

РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

УДК 550.388

В. Ф. ПУШИН, Л. Ф. ЧЕРНОГОР

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

ИНФРАЗВУКОВОЙ ЭФФЕКТ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования физических эффектов, сопровождающих редкое природное явление – солнечное затмение. До настоящего времени исследовались особенности генерации солнечным затмением внутренних гравитационных волн в атмосфере с периодами $T \sim 10 \div 100$ мин. В представленной работе предпринята попытка подтвердить факт генерации и оценить основные параметры инфразвуковых колебаний с $T \sim 1 \div 10$ мин, сопровождавших солнечные затмения. Для наблюдений использовался доплеровский ВЧ радар вертикального зондирования. Для обработки данных применялся спектральный анализ и полосно-пропускающая фильтрация. Подтверждено, что частные солнечные затмения, имевшие место над Харьковом (Украина) в 1999–2011 гг., как правило, сопровождались колебаниями доплеровского смещения частоты инфразвукового диапазона ($T \sim 5 \div 8$ мин) и амплитудой $20 \div 100$ мГц. Им соответствовала относительная амплитуда колебаний концентрации электронов около $0.1 \div 0.5$ %

Ключевые слова: солнечные затмения, доплеровский радар, ионосфера, спектральный анализ, полосно-пропускающая фильтрация, атмосферный инфразвук

1. Введение

Исследованию физических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызываемых солнечными затмениями (СЗ), посвящены десятки работ (см, например, [1–18]). Поскольку затмения относятся к уникальным событиям, а сопровождающие их процессы существенно зависят от состояния атмосферной и космической погоды, уровень понимания всего комплекса физических процессов далек от желаемого. В течение десятков лет дискуссионным является вопрос о генерации СЗ внутренних гравитационных волн (ВГВ) (см., например, [1–8]). Как известно, к ВГВ относят атмосферные волны с периодом $T \sim 10 \div 180$ мин. Такие волны наблюдаются при помощи GPS-технологий [10], радаров некогерентного рассеяния [10, 12, 15, 18], доплеровских радаров [3, 14, 16, 17], ионозондов и других средств [2, 4–8, 11, 13]. Еще сложнее дело обстоит с возможностью наблюдения инфразвуковых волн с $T \leq 5 \div 10$ мин. Для их наблюдения необходимы средства, обладающие высоким временным разрешением (например, не хуже 1 мин) и высокой чувствительностью к изменениям параметров атмосферы и геокосмоса (например, способным обнару-

живать относительные возмущения среды порядка $0.1 \div 1$ %). Этим требованиям удовлетворяют доплеровские ВЧ радары [14, 16, 17, 19]. При помощи такого радара автором работ [16, 17] впервые обнаружены инфразвуковые колебания с $T \approx 2 \div 5$ мин на высотах ионосферы, сопровождавшие СЗ. Амплитуда доплеровского смещения частоты (ДСЧ) составляла несколько десятков миллигерц.

В работах [16, 17] инфразвуковые колебания ДСЧ выделялись при помощи системного спектрального анализа. Из-за относительно малой амплитуды инфразвука колебания с $T \approx 2 \div 6$ мин на фоне более сильных ВГВ наблюдались не очень уверенно. В представленном исследовании для обнаружения инфразвуковых колебаний ДСЧ применялась полосно-пропускающая фильтрация (ППФ).

Цель настоящей работы – подтвердить факт генерации и оценить основные параметры квазипериодических колебаний инфразвукового диапазона во временных вариациях ДСЧ в течение СЗ, наблюдавшихся вблизи г. Харькова (Украина) в 1999–2011 гг.

Подтверждение факта генерации инфразвука затмениями и определение основных параметров колебаний позволит лучше понять весь комплекс

© В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор, 2013

физических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызываемых редким природным явлением. В частности, инфразвук относится к одному из каналов взаимодействия подсистем в системе Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (внутренние оболочки).

2. Средства и методы

Для изучения инфразвукового эффекта СЗ использовался доплеровский радар вертикального зондирования, расположенный в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина вблизи г. Харькова (49°38' с. ш., 36°20' в. д.), Украина [16, 19].

Анализ ВЧ-сигнала, отраженного от ионосферы и представляющего собой суперпозицию нескольких мод, проводился путем спектрального фурье-анализа его биений с сигналом опорного гетеродина (осуществлялась так называемая доплеровская фильтрация). Интервал анализа был выбран равным 60 с. Динамические спектры (ДС) биений рассчитывались без перекрытия. Полагалось, что в ВЧ сигнале присутствовала доминирующая по амплитуде мода, и определялся временной ряд вариаций ДСЧ $f_d(t_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$ как последовательность частот главных максимумов ДС. Аналогично определялся временной ряд вариаций их нормированной амплитуды $A_s(t_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$.

