 190 и 95 км соответственно. На этих высотах масштаб L_{N0} принимал значения около 45, 45 и 4 км соответственно.

Возмущение концентрации электронов, вызванное СЗ. Для расчета Δf_d необходимо вычислить $\Delta N/N_0$.

В верхней части D-области, в E-области и нижней части (до 170 ÷ 180 км) F-области ионосферы справедлив квадратичный закон рекомбинации (см., например, [13]). При выполнении условия квазистационарности ($dN/dt \approx 0$) имеем

$$N/N_0 = \sqrt{1 - A}.$$

Учитывая, что минимальное значение ДСЧ имело место примерно через $\Delta t = 40 \div 50$ мин после начала СЗ, $A \approx A_{\max}/2$. Для выбранных трасс $A_{\max} \approx 0.70$. При этом для квадратичного закона рекомбинации $N/N_0 \approx 0.81$,

$\Delta N/N_0 = N/N_0 - 1 = -0.19$. При $A = A_{\max}$ имеем $N/N_0 \approx 0.55$, $\Delta N/N_0 \approx -0.45$.

На высотах 180 ÷ 250 км, где градиент потока частиц плазмы мал, локально справедлив линейный закон рекомбинации (см., например, [13]). Тогда при $A \approx A_{\max}/2$ для квазистационарных условий имеем

$$\Delta N/N_0 = 1 - A_{\max}/2 \approx 0.65.$$

При этом $\Delta N/N_0 = -0.35$. В момент наступления главной фазы $A = A_{\max}$. Тогда $N/N_0 \approx 0.30$, $\Delta N/N_0 \approx -0.70$.

Приведенные данные позволяют теоретически оценить максимальное изменение ДСЧ Δf_{dt} и сравнить его с экспериментально полученным значением Δf_{de} . Результаты сравнения для $\Delta t = \tau/4$ приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что значения оценок, полученные с использованием (2), и эксперимента хорошо соответствуют друг другу.

Наклонные радиотрассы. Для наклонных трасс в формуле (2) характерный масштаб L_{N0} следует заменить на $L_N = L_{N0}/\sin \alpha$, где α – угол между радиолучом на входе в ионосферу и горизонтально. Для слабо наклонных трасс $\alpha \approx 90^\circ$ и $L_N \approx L_{N0}$. Для сильно наклонных трасс $\alpha \approx 2z_r/R$, где z_r – высота отражения радиоволны, R – расстояние между радиопередатчиком и радиоприемным устройствами.

Для радиотрассы с $f = 6.075$ МГц высоту отражения z_r можно оценить исходя из закона

Таблица 1. ДСЧ, продолжительность убывания ДСЧ на различных трассах и параметры среды

f , МГц	3.2	4.2	6.075
f_{de} , Гц	-0.10	-0.25	-0.19
f_{dt} , Гц	-0.10	-0.24	-0.18
Δt , мин	40	40	50
L_N , км	45	45	55
$\Delta N/N_0$	-0.215	-0.355	-0.19
$\Delta N_{\max}/N_0$	-0.43	-0.71	-0.45
$2K_0$	0.37	0.25	0.8
$2K$	0.16	0.11	0.34
$\Delta A/A_0$	0.24	0.16	0.61

Снеллиуса для сферически слоистых сред. Условие отражения радиоволны в плазменной изотропной сферически слоистой среде (ионосфере) имеет вид (см., например, [14, 15]):

$$f = \frac{f_p(z_r)}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_e}{R_e + z_r} n_0 \cos \alpha \right)^2}}, \quad (3)$$

где R_e – радиус Земли, f_p – плазменная частота, $n_0 \approx 1$ – показатель преломления на границе ионосферы. При $z_r \ll R_e$ и $\alpha \ll 1$ из (3) получаем следующее приближенное (с точностью до членов второго порядка малости) соотношение для вычисления z_r :

$$f_p(z_r) \approx f \sqrt{2 \frac{z_r}{R_e} + \left(2 \frac{z_r}{R} \right)^2 - 3 \left(\frac{z_r}{R_e} \right)^2}. \quad (4)$$

Для $f = 6.075$ МГц, $R \approx 2600$ км из (4) имеем, что до СЗ $z_r = z_{r0} \approx 95$ км, $f_p(z_{r0}) \approx 1.1$ МГц. В течение затмения N и f_p уменьшались (см. выше). Это приводило к увеличению z_r примерно до 100 км.

