

УДК 550.388

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЕ, СОПРОВОЖДАВШИЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ В ХАРЬКОВЕ 4 ЯНВАРЯ 2011 г.

© 2013 г. Л. Ф. Черногор

Учреждение МОН Украины Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина
e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 01.03.2011 г.
После доработки 15.02.2012 г.

Проанализированы аperiodические и квазипериодические вариации критической частоты слоя F_2 и доплеровского смещения частоты радиоволн на вертикальных трассах в день частного (фаза ~ 0.78) солнечного затмения и в фоновые дни. Относительное уменьшение концентрации электронов по данным эксперимента в E -области ионосферы составило 0.41 (по расчетам 0.46), в нижней части F -области ионосферы – 0.50 (по расчетам 0.53). На высоте главного максимума концентрации электронов относительное уменьшение концентрации электронов составляло 0.52 (по расчетам 0.51). Показано, что в день затмения и в фоновый день спектральные характеристики волновых возмущений в диапазоне высот 160–240 км заметно отличались. Изменения спектрального состава начинались через 30 мин после наступления затмения и в зависимости от периода продолжались от 2 до 4 ч. Результаты расчетов основных параметров среды и сигнала соответствуют результатам наблюдений.

DOI: 10.7868/S0016794013010057

1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферно-ионосферные эффекты солнечных затмений (СЗ) исследуются уже десятки лет. Особенно активно они изучаются с 1970-х гг. (см., например, спецвыпуски [Eclipse..., 1970; Special..., 1972]). Глубина исследований определялась уровнем развития экспериментальной базы и аэрономических знаний. Качественно иной, и более глубокий уровень исследований, начался после осознания того факта, что процессы, вызываемые СЗ, необходимо рассматривать с позиций системного подхода. Объектом исследования при таком подходе служит система Солнце–межпланетная среда–магнитосфера–ионосфера–атмосфера–Земля (ее внутренние оболочки) [Черногор, 2003; Chernogor and Rozumenko, 2008; Chernogor, 2011].

Оказалось, что СЗ сопровождаются значительными изменениями параметров среды, начиная от поверхности Земли и заканчивая магнитосферой, а также геофизических полей в упомянутой системе. В результате этих изменений в системе происходит перестройка подсистем и их взаимодействий. Важно, что реакция системы на СЗ существенно зависит от состояния космической и атмосферной погоды, от сезона и времени наступления затмения. Поэтому изучение реакции околоземной среды на СЗ остается актуальной задачей. Можно утверждать, что изучение динамических процессов при каждом новом затмении позволяет продвинуться в понимании возникающего комплекса физических явлений.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдения аperiodических и квазипериодических (волновых) процессов в ионосфере, сопутствовавших частному СЗ 4 января 2011 г., оценки их параметров и обсуждение связи этих процессов с затмением.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Сведения о солнечном затмении

В месте проведения измерений (вблизи г. Харькова) СЗ началось в 07:30, а закончилось в 10:29, главная фаза имела место в 08:59 (здесь и далее UT). Покрытие диаметра диска Солнца составляло 0.78. При этом функция покрытия диска $A_{\max} \approx 0.71$. Поскольку функция покрытия $A(t)$ изменялась от 0 до 0.71, а затем от 0.71 до 0, функция светимости $B(t) = 1 - A(t)$ сначала убывала от 1 до $B_{\min} \approx 0.29$, а затем увеличивалась от 0.29 до 1.

2.2. Состояние космической погоды

Состояние космической погоды удобно представлять в терминах временных вариаций концентрации, скорости, температуры и давления солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, энергетической функцией Акасофу ϵ , а также индексов магнитной активности (Kp и Dst). С 1 по 5 января флуктуации плотности, скорости, температуры и давления солнечного ветра не превышали соответственно $1.5 \times 10^7 \text{ м}^{-3}$, 420 км/с, $1.3 \times$

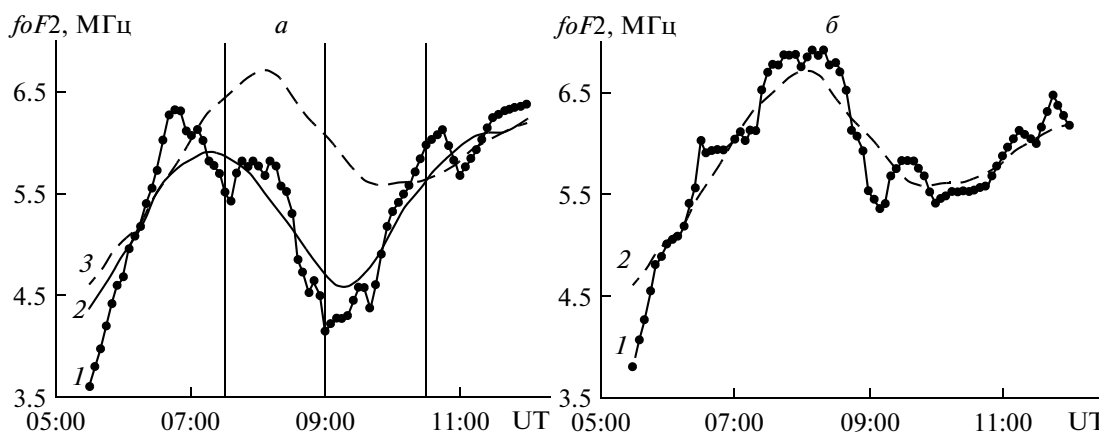


Рис. 1. Временные вариации критической частоты $foF2$ для 4 (а) и 5 (б) января 2011 г.: 1 – результаты измерения в 5 минутном режиме; 2 – результат скользящего усреднения на интервале 60 мин с шагом 5 мин. Штрихами (кривая 3) показаны ожидаемые значения критической частоты в отсутствие СЗ. Вертикальными линиями показаны моменты начала, главной фазы и окончания затмения.

$\times 10^5$ К и 4 нПа. Всплески ε достигали 6 ГДж/с. Затмению предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс Kp изменялся от 0 до 3). Компонента Bz хаотически изменялась в пределах $\pm(5-6)$ нТл. Малосущественными были флуктуации уровня Bu ($\pm(4-6)$ нТл). Значения индекса Dst также хаотически флуктуировали в пределах $\pm(10-15)$ нТл. 6 января в результате резкого увеличения параметров солнечного ветра началась магнитная буря с $Kp = 5$ и $Dst_{min} \approx -45$ нТл.

Можно утверждать, что день затмения, 4 января 2011 г., и контрольный день, 5 января 2011 г., были спокойными. Это обстоятельство существенно облегчало идентификацию возмущений, вызванных откликом средней ионосферы на СЗ.

3. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

3.1. Доплеровский ВЧ радар вертикального зондирования

Радар расположен в Радиофизической обсерватории вблизи г. Харькова (49°38' N, 36°20' E), Украина. Основные параметры радара, излучающего радиопульсы вертикально вверх, следующие: диапазон частот $f = 1-24$ 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 $G \approx 1-10$ в зависимости от частоты волны. Отношение сигнал/помеха q достигает 10^5-10^6 . Высотная протяженность отраженного сигнала существенно превышает $c\tau/2 \approx 75$ км (c – скорость света). Поэтому используется стробирование по высоте с дискретностью $\Delta z = 75$ км в диапазоне действующих вы-

сот $z' = 75-450$ км. Погрешность оценки доплеровского смещения частоты (ДСЧ) составляет $\sim 10^{-3}$ Гц при типичном значении $q = 10^3-10^2$ соответственно.

Для изучения вызванных СЗ вариаций критической частоты $foF2$ использовался ионозонд, расположенный рядом с доплеровским радаром.

3.2. Методы спектрального анализа

Для определения параметров квазипериодических процессов применялся системный спектральный анализ. Для этого использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП). Формат представления данных спектрального анализа такой же, как в работе [Черногор, 2008]. Как показано в статье [Черногор, 2008], ОПФ обладает лучшим разрешением по времени для достаточно больших периодов, а АПФ – по периоду. Результаты ВП наглядно демонстрируют динамику временных изменений спектров анализируемого сигнала.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Временные вариации критической частоты

Временные вариации критической частоты слоя $F2$ в день СЗ и в контрольный день показаны на рис. 1. Из рисунка 1 видно, что на регулярный ход $foF2$ накладывались аperiодические и квазипериодические вариации. Значения $foF2$ в среднем изменялись следующим образом. В день затмения с 05:30 до 07:20 $foF2$ увеличивалась. Затем до 09:15 она уменьшалась от 5.9 до 4.6 МГц. После 09:15 наблюдалось постепенное увеличение $foF2$ от 4.6 до 6.2 МГц. Минимальное значение $foF2 \approx$

≈ 4.6 МГц наблюдалось через 16.0 ± 1.4 мин после наступления главной фазы затмения.