Полагалось, что критерием обнаружения генерации инфразвуковых волн на высотах ионосферы за счет СЗ является совпадение (близость) времени начала затмения над радаром со временем начала вариаций ДСЧ соответствующей частоты. Поэтому рассчитывались ДС вариаций ДСЧ в пе-

риод СЗ. Интервал анализа был выбран равным 60 мин, перекрытие – 30 мин. Из временного ряда вариаций ДСЧ удалялись неправдоподобные значения (выбросы) и полиномиальный тренд 4-й степени. Анализ ДС позволял выделять колебания инфразвукового диапазона, появляющиеся в период СЗ. Для определения параметров инфразвукового колебания вариации ДСЧ пропускались через полосно-пропускающий фильтр с соответствующей центральной частотой f_c . Полоса фильтра была выбрана равной $\Delta f = 0.1 f_c$. В качестве фильтра использовался синусный фильтр Баттерворта, который в работе [19] успешно применялся для выявления инфразвука и ВГВ.

3. Краткие сведения о СЗ

Основные характеристики и параметры СЗ приведены в табл. 1. Видно, что все затмения были частными, их фаза изменялась от 0.24 до 0.78, максимальное значение функции покрытия Солнца составляло от 0.13 до 0.73, а максимальное уменьшение освещенности – от 1.15 до 3.7 раза. Одно СЗ имело место в послевосходное время, а именно с 02:10 до 04:20 (здесь и далее используется всемирное время UT). Остальные пять затмений наблюдались в околополуденное время (по местному времени).

4. Состояние космической погоды

Состояние космической погоды удобно характеризовать при помощи параметров солнечного ветра (измеренных концентрации частиц n_{sw} , температуры T_{sw} , скорости V_{sw} и рассчитанного давления p_{sw}), рассчитанной энергетической функции Акасофу ϵ_A , значений межпланетного

Таблица 1. Основные данные о СЗ

Характеристики и параметры	11 августа 1999 г.	31 мая 2003 г.	3 октября 2005 г.	29 марта 2006 г.	1 августа 2008 г.	4 января 2011 г.
Начало СЗ	09:57	02:10	08:36	10:02	09:11	07:30
Главная фаза СЗ	11:13	03:10	09:38	11:12	10:15	08:59
Конец СЗ	12:29	04:20	10:42	12:21	11:17	10:29
Фаза СЗ	0.78	0.74	0.24	0.77	0.42	0.78
Максимальное значение функции покрытия Солнца	0.73	0.66	0.13	0.72	0.31	0.71
Максимальное уменьшение освещенности, разы	3.7	2.9	1.15	3.6	1.4	3.6

магнитного поля (и в частности компоненты B_z), плотностей потоков протонов Π_p и электронов Π_e , индексов солнечной (F10.7) и геомагнитной (D_{st} , K_p и A_p) активностей. Такой набор параметров позволяет всесторонне проанализировать состояние космической погоды.

Средние значения перечисленных выше параметров приведены в табл. 2. Из табл. 2 видно, что все СЗ, кроме затмения 31 мая 2003 г., происходили в условиях “хорошей” космической погоды. (Под “хорошей” космической погодой понимается практически невозмущенное состояние геокосмической среды.) В частности, значения индексов K_p и D_{st} изменялись соответственно от 1 до 2 и от +10 до -15 нТл. Это значительно облегчило выделение эффектов СЗ в вариациях характеристик сигнала доплеровского радара.

Затмение 31 мая 2003 г. развивалось в период восхода Солнца на фоне завершающейся сверхсильной ($K_{p\max} = 8$) магнитной бури. Во время СЗ $K_p \approx 3 \div 5$.

5. Результаты экспериментов

11 августа 1999 г. Зависимость ДСЧ $f_d(t)$ и нормированные амплитуды сигнала $A_s(t)$ от времени приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что после начала СЗ ДСЧ стало отрицательным, а после 11:20 – положительным. Значения $A_s(t)$ увеличились в 2 ÷ 3 раза. На медленные изменения $f_d(t)$ и $A_s(t)$ накладывались квазипериодические вариации с периодами $T \approx 10 \div 20$ мин.

Результаты ППФ приведены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что примерно за 70 ÷ 80 мин до начала СЗ появился цуг колебаний с периодом $T \approx 5.5$ мин и амплитудой $A = 50$ мГц. Среднее квадратичное значение помехи в этот день $\sigma \approx 8$ мГц. В течение СЗ появились еще два цуга колебаний с временем запаздывания Δt , близким к 0 и 110 мин. Их продолжительность ΔT была около 25 ÷ 30 мин, амплитуда – около 30 мГц.

31 мая 2003 г. Эффекты СЗ в этот день наблюдались на фоне релаксирующей магнитной бури и утреннего терминатора. Затмение сопровождалось сначала отрицательным, а затем положительным всплесками f_d (рис. 3). Нормированная амплитуда сигнала в течение СЗ сравнительно слабо изменялась, лишь перед его окончанием возник всплеск A_s длительностью около 30 мин. Кроме регулярных вариаций f_d и A_s , наблюдались их квазипериодические изменения с периодами 5 ÷ 15 мин.