Уширение ДС. Далее опишем возможный механизм уширения ДС. При рассеянии радиоволн плазменными неоднородностями имеет место уширение ДС. Ширина спектра при этом может быть оценена из соотношения [10, 11]:

$$\sigma_f = \beta \frac{f}{c\tau_t} \tilde{\sigma}_N \sqrt{L_t l},$$

где β – коэффициент, зависящий от формы профиля $N_0(z)$; $\tilde{\sigma}_N^2 = (\delta N/N_0)^2$ – относительная интенсивность флуктуаций N_0 ; L_t – толщина турбулентного слоя; l – размер эффективно рассеивающих неоднородностей; τ_t – характерное время существования неоднородностей.

При брэгговском рассеянии $l = \lambda/2$, где λ – длина радиоволны, отраженной от ионосферы. Предположим, что уширение ДС вызвано распадом случайных неоднородностей N . Характерное время распада неоднородностей $\tau_t = l^2/D$. Здесь $D = D_t + D_a$, D_t и D_a – коэффициен-

ты турбулентной и амбиполярной диффузии. На высотах до 100÷110 км их распад обусловлен турбулентной диффузией. При этом коэффициент турбулентной диффузии D_t на этих высотах порядка 10^3 м²/с. Время “расплавания” неоднородностей $\tau_t = l^2/D = \lambda^2/4D_t \approx 0.6$ с для $l \approx 25$ м. С турбулентной диффузией связано уширение ДС для радиоволны с частотой 6.075 МГц, которая отражалась на высотах $z \leq 100$ км.

Уширение ДС на частотах 3.2 и 4.2 МГц обусловлено “расплаванием” плазменных неоднородностей за счет процесса амбиполярной диффузии. На высотах $z \approx 120 \div 200$ км коэффициент амбиполярной диффузии $D_a \approx 10^3 \div 10^5$ м²/с. Тогда $\tau_t \approx 0.004 \div 0.1$ с.

Результаты расчета σ_f для различных трасс приведены в табл. 2. Видно, что $\sigma_f \approx 1.0 \div 1.3$ Гц. Примерно такие же значения σ_f наблюдались экспериментально.

Вариации АОС. Оценим изменение амплитуды принимаемого сигнала. Модельные расчеты показали, что в отсутствие СЗ интегральный коэффициент поглощения при двухкратном прохождении слоя ионосферы $2K_0$ составлял 0.37, 0.25 и 0.80 для трасс с частотами 3.2, 4.2 и 6.075 МГц соответственно (см. табл. 1). Вблизи момента наступления главной фазы

$$2K = 2K_0 (\Delta N/N_0)_{\min}.$$

Тогда относительное изменение АОС

$$\Delta A/A_0 = e^{2(K_0 - K)} - 1.$$

Таблица 2. Параметры радиоволны и турбулентности

f , МГц	3.2	4.2	6.075
z_{r0} , км	145	190	95
z_r , км	160	215	100
D , м ² /с	$8 \cdot 10^3$	10^4	10^3
τ_t , с	0.28	0.13	0.62
L_t , км	10	10	100
$\tilde{\sigma}_N$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
σ_f , Гц	1	1.3	1.2

Результаты расчета $\Delta A/A_0$ приведены в табл. 1. Видно, что для слабо наклонных радиотрасс относительные изменения АОС не превышают нескольких десятков процентов, а для сильно наклонных трасс – 60 %.

Добавим, что при расчетах $2K$ для частоты 4.2 МГц учитывалось, что основное поглощение радиоволны имело место на высотах нижней ионосферы, где уменьшение N не превышало 45 % (см. табл. 1).

7. Обсуждение

Значительное уширение ДС в день затмения объясняется усилением многолучевости из-за интенсификации атмосферной и плазменной турбулентностей.

Экспериментальные зависимости ДСЧ от времени для всех радиотрасс в среднем соответствовали теоретическим представлениям об изменениях $f_d(t)$, описанным выше. Естественно, что на усредненный временной ход $f_d(t)$ накладывались нерегулярные вариации, связанные с волновыми возмущениями N в ионосфере.

Рассчитанные значения ДСЧ f_{dt} и экспериментально наблюдаемые значения ДСЧ f_{de} хорошо согласуются между собой (см. табл. 1). Это, в частности, означает, что СЗ действительно вызвало уменьшение N примерно на 19 и 35 % в момент времени $\tau/4$ после начала затмения на высотах Е- и нижней части F-области, а также в средней части F-области ионосферы соответственно. Вблизи главной фазы эти уменьшения составили 45 и 70 % соответственно (см. табл. 1).