В контрольный день регулярный ход $f_oF2(t)$ был следующим. С 05:30 до 08:00 имело место увеличение f_oF2 от 4.6 до 6.7 МГц. В интервале времени 08:00–10:30 наблюдалось монотонное убывание f_oF2 , за которым последовало его незначительное увеличение.

Таким образом, СЗ привело к длительному (примерно трехчасовому) уменьшению f_oF2 . Наибольшее уменьшение критической частоты $\Delta f_oF2 \approx 1.1$ –1.4 МГц наблюдалось в интервале времени 08:10–09:15. Этому соответствовало уменьшение концентрации электронов вблизи момента главной фазы на 52%.

В день СЗ амплитуда квазипериодических вариаций критической частоты δf_oF2 составляла 0.2–0.4 МГц в диапазоне периодов 30–60 мин.

В контрольный день $\delta f_oF2 \approx 0.1$ –0.2 МГц. Четко выраженных квазипериодических процессов не наблюдалось.

4.2. Временные вариации доплеровских спектров

Временные вариации ДС для 3, 4 и 5 января 2011 г. на частоте $f = 4.2$ МГц приведены на рис. 2. Из рисунка 2а видно, что 3 января ДС были практически одномодовыми, наблюдались квазипериодические вариации ДСЧ f_d с периодами $T \approx 10$ –20 мин и амплитудой $\delta f_{da} \approx 0.2$ –0.3 Гц. Иногда значения амплитуды достигали 0.5 Гц. 5 января ДС были также одномодовыми. В течение всего времени наблюдения ДСЧ изменялось по квазипериодическому закону с квазипериодом $T \approx 10$ –25 мин и амплитудой 0.1–0.2 Гц (см. рис. 2в). В интервале времени 06:50–07:30 амплитуда достигала 0.5 Гц. В день СЗ с 06:30 до 07:40 вариации ДСЧ были выражены слабо (см. рис. 2б). Примерно с 07:40 и до 08:30 ДСЧ стало отрицательным. Минимальное значение $f_d \approx -0.4$ Гц наблюдалось 07:57. В интервале времени 08:20–08:35 ДСЧ было близко к нулю. Примерно с 08:20 и до 08:50 наблюдались две моды. Максимальная разность ДСЧ для этих мод достигала 1 Гц. Затем с 08:45 и до 10:15 f_d было преимущественно положительным. После 10:05 наблюдались квазипериодические вариации ДСЧ с $T \approx 10$ мин $f_{da} \approx 0.2$ Гц. Примерно с 10:10 и до 11:40 постоянная составляющая ДСЧ была близка к нулю. В интервале времени 11:50–12:00 амплитуда ДСЧ увеличилась до 0.6 Гц. Обратимся к вариациям ДС на частоте 3.2 МГц (рис. 3). В день СЗ в интервале времени 06:05–06:50 $f_d \approx 0$, за этим последовало возмущение с амплитудой 0.15 Гц (рис. 3а). За 20 мин до начала затмения в среднем $f_d \approx 0.1$ Гц. В интервале времени 07:50–08:25 в среднем $f_d < 0$. В течение последующих 10 мин $f_d > 0$. Примерно в 08:47 сигнал становится двухмодовым. Разность ДСЧ для

этих мод постепенно увеличивалась и достигала 0.6 Гц. Примерно в 08:58 вторая мода исчезла. Для основной моды ДСЧ изменялось по квазипериодическому закону с $T \approx 10$ мин и амплитудой 0.1–0.2 Гц. В интервале времени 09:10–10:30 в основном $f_d > 0$. После этого в течение ~ 20 мин $f_d < 0$. В интервале времени 10:50–11:30 наблюдались слабые колебания ДСЧ. В контрольный день, 5 января, вариации ДСЧ были заметно меньше, чем в день затмения (рис. 3б). Сигнал все время оставался одномодовым. Амплитуда квазипериодических вариаций не превышала 0.15 Гц. Квазипериод был близок к 10 мин. Вариации ДСЧ были незначительными с $\sim 09:05$ до 12:30. Сравнивая рисунки 2 и 3, можно видеть, что вариации ДС и ДСЧ на частотах 3.2 и 4.2 МГц в основном качественно подобны в одни и те же интервалы времени. Это свидетельствует о том, что физические процессы в диапазоне высот 120–200 км были в целом подобными.

4.3. Временные вариации амплитуды отраженного сигнала

Доплеровский радар путем стробирования в радиоприемном устройстве позволяет наблюдать амплитуду отраженного сигнала (АОС) и ДСЧ в заданных каналах в диапазоне действующих высот $z' = 75$ –450 км (в диапазоне высот 75–300 км). Временные вариации АОС показаны на рис. 4. Вначале рассмотрим особенности временных вариаций АОС на частоте 4.2 МГц (левые панели на рис. 4). 3 января сигнал отражался в диапазоне $z' = 225$ –300 км ($z \approx 160$ –200 км). Лишь небольшая часть энергии просачивалась на высоты 200–240 км (рис. 4а). Примерно таким же было поведение АОС 5 января. В период СЗ поведение АОС было качественно иным. До начала затмения сигнал отражался в диапазоне $z' \approx 225$ –300 км ($z \approx 160$ –200 км). Практически сразу же после начала СЗ отраженный сигнал стал наблюдаться в широком диапазоне $z' \approx 75$ –375 км ($z \approx 75$ –240 км). В интервале времени 08:40–09:40 он приходил также от действующих высот 375–450 км ($z \approx 240$ –275 км). Временные вариации АОС были немонотонными. В течение первого часа после начала затмения АОС, соответствующая $z' \approx 225$ –300 км ($z \approx 160$ –200 км), уменьшилась в ~ 10 раз. При этом она увеличилась более чем на порядок в каналах, которым соответствовала $z' \approx 75$ –150 км ($z \approx 75$ –125 км), $z' \approx 150$ –225 км ($z \approx 125$ –160 км) и $z' \approx 300$ –375 км ($z \approx 200$ –240 км). Такое перераспределение энергии отраженного сигнала имело место в интервале времени 08:40–09:50. После этого АОС сравнительно быстро увеличивалась в канале, соответствующем высотам $z' \approx 225$ –300 км ($z \approx 160$ –200 км), и быстро уменьшалась в остальных каналах. После окончания затмения наблюдалась примерно такая же картина, как и до него.