ППФ позволила выявить два цуга колебаний с периодом $T \approx 6$ мин (см. рис. 4): за 70 мин до начала СЗ ($A \approx 100$ мГц, $\Delta T \approx 30$ мин) а также с временем запаздывания $\Delta t \approx 10$ мин ($A \approx 180$ мГц, $\Delta T \approx 40$ мин).

3 октября 2005 г. СЗ в этот день характеризовалось малым значением фазы (0.24). Эффекты затмения в зависимостях $f_d(t)$ и $A_s(t)$ выражены слабо (рис. 5). ППФ позволила выделить два цуга колебаний с $T \approx 6$ мин (рис. 6). Для первого из них $\Delta t \approx 0$ мин, $A \approx 50$ мГц, $\Delta T \approx 40$ мин, для второго – $\Delta t \approx 110$ мин, $A \approx 60$ мГц, $\Delta T \approx 40$ мин.

Таблица 2. Состояние космической погоды

Характеристики и параметры	11 августа 1999 г.	31 мая 2003 г.	3 октября 2005 г.	29 марта 2006 г.	1 августа 2008 г.	4 января 2011 г.
n_{sw} , м ⁻³	$0.6 \cdot 10^7$	$0.2 \cdot 10^7$	$(0.5 \div 1) \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$(0.4 \div 0.5) \cdot 10^7$	$(1.0 \div 1.5) \cdot 10^7$
T_{sw} , К	10^5	$\sim 10^5$	$(0.3 \div 0.4) \cdot 10^5$	$0.5 \cdot 10^5$	$0.5 \cdot 10^5$	$(1.1 \div 1.3) \cdot 10^5$
V_{sw} , км/с	350	700	350 ÷ 360	370 ÷ 380	370 ÷ 380	400 ÷ 420
p_{sw} , нПа	1 ÷ 1.5	~ 5	2 ÷ 3	0.5 ÷ 0.7	1.6 ÷ 1.7	3 ÷ 4
ε_A , ГВт	1 ÷ 10	1 ÷ 10	~ 0.1	~ 0.1	0.7 ÷ 0.8	1 ÷ 5
Π_p , м ⁻² · с ⁻¹ · ст ⁻¹	$\sim 2 \cdot 10^2$	$(1 \div 10) \cdot 10^2$	$\sim 10^2$	$(1 \div 3) \cdot 10^2$	$(1 \div 3) \cdot 10^2$	$\sim 10^2$
Π_e , м ⁻² · с ⁻¹ · ст ⁻¹	$\sim 5 \cdot 10^5$	$(1 \div 10) \cdot 10^5$	$(1 \div 2) \cdot 10^5$	$(5 \div 10) \cdot 10^5$	$(25 \div 30) \cdot 10^5$	$\sim 10^6$
B_z , нТл	1 ÷ 5	1 ÷ 5	~ 1	~ 5	1 ÷ 2	±6
D_{st} , нТл	-10	-30	-15	+10	+5	10 ÷ 15
K_p	1	3 ÷ 4	2	1	1	0 ÷ 3
A_p	8	17	7	6	3	4
F10.7, Вт · м ⁻² · Гц ⁻¹	$128 \cdot 10^{-22}$	$113 \cdot 10^{-22}$	$79 \cdot 10^{-22}$	$78 \cdot 10^{-22}$	$66 \cdot 10^{-22}$	$91 \cdot 10^{-22}$

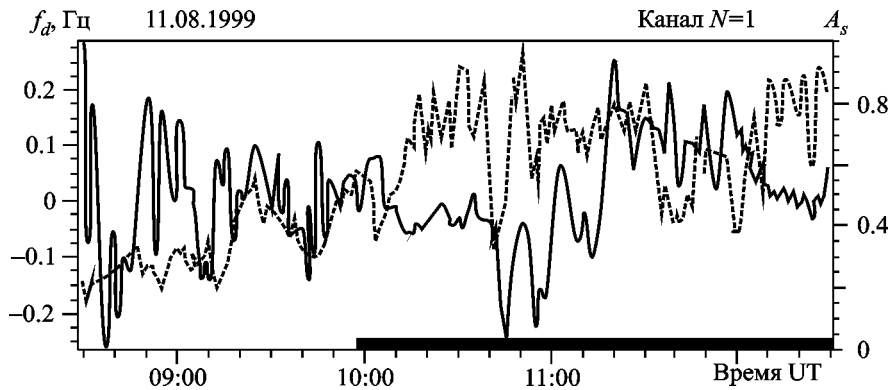


Рис. 1. Вариации ДСЧ (сплошная кривая) и амплитуды главного максимума спектра биений (пунктирная кривая) во время СЗ 11 августа 1999 г. над г. Харьков. Частота излучаемого сигнала 3.7 МГц. Здесь и далее на горизонтальной оси показан интервал времени наблюдения СЗ