Изменения АОС в течение затмения уверенно обнаружить не удалось. Это объясняется следующим. С одной стороны, эти изменения были относительно небольшими, а с другой стороны, суточные вариации и флуктуации амплитуды были значительными (достигали порядка величины).

Можно утверждать, что временные вариации ДСЧ и ДС в основном были такими же, как и при наблюдении других затмений [4, 11, 12]. Естественно имели место количественные различия, связанные с состоянием космической погоды, временем наступления СЗ, выбором трасс и т. п.

8. Выводы

1. Наблюдения показали, что СЗ сопровождалось уширением ДС до $1 \div 1.3$ Гц.

2. Обнаружено, что затмение привело сначала к уменьшению ДСЧ на $0.10 \div 0.25$ Гц, а затем к его увеличению примерно на такую же величину на всех радиотрассах.

3. Из-за влияния многолучевости и, как следствие, замираний уровня радиосигнала не удалось надежно выявить в течение СЗ увеличение АОС, обусловленное уменьшением поглощения радиоволн.

4. Результаты измерений и расчетов доплеровского эффекта на всех радиотрассах хорошо соответствовали друг другу (отличались между собой на единицы процентов).

Литература

1. Salah J. F., Oliver V. L., Foster J. C., and Holt J. M. Observations of the May 30, 1984, annual solar eclipse at Millstone Hill // *J. Geophys. Res.* – 1986. – Vol. 91, No. A2. – P. 1651-1660.
2. Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., and Lesyuta O. S. Effects of August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2002. – Vol. 64, No. 18. – P. 1933-1941.
3. Le H., Liu L., Yul X., and Wan W. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling // *Ann. Geophys.* – 2008. – Vol. 26. – P. 107-116.
4. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.* – 2002. – № 2. – С. 25-63.
5. Акимов А. Л., Боговский В. К., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 2005. – Т. 45, №4. – С. 526-551.
6. Бурмака В. П., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2007. – № 3. – С. 38-53.

7. Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, №3. – С. 350-364.
8. Каримов Р. Р., Козлов В. И., Муллаяров В. А. Особенности вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 2. – С. 250-254.
9. Кашеев С. Б., Зализовский А. В., Колосков А. В., Галушко В. Г., Пикулик И. И., Ямпольский Ю. М., Куркин В. И., Литовкин Г. И., Орлов А. И. Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, №4. – С. 353-366.
10. Черногор Л. Ф. Вариации амплитуды и фазы ОНЧ радиоволн в ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2009 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2010. – Т. 50, №1. – С. 96-106.
11. Черногор Л. Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2010. – Т. 50, №3. – С. 361-376.
12. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики доплеровских спектров радиосигналов, отраженных от естественно-возмущенной ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, №1. – С. 24-38.
13. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
14. Яковлев О. Н., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г. Распространение радиоволн: Учебник / Под ред. О. Н. Яковлева. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – 496 с.
15. Черногор Л. Ф. Физика космоса и астрофизика: Учебное пособие. – Харьков: ХГУ им. А. М. Горького, 1990. – 136 с.

Радіофізичні ефекти сонячного затемнення 4 січня 2011 р. на похилих радіотрасах

К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Л. Ф. Черногор

Описано результати спостереження за часовими варіаціями амплітуди та доплерівського зсуву частоти радіохвиль на чотирьох декаметрових радіотрасах впродовж часткового (фаза близько 0.8) сонячного затемнення в Центральній Європі. Виявлено помітне розширення доплерівських спектрів і знакозмінні варіації доплерівського зсуву частоти, викликані затемненням. Варіації амплітуд під дією затемнення були незначними. Результати вимірювань і розрахунків ефектів сонячного затемнення добре відповідали одне одному.

January 4, 2011 Solar Eclipse Effects over Radio Circuits at Oblique Incidence

**K. P. Garmash, S. G. Leus,
and L. F. Chernogor**

Temporal variations in the amplitude and Doppler shift of frequency observed over four radio circuits during the partial (0.8 magnitude) solar eclipse in Central Europe are described. An appreciable widening of the Doppler spectra and alternating Doppler shifted frequency variations have been revealed to be due to the eclipse. The amplitude variations due to the eclipse were insignificant. Agreement between the measurements and the calculations of the effects is good.