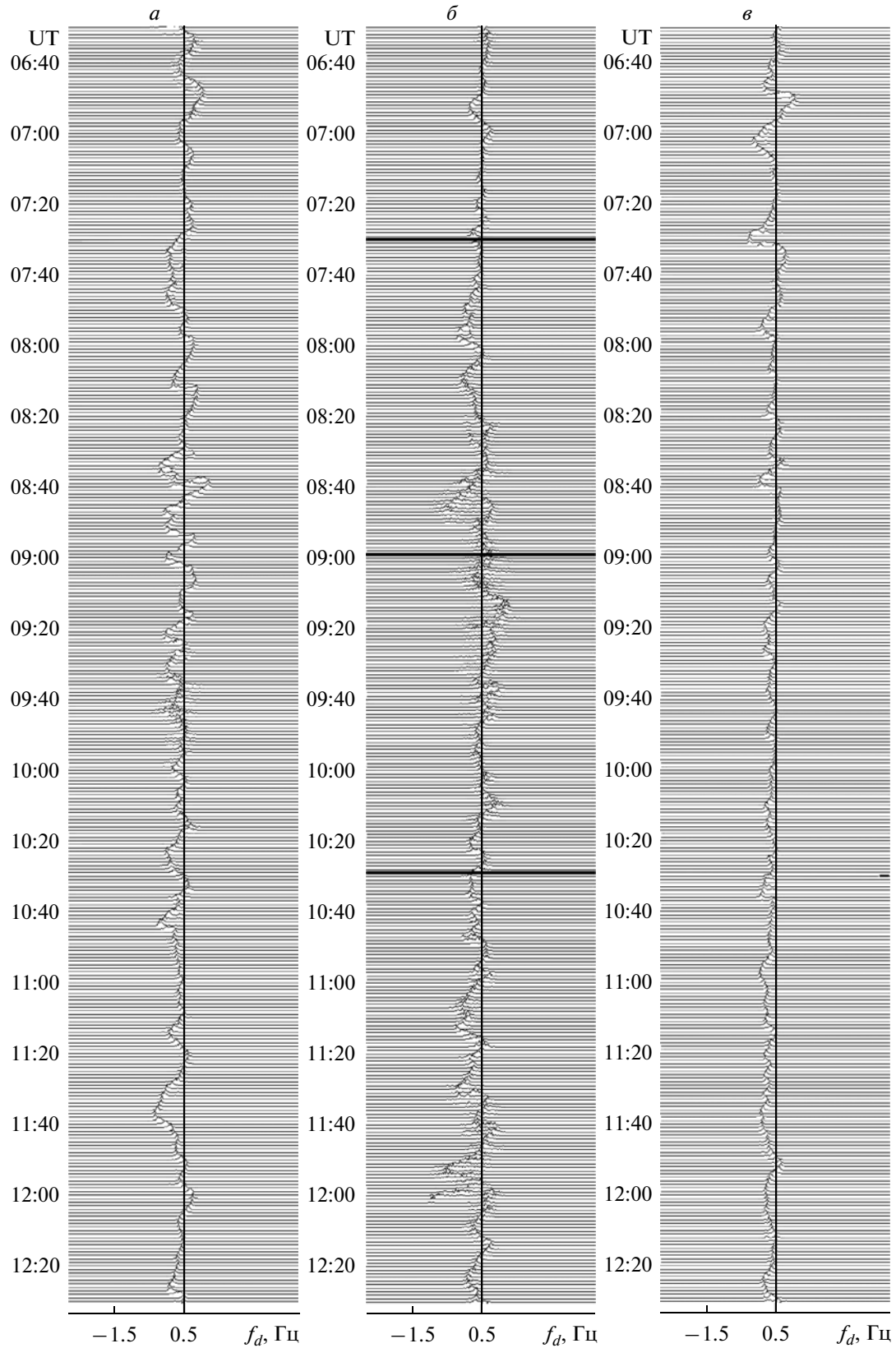


Рис. 2. Временные вариации доплеровских спектров на частоте 4.2 МГц 3 (*a*), 4 (*б*) и 5 (*в*) января 2011 г. Горизонтальными линиями показаны моменты начала, главной фазы и окончания затмения.

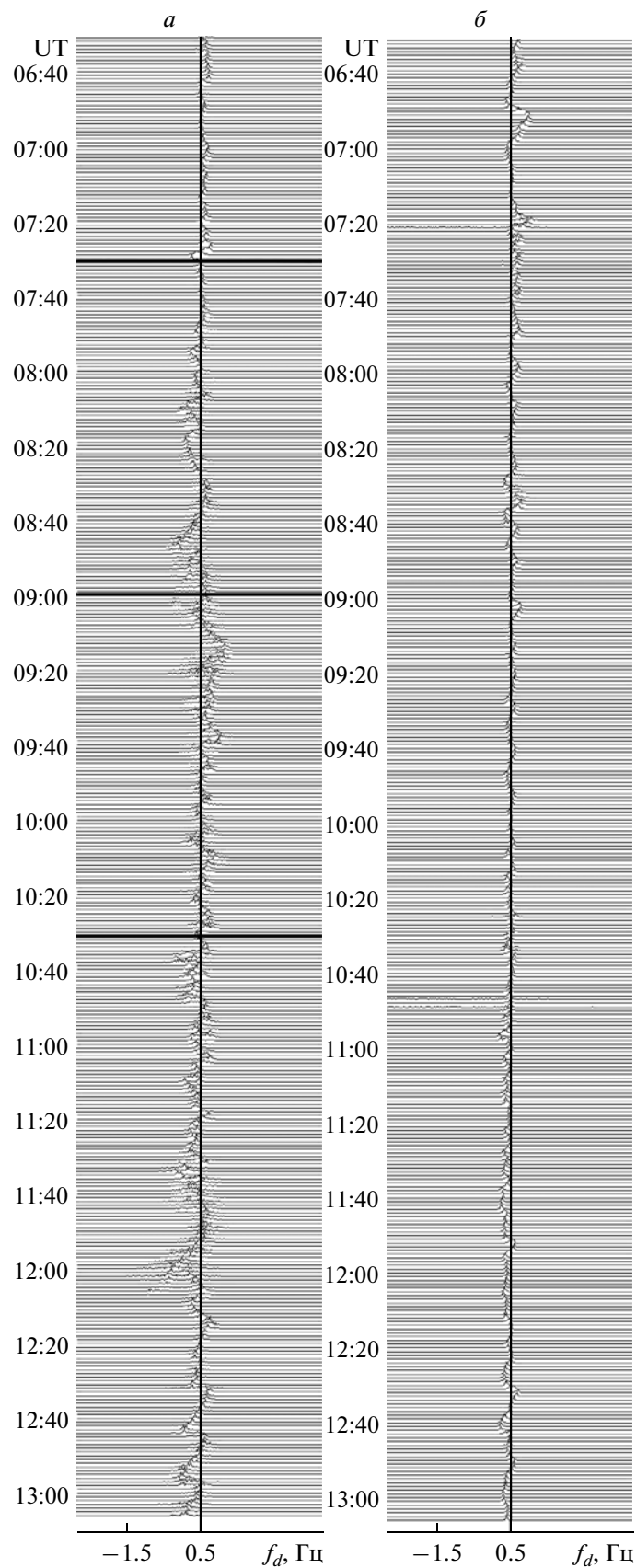


Рис. 3. Временные вариации доплеровских спектров на частоте 3.2 МГц 4 (а) и 5 (б) января 2011 г. Горизонтальными линиями показаны моменты начала, главной фазы и окончания затмения.

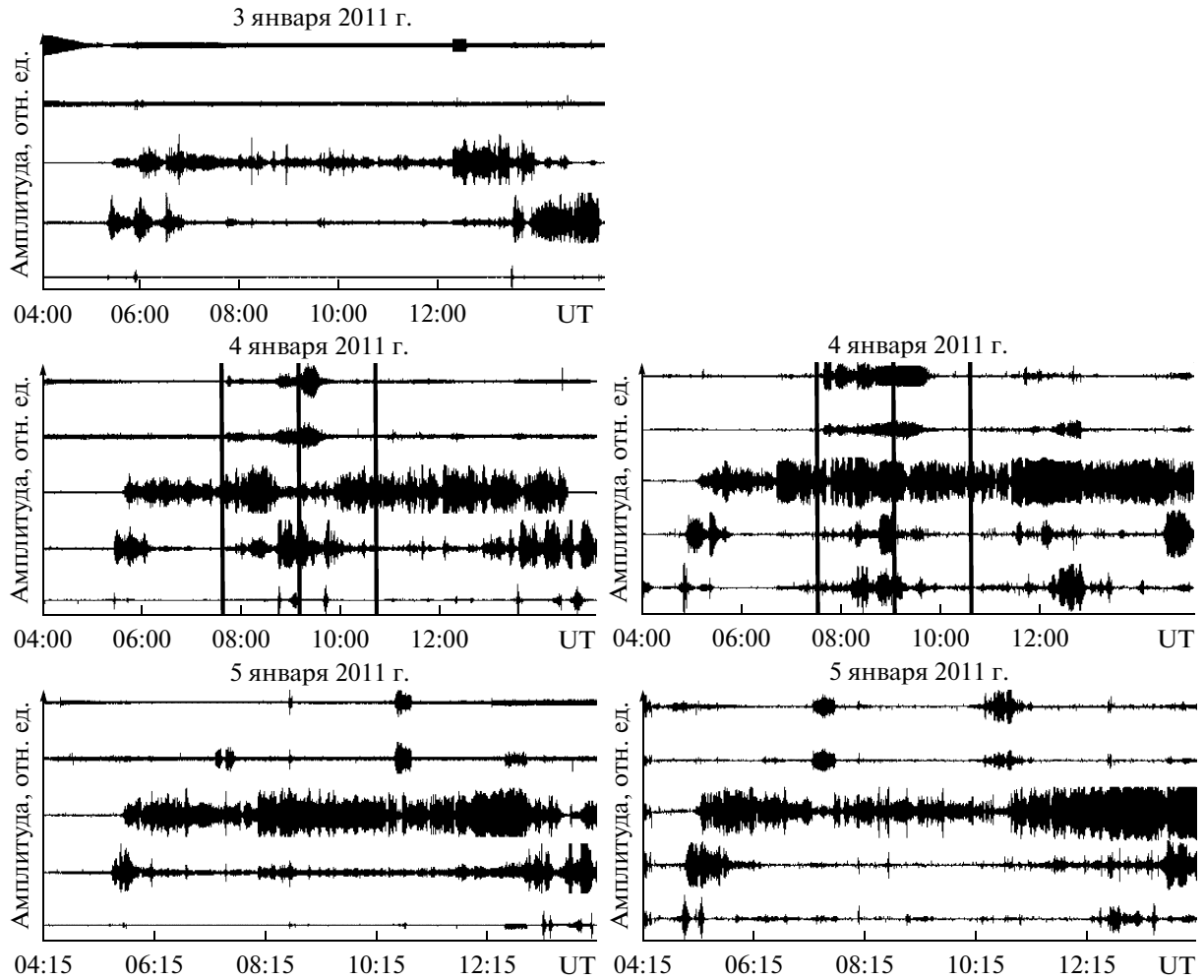


Рис. 4. Временные вариации амплитуды отраженного сигнала в различных высотных диапазонах на частотах 4.2 МГц (а) и 3.2 МГц (б). Диапазон действующих высот: 75–150 км; 150–225 км; 225–300 км; 300–375 км и 375–450 км (панели сверху вниз). Вертикальными линиями здесь и далее показаны моменты начала, главной фазы и окончания затмения.