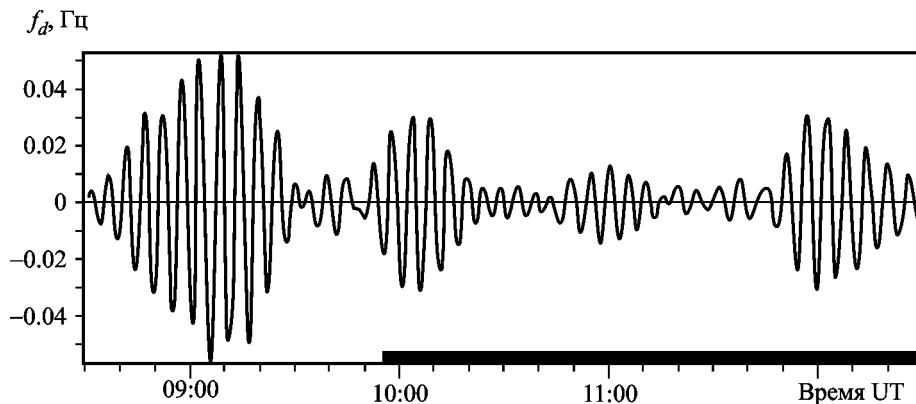


Рис. 2. Вариации ДСЧ 11 августа 1999 г. после ППФ. Параметры фильтра: $f_c = 11 \text{ ч}^{-1}$, $\Delta f = 1.1 \text{ ч}^{-1}$

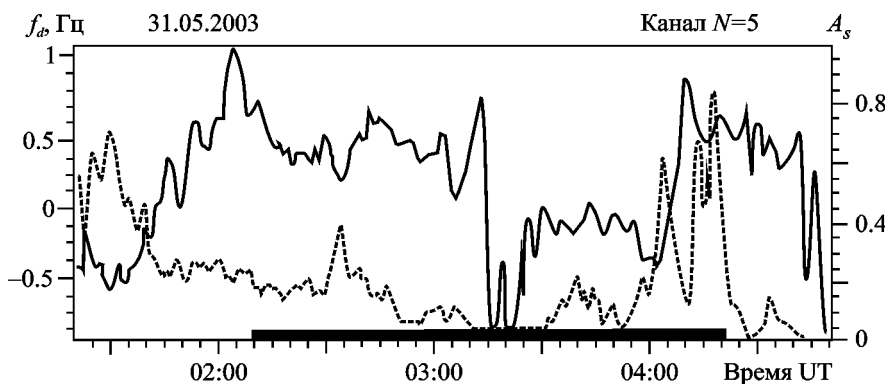


Рис. 3. Вариации ДСЧ (сплошная кривая) и амплитуды главного максимума спектра биений (пунктирная кривая) во время СЗ 31 мая 2003 г. над г. Харьков. Частота излучаемого сигнала 3.276 МГц

29 марта 2006 г. В течение СЗ f_d сначала уменьшалось от 0 до $-(0.6 \div 0.8)$ Гц, а затем увеличилось до 0.7 Гц (рис. 7). Значения A_s при затмении сильно флуктуировали от ~ 0.1 до $0.7 \div 0.8$. На медленные вариации $f_d(t)$ накладывались квазипериодические вариации с $T \approx 10 \div 15$ мин.

В результате ППФ выявлены три цуга колебаний с $T \approx 7.5$ мин (рис. 8). Первый цуг появился за 40 мин до начала затмения ($A \approx 60$ мГц, $\Delta T \approx 30$ мин). Для второго цуга $\Delta t \approx 20$ мин, $A \approx 60$ мГц, $\Delta T \approx 50$ мин, для третьего — $\Delta t \approx 120$ мин, $A \approx 150$ мГц, $\Delta T \approx 50$ мин.

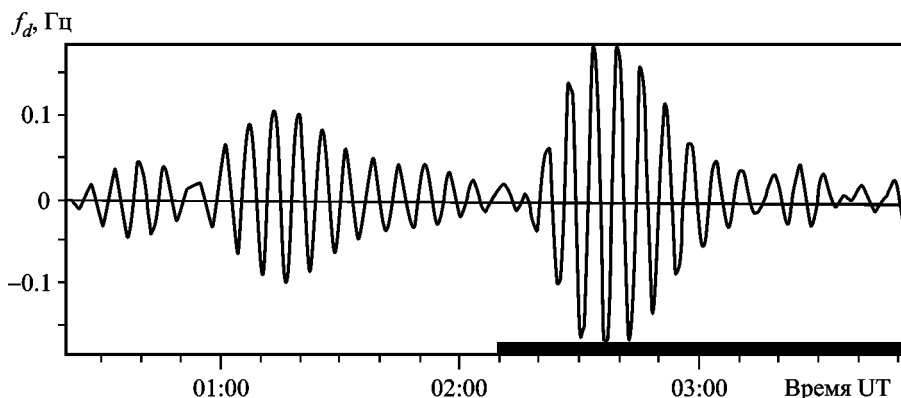


Рис. 4. Вариации ДСЧ 31 мая 2003 г. после ППФ. Параметры фильтра: $f_c = 10 \text{ ч}^{-1}$, $\Delta f = 1.0 \text{ ч}^{-1}$

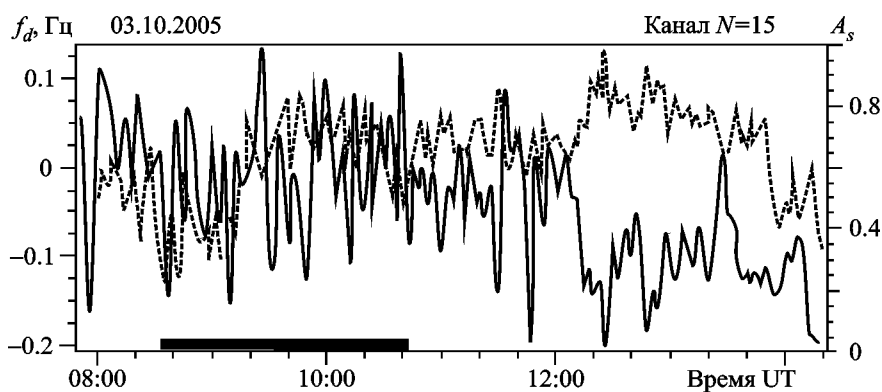


Рис. 5. Вариации ДСЧ (сплошная кривая) и амплитуды главного максимума спектра биений (пунктирная кривая) во время СЗ 3 октября 2005 г. над г. Харьков. Частота излучаемого сигнала 4.004 МГц

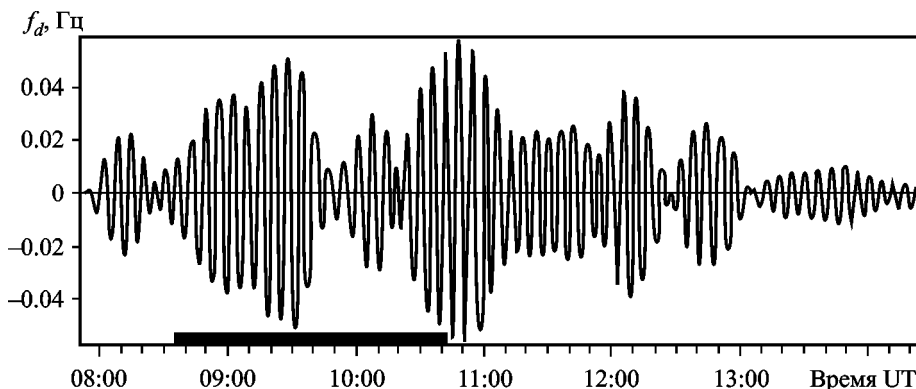


Рис. 6. Вариации ДСЧ 3 октября 2005 г. после ППФ. Параметры фильтра: $f_c = 10 \text{ ч}^{-1}$, $\Delta f = 1.0 \text{ ч}^{-1}$

1 августа 2008 г. В течение затмения кратковременное уменьшение f_d до -0.2 Гц сменилось продолжительным увеличением до $0.3 \div 0.4$ Гц (рис. 9). СЗ сопровождалось уменьшением A_s примерно от 0.3 до 0.1 . Как в $f_d(t)$, так и в $A_s(t)$ были выражены квазипериодические процессы с $T \approx 10 \div 20$ мин.

ППФ способствовала обнаружению цугов колебаний с $T \approx 6.7$ мин (рис. 10). Первый цуг появился за 80 мин до начала СЗ ($A \approx 60$ мГц, $\Delta T \approx 25 \div 30$ мин), второй цуг возник с $\Delta t \approx 0$ мин ($A \approx 100$ мГц, $\Delta T \approx 80$ мин).

4 января 2011 г. В течение СЗ f_d сначала уменьшалось до 0.2 Гц, а затем увеличивалось