Поведение АОС на частоте 3.2 МГц было почти таким же, как и на частоте 4.2 МГц (см. рис. 4б). Отличие состояло лишь в том, что отраженный сигнал в диапазоне $z' \approx 75\text{--}150$ км ($z \approx 75\text{--}125$ км) возник практически сразу же после начала СЗ и наблюдался в течение двух часов. Его амплитуда сравнительно слабо изменялась во времени.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

5.1. Спектральные характеристики вариаций критической частоты $\delta foF2$

Результаты спектрального анализа зависимости $\delta foF2(t)$ приведены на рис. 5. Видно, что до 07:00 в ионосфере существовал процесс с периодами $T \approx 40\text{--}60$ мин, амплитудой $\delta foF2 \approx 0.2$ МГц. При $foF2 \approx 5\text{--}6$ МГц $\delta_N \approx 0.06\text{--}0.08$. Примерно в 07:30 на этот процесс наложился другой квазипериодический процесс, начинавшийся с отрицательной полуволны со средним периодом $T \approx 30\text{--}$

40 мин амплитудой $\delta foF2 \approx 0.20\text{--}0.25$ МГц. При $foF2 \approx 4.5\text{--}5.5$ МГц δ_N составляла 0.07–0.09. Примерно после 09:30 наблюдалось постепенное увеличение периода колебаний от 30 до 60 мин с амплитудой $\delta foF2 \approx 0.25$ МГц.

Спектральный состав вариаций $\delta foF2$ 4 и 5 января заметно различался (см. рис. 5).

5.2. Спектральные характеристики вариаций δh_p

Спектральные характеристики вариаций высоты модельного параболического слоя h_p показаны на рис. 6. Из рисунка 6 видно, что 4 января до 07:30 вариации δh_p были хаотическими. В интервале времени 07:30–12:00 они стали квазипериодическими. Значение основного квазипериода $T \approx 60$ мин. Амплитуда колебаний h_p составляла 15–20 км, а относительная амплитуда была $\sim 0.06\text{--}0.09$. Частичный сбой колебания с $T \approx 60$ мин произошел в 10:30, т.е. в момент окончания СЗ. В фоновый день, 5 января,

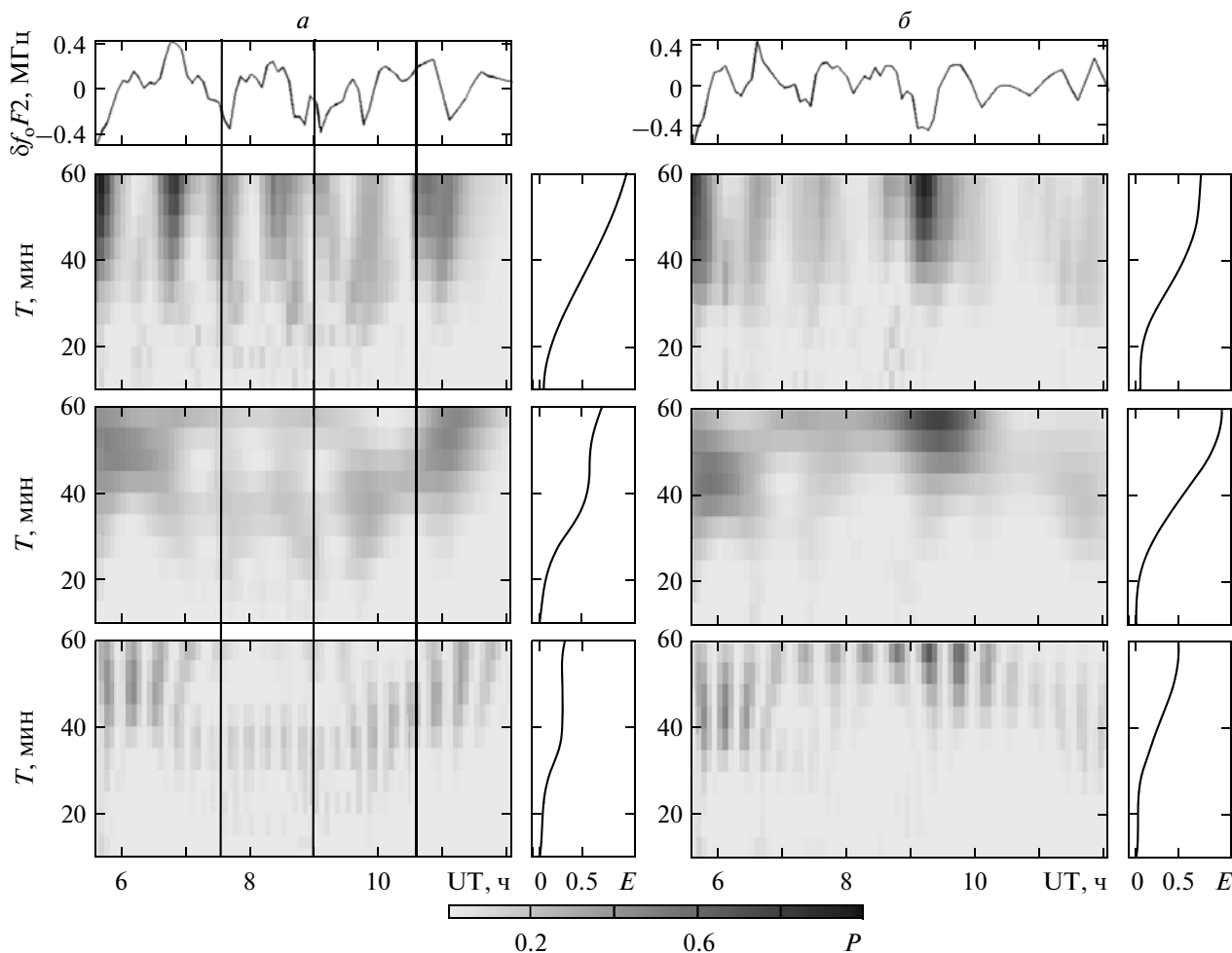


Рис. 5. Результаты спектрального анализа временных вариаций критической частоты 4 (а) и 5 (б) января 2011 г. Панели сверху вниз: вариации критической частоты; спектрограммы (в относительных единицах) соответственно оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования на основе вейвлета Морле сигнала. Справа от спектрограмм – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. Тренд вычислялся на интервале времени 60 мин.

с 06:00 до 12:00 флуктуации δh_p были скорее хаотическими. Наибольшие значения отклонений h_p не превышали 10 км.

5.3. Спектральные характеристики вариаций ДСЧ

Сначала рассмотрим спектральные характеристики вариаций ДСЧ на частоте 4.2 МГц.

Вскоре (через 30 мин) после начала СЗ в ионосфере появился достаточно широкополосный процесс, в котором преобладали колебания с периодами ~15, 25 и 50–60 мин (рис. 7). Они существовали в течение 120 мин. Наибольшая амплитуда была у процесса с $T \approx 50$ –60 мин. После момента наступления главной фазы период колебания постепенно уменьшался от 50–60 до 35–45 мин. В интервале времени 10:30–14:00 наблюдались колебания с $T \sim 15, 25$ и 40–50 мин. Наибольшую амплитуду имел процесс с $T \approx 40$ –50 мин.

Опишем кратко спектральные характеристики вариаций ДСЧ на частоте 3.2 МГц (рис. 8). Из рисунка видно, что в течение затмения преобладали процессы с периодами ~10, 20 и 30–40 мин. Последний процесс имел наибольшую амплитуду (~0.2 Гц).