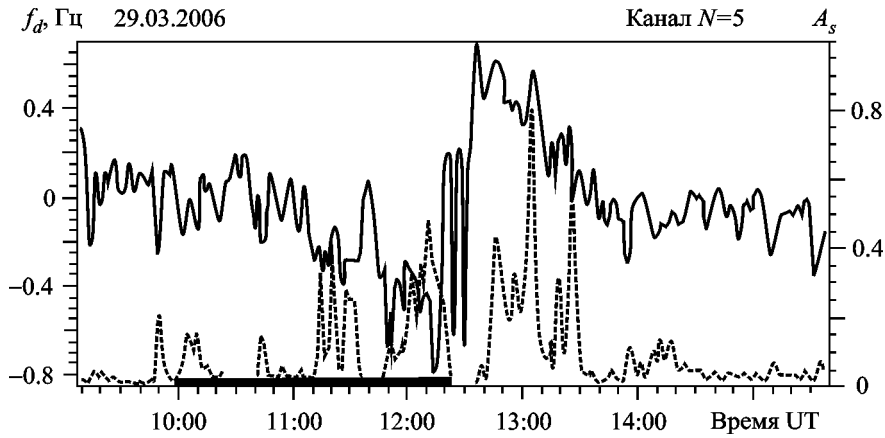


Рис. 7. Вариации ДСЧ (сплошная кривая) и амплитуды главного максимума спектра биений (пунктирная кривая) во время СЗ 29 марта 2006 г. над г. Харьков. Частота излучаемого сигнала 4.004 МГц

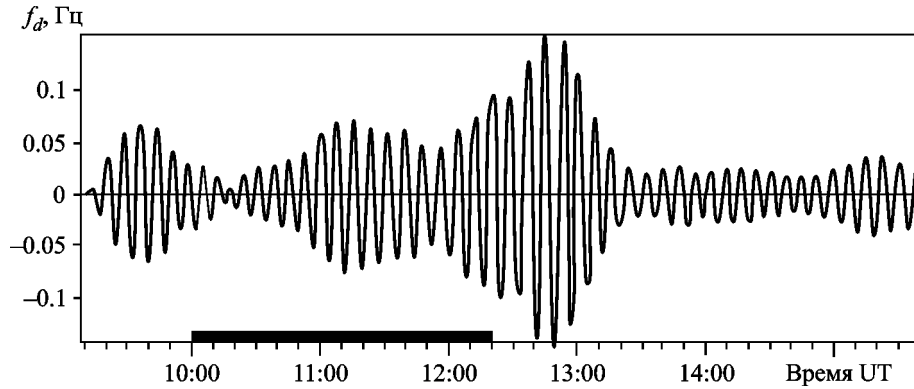


Рис. 8. Вариации ДСЧ 29 марта 2006 г. после ППФ. Параметры фильтра: $f_c = 8 \text{ ч}^{-1}$, $\Delta f = 0.8 \text{ ч}^{-1}$

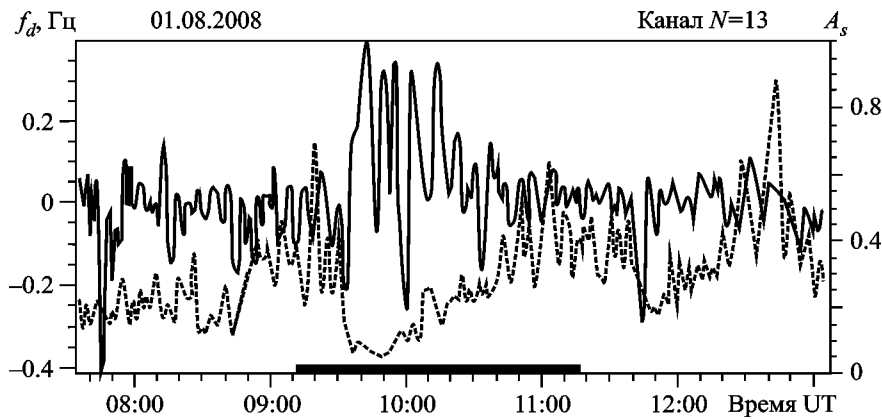


Рис. 9. Вариации ДСЧ (сплошная кривая) и амплитуды главного максимума спектра биений (пунктирная кривая) во время СЗ 1 августа 2008 г. над г. Харьков. Частота излучаемого сигнала 3.2 МГц

до 0.6 Гц (рис. 11). Значения A_s увеличивались от ~ 0.1 до $0.5 \div 0.6$. Кроме медленных вариаций $f_d(t)$ и $A_s(t)$, наблюдались их квазипериодические изменения с $T \approx 10 \div 20$ мин.

В результате ППФ выявлено несколько цугов колебаний с $T \approx 7.5$ мин (рис. 12). Первый из них – слабый с $A \approx 20$ мГц ($\sigma \approx 16$ мГц) – возник за 80 мин до СЗ. Следующий цуг появил-

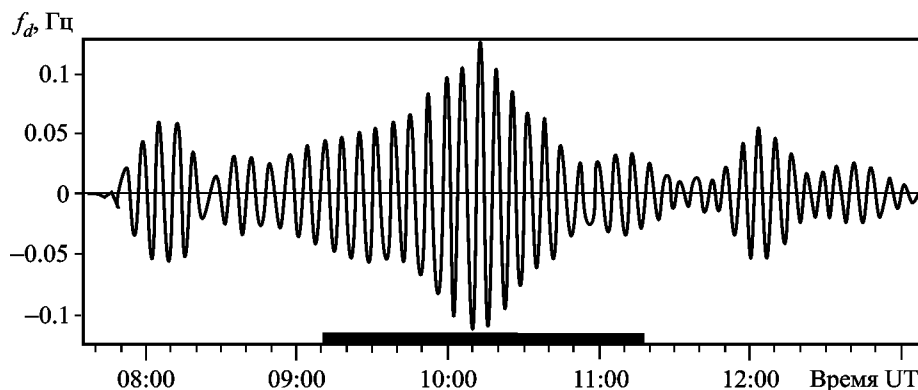


Рис. 10. Вариации ДСЧ 1 августа 2008 г. после ППФ. Параметры фильтра: $f_c = 9 \text{ ч}^{-1}$, $\Delta f = 0.9 \text{ ч}^{-1}$

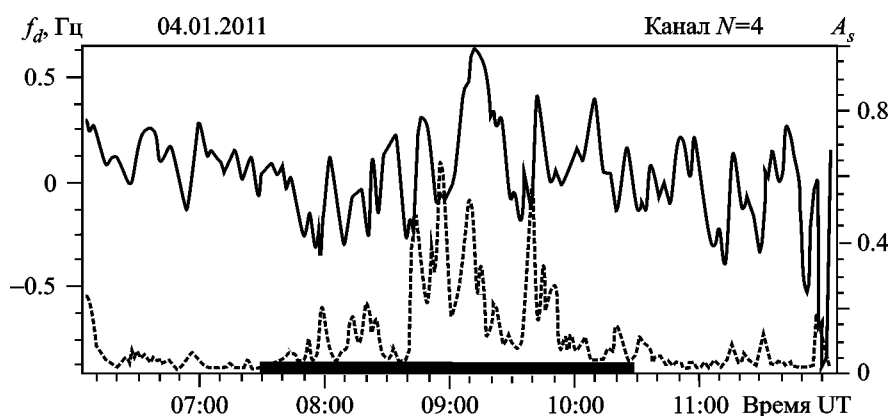


Рис. 11. Вариации ДСЧ (сплошная кривая) и амплитуды главного максимума спектра биений (пунктирная кривая) во время СЗ 4 января 2011 г. над г. Харьков. Частота излучаемого сигнала 4.2 МГц

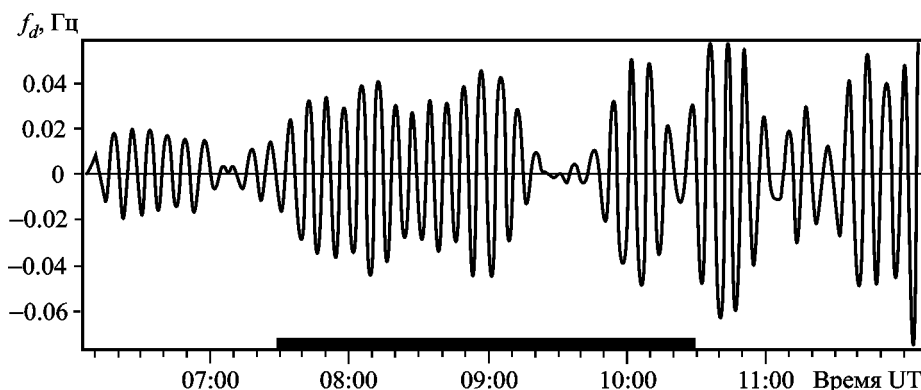


Рис. 12. Вариации ДСЧ 4 января 2011 г. после ППФ. Параметры фильтра: $f_c = 8 \text{ ч}^{-1}$, $\Delta f = 0.8 \text{ ч}^{-1}$

ся практически сразу после начала затмения. Для него $\Delta t \approx 0$ мин, $A \approx 40$ мГц, $\Delta T \approx 40$ мин. Еще до окончания этого цуга возник следующий цуг примерно с такими же параметрами. Примерно через 130 мин после начала СЗ наблюдалась следующая группа цугов с $A \approx 40 \div 50$ мГц и $\Delta T \approx 30$ мин.

6. Обсуждение

Наши наблюдения показали, что слабые колебания ДСЧ возникали достаточно часто, но в этих случаях их амплитуда $A \approx 10 \div 20$ мГц. Уровень инфразвука увеличивался на порядок во время гео-космических бурь. Анализ состояния космичес-

кой погоды показал, что пять СЗ имели место на фоне невозмущенной геокосмической среды. Лишь 31 мая 2003 г. затмение наблюдалось на стадии релаксации магнитной бури. Можно утверждать, что спокойное состояние космической погоды благоприятствовало выявлению эффектов СЗ.

В течение всех СЗ зависимости $f_d(t)$ и $A_s(t)$ были промодулированы квазипериодическими колебаниями с $T \approx 10 \div 20$ мин. Очевидно, что затмения вызывали генерацию ВГВ. Эти волны наблюдались и ранее (см., например, [2–5, 11]).