6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

6.1. Уменьшение концентрации электронов

Восстановленный по данным ионозонда профиль $N(z)$ свидетельствует, что высота z_m максимума концентрации электронов 4 января 2011 г. до начала СЗ и после его окончания составляла ~230 км. Такие значения z_m типичны для ионосферы в начале роста солнечной активности. В течение главной фазы затмения $z_m \approx 240$ км. Вблизи этой высоты N уменьшилась на 52%. По предва-

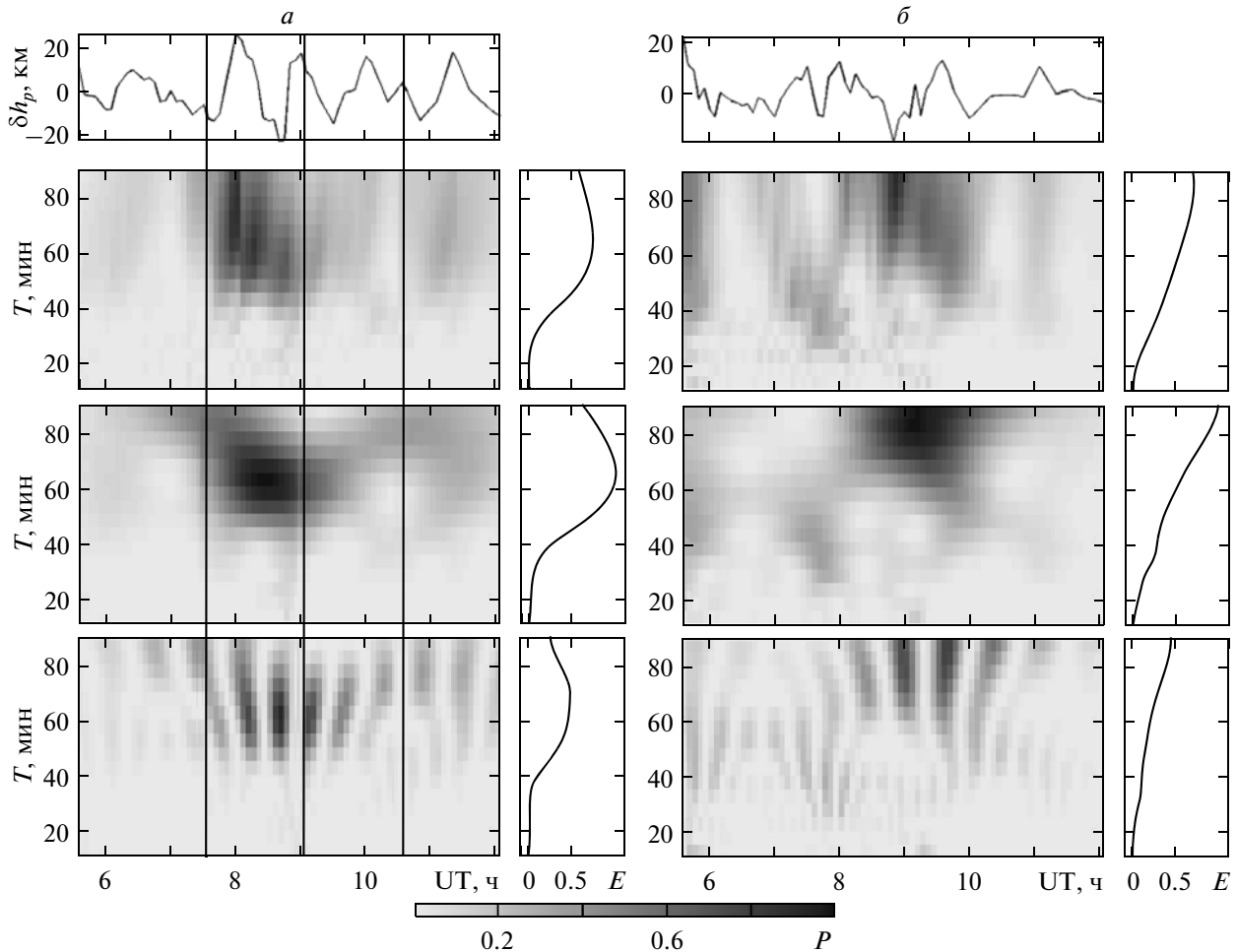


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, для временных вариаций h_p . Тренд вычислялся на интервале времени 90 мин.

рительным расчетам это значение должно составлять 71%. Различие объясняется сдвигом области ионизации вверх и уменьшением в результате СЗ концентраций O_2 и N_2 на 15–20%. Это привело к уменьшению коэффициента потерь электронов, а значит и замедлению падения N . С учетом указанных факторов расчетное уменьшение N составило 51% и приблизилось к наблюдаемому [Черногор и Барабаш, 2011]. На высотах максимума электронной концентрации ($z \approx 230$ – 240 км) прямая радиативная рекомбинация электронов с атомарными ионами малосущественна [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. Главными реакциями потерь ионов кислорода, доминирующими на высотах $z \geq 180$ – 190 км, являются реакции с молекулами O_2 и N_2 . В результате этих реакций образуются молекулярные ионы O_2^+ и NO^+ , которые затем рекомбинируют с электронами. На высотах $z \approx 230$ – 240 км важна роль диффузии. Ее характерное время $t_D = H^2/D_a$ в дневное время ~ 70 мин. Здесь $H \approx 45$ км – приведенная высота нейтральной атмосферы, $D_a \approx 5 \times 10^5$ м²/с – коэффициент амбиполярной

диффузии. Время t_D соизмеримо с временем затенения диска Солнца. В общем случае следует учитывать, кроме амбиполярной диффузии, нейтральный ветер, а также дрейф заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Как показали синхронные измерения на харьковском радаре некогерентного рассеяния, вертикальная составляющая скорости движения плазмы $V_z \approx -50$ м/с при $z \approx 230$ – 240 км в течение главной фазы затмения. На этих же высотах, вблизи максимума электронной концентрации, $N(z) \approx \text{const}$. По этой причине

$$\text{div} N\mathbf{V} \approx \frac{\partial}{\partial z}(NV_z) \approx 0.$$

С учетом сказанного уравнение баланса электронов имеет вид

$$\frac{dN}{dt} = q_e - \beta N, \quad (1)$$

где q_e – скорость образования электронов и ионов под действием солнечного излучения, β – коэффициент потерь. Последний зависит от скоростей

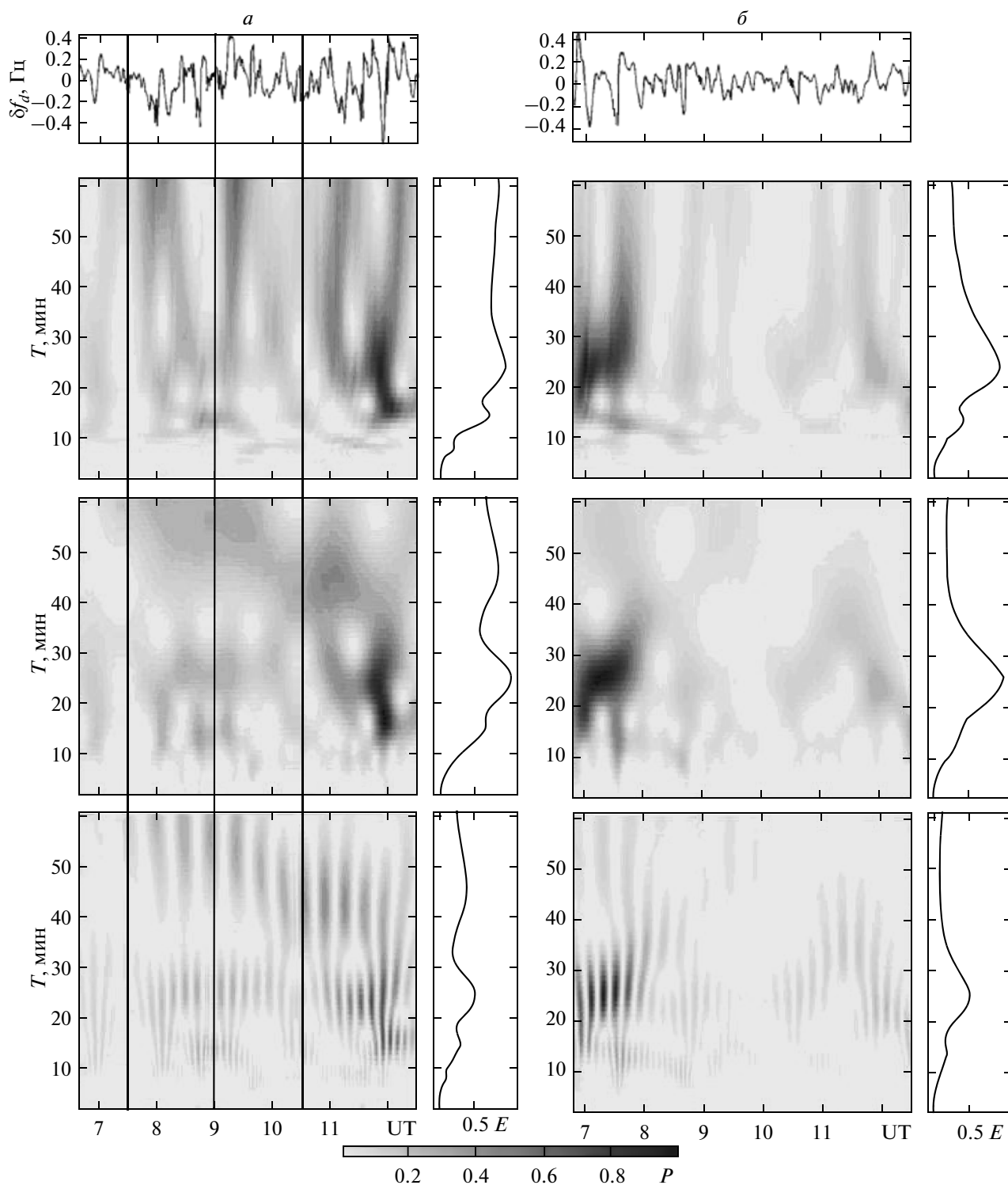


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, для временных вариаций ДСЧ на частоте 4.2 МГц. Тренд вычислялся на интервале времени 60 мин.

реакций O^+ с O_2 и N_2 , равных k_1 и k_2 , и концентраций этих молекул [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. Тогда $\beta = k_1 N(O_2) + k_2 N(N_2)$. Полагая, что $q_e = q_{e0} B(t)$ и имея зависимость $B(t)$, нетрудно найти решение (1). Здесь q_{e0} — скорость образования

электронов и ионов в невозмущенных условиях. Численное интегрирование показало, что в зависимости $N(t)$ минимальное значение N_{\min} имело место при $\beta \tau_m \approx 1$, где $\tau_m \approx 16$ мин. Отсюда $\beta \approx 1.04 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Сравним экспериментально

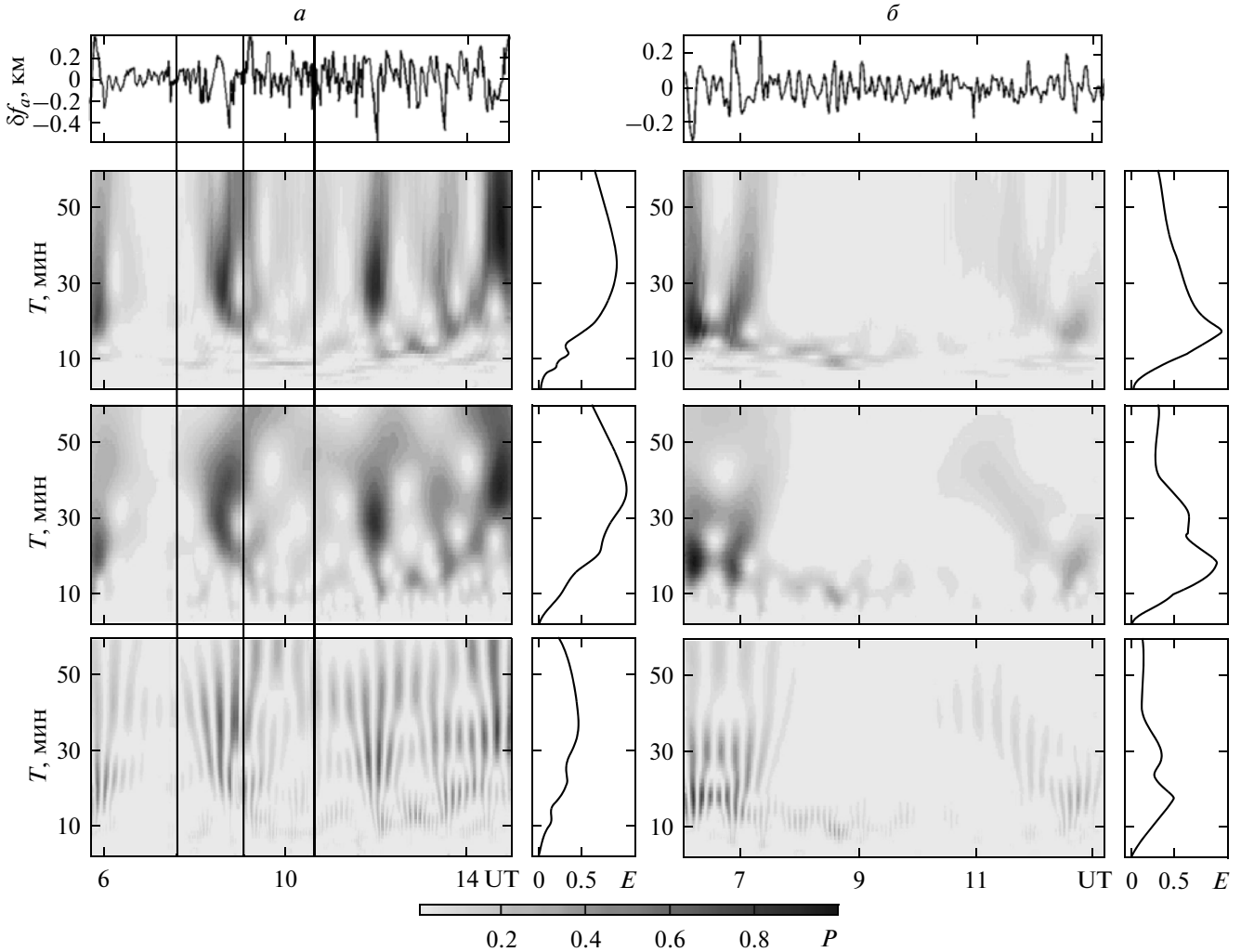


Рис. 8. То же, что и на рис. 5, для временных вариаций ДСЧ на частоте 3.2 МГц. Тренд вычислялся на интервале времени 60 мин.

определенное значение β с рассчитанным. Расчеты по формулам из монографии [Брюнелли и Намгаладзе, 1988] для высоты $z_m = 240$ км и температуры нейтралов $T_n \approx 1000$ К (она определялась по данным синхронных измерений на харьковском радаре некогерентного рассеяния) дают $k_1 \approx 1.25 \times 10^{-17} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$, $k_2 \approx 5.2 \times 10^{-19} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Вычисляя по модели MSIS $N(\text{O}_2) \approx 6 \times 10^{13} \text{ м}^{-3}$, $N(\text{N}_2) \approx 5 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$ для высоты $z_m = 240$ км, получим, что $\beta(z_m) \approx 1.01 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Это значение практически совпадает с оцененным из эксперимента ($1.04 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$). Заметим, что время становления концентрации электронов $t_N = \beta^{-1} \approx 16$ мин $\ll t_e \approx 90$ мин. Здесь $2t_e \approx 180$ мин – продолжительность СЗ. До затмения $dN/dt \approx 0$ и из (1) получаем, что $q_{e0} = \beta_0 N_0$. Вблизи главной фазы СЗ также $dN/dt \approx 0$ и $q_{emin} = \beta N_{min}$. Отсюда при $\beta \approx \beta_0$ и пренебрежении изменением зенитного угла Солнца за время t_e имеем $N_{min}/N_0 = q_{emin}/q_{e0} = B_{min}$. При $B_{min} = 0.29$ имеем

$N_{min}/N_0 = 0.29$, а относительное уменьшение N составляет 0.71. Эти теоретические оценки несколько отличаются от значений, вычисленных из экспериментальных зависимостей $f_d(t)$ (см. ниже). Различие оценок и экспериментальных данных свидетельствует о том, что при смещении высоты отражения радиоволны вверх значение β уменьшается до $\sim 0.77\beta_0$. Кроме того, при этом уменьшаются концентрации O_2 и N_2 , что также приводит к уменьшению β на 17% [Черногор и Барабаш, 2011]. С учетом этих обстоятельств $\beta = 0.64\beta_0$, $N_{min}/N_0 \approx 0.47$ и $(\Delta N/N_0)_{max} \approx 1 - N_{min}/N_0 \approx 0.53$. В E - и нижней части F -области имеет место квадратичный закон рекомбинации. Здесь уравнение баланса принимает вид:

$$\frac{dN}{dt} = q_e - \alpha N^2, \quad (2)$$

где α – коэффициент рекомбинации. При $dN/dt \approx 0$ и пренебрежении изменением q_e и α при сдвиге

области отражения радиоволны вверх из (2) следует, что $N_{\min}/N_0 = \sqrt{q_{e\min}/q_{e0}} = \sqrt{B_{\min}}$.

При $B_{\min} = 0.29$ имеем $N_{\min}/N_0 \approx 0.54$. При этом относительное уменьшение N составляет 0.46. Измерения ДСЧ на частоте 3.2 МГц дали $N_{\min}/N_0 \approx 0.57$, что подтверждает справедливость сделанных предположений и квадратичного закона комбинации на высотах $z \leq 160$ км.

6.2. Оценка амплитуды колебаний

Оценим вначале по данным ионозонда амплитуду колебаний N на высоте максимума концентрации электронов слоя F2. Здесь $\delta foF2 = 0.2$ и 0.4 МГц для периодов 30 и 60 мин. Тогда $\delta_{Na} = 2\delta foF2/foF2$ равно 0.08 и 0.16 при $foF2 = foF2_{\min} \approx 5$ МГц. Далее получим оценку δ_{Na} , используя измерения на доплеровском радаре. Полагая, что вблизи области отражения зондирующей радиоволны концентрация электронов под действием волнового возмущения изменяется по гармоническому закону $N(t) = \bar{N}(1 + \delta_{Na}\cos(2\pi t/T))$, при ряде упрощающих предположений для амплитуды ДСЧ имеем [Черногор, 2010]:

$$f_{da} = 4\pi \frac{f}{c} \frac{L}{T} \delta_{Na}. \quad (3)$$

Здесь \bar{N} – невозмущенное волновым процессом значение N , δ_{Na} – относительная амплитуда ВВ концентрации электронов, c – скорость света в вакууме, L – эффективная толщина ионосферного слоя, дающего основной вклад в квазипериодические вариации ДСЧ. При $f = 4.2$ МГц, $f_{da} \approx 0.25$ Гц, $L \approx 45$ км и $T \approx 10$ мин получим, что $\delta_{Na} \approx 0.02$ вблизи высоты отражения радиоволны ($z \approx 190$ – 215 км). При $T = 55$ мин и $f_{da} \approx 0.25$ Гц на частоте 4.2 МГц для высоты 215 км имеем $\delta_{Na} \approx 0.10$. На больших высотах δ_{Na} увеличивается по экспоненциальному закону с масштабом $2H$, где H – приведенная высота нейтральной атмосферы. Полагая $z_0 = 215$ км, $z = 240$ км, $H = 45$ км на высоте 240 км, получим, что $\delta_{Na}(240) \approx 0.15$ при $T = 55$ мин. Отметим, что для $T \approx 55$ – 60 мин, значения δ_{Na} , полученные по данным ионозонда (0.16) и доплеровского радара (0.15) очень близки друг к другу.

6.3. Оценка смещения области отражения радиоволны

Среднее значение ДСЧ \bar{f}_d на частоте 4.2 МГц в интервале времени 07:40–08:10 уменьшалось примерно от 0 до -0.25 Гц, а затем постепенно приближалось к нулю. При этом $|\Delta \bar{f}_{d\max}| = 0.25$ Гц. Такое поведение $\bar{f}_d(t)$ означает, что область отражения радиоволны двигалась вверх со средней скоростью $u = c\langle \Delta \bar{f}_d \rangle / (2f)$ [Черногор, 2010], где

$\langle \Delta \bar{f}_d \rangle = \Delta \bar{f}_{d\max} / 2 \approx 0.125$ Гц – среднее значение $\Delta \bar{f}_d$ за время $\Delta t \approx 30$ мин. Тогда $u \approx 4.5$ м/с. За 30 мин область отражения радиоволны сместилась вверх на ~ 8 км (от 190 до 198 км). На стадии открывания диска светила $\Delta \bar{f}_{d\max} = 0.3$ Гц. При этом $u \approx 5.4$ м/с. За 40 мин область отражения радиоволны сместилась вниз на ~ 13 км (от 198 до 185 км). Если отрицательное смещение частоты радиоволны в течение времени $\Delta t \approx 80$ мин вызвано уменьшением N ниже области отражения радиоволны, его можно оценить из следующей формулы [Черногор, 2010]:

$$\frac{\Delta N}{N_0} \approx \frac{3\langle \Delta \bar{f}_d \rangle c \Delta t}{8 f L}. \quad (4)$$

Полагая $L \approx 50$ км, получим, что $\Delta N/N_0 \approx 0.50$. При этом $N_{\min}/N_0 \approx 0.50$. Близкое значение $N_{\min}/N_0 \approx 0.47$ получено из расчетов. На частоте 3.2 МГц первые 40 мин после начала затмения \bar{f}_d уменьшилось на 0.12 Гц. При этом $u \approx 2.8$ м/с. За 80 мин область отражения сместилась вверх от ~ 145 до 160 км, т. е. на 15 км. Относительное уменьшение N за первые 80 мин при $L \approx 25$ км согласно формуле (4) составило 0.41. При этом $N_{\min}/N_0 \approx 0.59$, что достаточно близко к полученной выше теоретической оценке (0.54). После главной фазы СЗ $\Delta f_{d\max} = 0.14$ Гц. При этом $u \approx 3.3$ м/с. За 70 мин область отражения радиоволны опустилась вниз на ~ 15 км (от 160 до 145 км).

7. ОБСУЖДЕНИЕ

7.1. Особенности затмения 4 января 2011 г.

СЗ имело место вблизи зимнего солнцестояния, в утреннее и околополуденное время. Фаза покрытия диска Солнца была значительной – 0.78. Все это наложило свой отпечаток на физические процессы, сопровождавшие затмение, и привело к следующему ряду особенностей.

1) В течение СЗ усилилась турбулизация среды в диапазоне высот от 75 до 275 км. Об этом свидетельствует диффузность ионограмм по частоте и по высоте, а также появление рассеянного сигнала доплеровского радара во всем высотном диапазоне. При высотной протяженности зондирующего сигнала, равной 75 км, рассеянные сигналы принимались одновременно в диапазоне действующих высот $z' \approx 75$ – 450 км ($z \approx 75$ – 275 км). В контрольные дни, а также до начала СЗ и после его окончания отраженные сигналы наблюдались преимущественно в диапазоне $z' \approx 225$ – 300 км ($z \approx 160$ – 200 км).

2) Затмение сопровождалось возникновением мощного отражающего слоя (типа E_s) на высотах от 100 до 130–140 км. В контрольные дни, а также до СЗ этот слой либо отсутствовал, либо был за-

метно тоньше (на ~5–10 км). Критическая частота этого слоя достигала 6 МГц, а $N_{\max} \approx 4.4 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Вблизи момента наступления главной фазы затмения наблюдались отраженные сигналы от высот 100–180 км, для которых критическая частота составляла 7.5–8 МГц ($N_{\max} \approx (7.0\text{--}8.0) \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$). Скорее всего, эти слои возникали в результате высыпания “мягких” электронов из магнитосферы [Черногор, 2000].

3) В результате затмения в суточном ходе $N(t)$ отсутствовал утренний максимум, который четко наблюдался в контрольные дни в ~08:10. Концентрация электронов в максимуме слоя F2 в 08:10 уменьшалась в 1.5 раза (от 5.6×10^{11} до $3.7 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$).

4) Сравнительно малое ДСЧ (–0.10 и –0.25 Гц при частотах 3.2 и 4.2 МГц соответственно). Такое поведение $f_d(t)$ объясняется относительно большой длительностью СЗ (около трех часов, другие затмения длились около двух часов (см., например, [Панасенко и Черногор, 2010])).

5) Отсутствие симметрии в зависимости $f_d(t)$ относительно момента наступления главной фазы затмения. Такое поведение связано с сильной временной зависимостью регулярного невозмущенного затмением профиля $N_0(t)$ (за 1.5 часа N_0 изменялась в 1.5 раза), наложением нерегулярных вариаций N и другими факторами. Кроме того, причиной асимметрии в зависимости ДСЧ от времени может быть дополнительная ионизация, вызванная высыпанием “мягких” электронов из магнитосферы [Черногор, 2010].

6) СЗ сопровождалось усилением квазипериодических вариаций ДСЧ, а значит и концентрации электронов. В спектре ДСЧ преобладали периоды ~15, 25 и 55 мин, относительная амплитуда волновых возмущений N вблизи высоты отражения (215 км) зондирующей волны составляла 0.02 и 0.15 при периодах 10–15 и 50–60 мин соответственно.

7.2. Волновой отклик ионосферы

Методы доплеровского (ДЗ) и вертикального зондирования (ВЗ) показали наличие волновых возмущений (ВВ) в ионосфере в день СЗ. Волновые процессы заметно усилились через ~30 мин после начала СЗ. Вблизи этого же момента времени производная от освещенности атмосферы достигала максимального значения. Это обстоятельство позволяет предположить, что упомянутые квазипериодические процессы генерировались в месте наблюдения. Обсудим некоторое различие в периодах колебаний, которые наблюдались методами ДЗ (~15, 25 и 55 мин) и ВЗ (~30 и 60 мин). Такое различие отчасти связано с различием в исследуемых высотах (160–215 км и 230–240 км соответственно), но в большей степени оно обусловлено различиями в методах зондирования. Метод ДЗ

более чувствителен при прочих равных условиях к быстро протекающим процессам. В соответствии с соотношением (4) к большому ДСЧ проводят колебания с меньшими периодами. Минимальный период внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере на высотах 150–200 км примерно равен периоду Брента – Вайсяля, который близок к 10 мин [Госсард и Хук, 1978; Григорьев, 1999]. Это обстоятельство объясняет, почему в вариациях ДСЧ преобладают периоды ~15 и 25 мин. В методе ВЗ регистрация ионограмм производилась один раз в 5 мин. Поэтому минимальный период, который мог наблюдаться в данных измерениях, составлял 10 мин. Наибольшую амплитуду ($\delta_{Na} \approx 0.16$) имело колебание с $T \approx 60$ мин. На высоте, где отражалась радиоволна доплеровского радара с частотой 4.2 МГц, значения δ_{Na} составляли 0.02 и 0.10 для периодов ~10 и 55 мин (см. раздел 6).

Следовательно, результаты, полученные методами ДЗ и ВЗ, в целом вполне согласовывались между собой и хорошо дополняли друг друга.

Судя по периодам и амплитудам ВВ, нами наблюдались ионосферные проявления ВГВ [Госсард и Хук, 1988; Григорьев, 1999], которые генерировались в термосфере в результате перемещения охлажденной в пределах лунной тени области термосферы [Chimonas and Hines, 1970]. Наши результаты согласуются с результатами авторов [Bertin et al., 1977; Broche et al., 1976; Buther et al., 1979; Davis and da Rosa, 1970; Ishinose and Ogawa, 1976; Jones et al., 2004].

8. ВЫВОДЫ

1. Обнаружено, что частное (с фазой ~0.78) СЗ привело к уменьшению критической частоты слоя F2 на 1.9 МГц, а концентрации электронов в максимуме – на 52%. Время запаздывания минимального значения концентрации электронов по отношению к моменту наступления главной фазы затмения составляло 16.0 ± 1.4 мин.

2. Относительное уменьшение N в E-области ионосферы составило 0.41 (по расчетам – 0.46), в нижней части F-области ионосферы – 0.50 (по расчетам – 0.53). На высоте максимума концентрации электронов относительное уменьшение N составляло 0.52 (по расчетам 0.51). Близость расчетных и наблюдаемых данных подтверждает справедливость квадратичного и линейного законов рекомбинации в E- и F-областях ионосферы.

3. Оцененный из экспериментальных данных и рассчитанный с использованием модельных профилей коэффициент потерь практически совпал. Значение этого коэффициента составило 10^{-3} с^{-1} для высоты 240 км.

4. Установлено, что СЗ сопровождалось усилением (по сравнению с фоновыми днями) колебаний f_oF2 с амплитудой ~0.2 и 0.4 МГц и периодами

~30 и 60 мин соответственно. Эти колебания возникли через ~30 мин после начала затмения. Им соответствовали квазипериодические колебания N с относительной амплитудой ~0.08 и 0.16. Продолжительность этих колебаний составляла около 3 и 5–6 ч соответственно.

5. Обнаружено, что СЗ сопровождалось вариациями доплеровских спектров на частотах 3.2 и 4.2 МГц. Практически в течение всего затмения спектры носили преимущественно одномодовый характер. Выделялись квазипериодические процессы с периодами около 15, 25 и 55 мин и амплитудами 0.15–0.25 Гц. Расчеты показали, что этим процессам соответствовали колебания N с относительной амплитудой около 0.02–0.10. Эти процессы возникли через ~30 мин после начала СЗ и продолжались 2–4 ч.

6. Установлено, что через ~40 мин после начала затмения ДСЧ достигло минимального значения (–0.10 и –0.25 Гц на частотах 3.2 и 4.2 МГц). Постоянная составляющая смещения \bar{f}_d равнялась –0.10 и –0.25 Гц для тех же частот соответственно. По расчетам таким значениям \bar{f}_d соответствовали направленные вверх скорости движения области отражения радиоволн, в среднем равные 2.8 и 4.5 м/с соответственно. Согласно расчетам, на стадии покрытия диска Солнца область отражения радиоволн с частотами 3.2 и 4.2 МГц сместилась примерно от 145 до 160 км и от 190 до 215 км соответственно. Значение \bar{f}_d было положительным в интервалах времени с 09:05 до 10:15 и с 08:45 до 09:45 для радиоволн с 3.2 и 4.2 МГц соответственно. При этом область отражения радиоволн сместилась вниз на ~15 и 20 км соответственно.

7. Вариации доплеровских спектров в фоновые дни заметно отличались от вариаций в день затмения. Это позволяет утверждать, что квазипериодические вариации этих спектров были вызваны волновыми процессами, сопутствовавшими солнечному затмению.

8. Обнаружено существенное усиление плазменной турбулентности на высотах ~100–200 км, сопровождавшее СЗ.

9. Наряду с ожидаемым уменьшением концентрации электронов выявлено ее эпизодическое увеличение, которое, скорее всего, связано с высыпанием “мягких” электронов из магнитосферы, т.е. с активизацией взаимодействия подсистем в системе Солнце–межпланетная среда–магнитосфера–ионосфера–атмосфера–Земля.

Автор благодарен С.В. Панасенко за помощь, оказанную при оформлении рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 528 с. 1988.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 532 с. 1978.
- Григорьев Г.И. АГВ в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–10. 1999.
- Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Статистические характеристики доплеровских спектров радиосигналов, отраженных от естественно-возмущенной ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 15. № 1. С. 24–38. 2010.
- Черногор Л.Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 5. №4. С. 371–375. 2000.
- Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 8. № 1. С. 59–106. 2003.
- Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 48. № 5. С. 681–702. 2008.
- Черногор Л.Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 50. № 3. С. 361–376. 2010.
- Черногор Л.Ф., Барабаш В.В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования // Космічна наука і технологія. Т. 17. № 4. С. 41–52. 2011.
- Bertin F., Hughes K.A., Kersley L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973 // J. Atmos. Terr. Phys. V.39. № 4. P. 457–461. 1977.
- Broche P., Crochet M., de Maitre J.G. Gravity waves generated by the June 1973 solar eclipse in Africa // J. Atmos. Terr. Phys. V. 38. № 12. P. 1361–1364. 1976.
- 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. V. 41. № 5. P. 439–444. 1979.
- Chernogor L.F., Rozumenko V.T. Earth–Atmosphere–Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Phys. and Radio Astron. V. 13. № 2. P. 120 – 137. 2008.
- Chernogor L.F. The Earth–atmosphere–geospace system: main properties and processes // Intern. J. of Remote Sens. V. 32. № 11. P. 3199–3218. 2011.
- Chimonas G., Hines C.O. Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse // J. Geophys. Res. V. 75. № 4. P. 875–876. 1970.
- Davis M.J., da Rosa A.V. Possible detection of atmospheric gravity waves generated by the solar eclipse // Nature. V. 226. № 5221. P. 1123–1128. 1970.
- Eclipse Supplement. Nature. V. 226. P. 1097–1155. 1970.
- Ishinose T., Ogawa T. Internal gravity waves deduced from HF Doppler data during the April 19, 1958, solar eclipse // J. Geophys. Res. V. 8. № 13. P. 2401–2404. 1976.
- 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. Solar-Terr. Phys. V. 66. № 5. P. 363–374. 2004.
- Special Eclipse Issue (The Eclipse of 7 March 1970). J. Atmos. Terr. Phys. V. 34. № 8. P. 559–739. 1972.