6.1. Параметры инфразвука

Все СЗ сопровождалось появлением цугов колебаний инфразвукового диапазона. Как правило, наблюдалось несколько цугов с амплитудой A , заметно превышающей среднеквадратическое отклонение σ уровня фоновых флуктуаций. Заметим, что при оценке σ исключались цуги колебаний, которые могли быть связаны с СЗ. По значениям A и σ вычислялось отношение сигнал/шум для искомого колебания по формуле

$$q = \frac{A^2}{2\sigma^2}.$$

Первый цуг колебаний наблюдался задолго до начала СЗ в месте расположения обсерватории.

Сводка основных параметров инфразвукового колебания второго и третьего цугов, а также шума приведены в табл. 3. Там же указаны средние значения этих параметров. Второй цуг колебаний

отмечался с запаздыванием $\Delta t \approx 0 \div 20$ мин после начала затмения. Третий цуг наблюдался в четырех случаях через $110 \div 130$ мин после наступления СЗ. Длительность ΔT цугов изменялась от 25 до 80 мин, но в среднем составляла около $40 \div 50$ мин. Значение q варьировалось в пределах $3 \div 28$. Среднее значение q было близко к 10 и 17 для указанных выше цугов.

Появление первого цуга колебаний до начала затмения невозможно объяснить прямым воздействием затмения. Дело в том, что скорость движения лунной тени по поверхности Земли в средних широтах превышает скорость инфразвука на высотах средней ионосферы ($z \sim 100 \div 300$ км). Если этот цуг связан с затмением, он является результатом взаимодействия подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера, например, высыпания энергичных электронов из магнитосферы [20]. В работе [20] описан механизм высыпания электронов, стимулированный затмением. Хорошо известно, что высыпание частиц сопровождается генерацией инфразвука [21].

6.2. Механизм генерации инфразвука

Второй и третий цуги колебаний связаны с прямым воздействием СЗ. Затмения, как известно, сопровождаются охлаждением атмосферного газа как у поверхности Земли, так и в стратосфере, а также в термосфере. При этом изменяется внутренняя энергия охлаждаемого объема атмосферы [16]. Вариации этой энергии, как и сверх-

Таблица 3. Значения основных параметров второго и третьего (в скобках) цугов инфразвуковых колебаний

Дата	T , мин	A , мГц	σ , мГц	q	Δt , мин	ΔT , мин
11 августа 1999 г.	5.5	30 (30)	8 (5)	7 (18)	0 (110)	25 (30)
31 мая 2003 г.	6	180 –	30 –	18 –	10 –	40 –
3 октября 2005 г.	6	50 (60)	10 (10)	13 (18)	0 (110)	50 (40)
29 марта 2006 г.	7.5	60 (150)	20 (20)	5 (28)	20 (120)	50 (50)
1 августа 2008 г.	6.7	100 –	20 –	13 –	0 –	80 –
4 января 2011 г.	7.5	40 (40)	16 (16)	3 (3)	0 (130)	40 (30)
Среднее значение	6.5	77 (70)	17 (13)	10 (17)	5 (120)	47 (37)

звуковое движение лунной тени, служат источниками акустико-гравитационных волн в нейтральной атмосфере [16, 22]. Под действием этих волн модулируется концентрация электронов N в ионосфере. Вариации N наблюдаются радиофизическими методами и, в частности, при помощи доплеровского радиозондирования.

В пользу теплового механизма генерации инфразвука свидетельствуют также длительности второго и третьего цугов, которые примерно равны длительности охлаждения объема атмосферного газа.

6.3. Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов

Для оценки $\delta_N = \Delta N/N$ воспользуемся соотношением из работ [14, 17]:

$$\delta_N = \frac{cT}{4\pi L} \frac{f_{da}}{f}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, T – период колебаний ДСЧ, f_{da} – их амплитуда, f – несущая частота радиосигнала, L – характерный высотный размер, дающий основной вклад в ДСЧ. Полагая $T = 6$ мин, $L = 50$ км при $f = 4.2$ МГц и $f_{da} = 20 \div 100$ мГц получим, что $\delta_N = 0.1 \div 0.5$ %. Близкие значения $\delta_N \sim 0.2$ % отмечались нами при изучении возможности генерации инфразвука солнечным терминатором [19]. Этого и следовало ожидать, так как между эффектами, сопровождающими движение терминатора и затмение, есть много общего.

6.4. Эффективность генерации инфразвука затмением

Далее оценим относительную долю энергии η , которая расходуется на генерацию инфразвука, т. е. эффективность его генерации СЗ. Будем считать, что основной вклад в генерацию инфразвука дает охлаждение атмосферного газа. Как показали экспериментальные и теоретические исследования, на высотах термосферы его температура уменьшается примерно на $\Delta T_a \approx 10$ К. При этом плотность внутренней энергии газа уменьшается на величину

$$\epsilon_T = \rho C \Delta T_a, \quad (2)$$

где ρ – плотность газа, $C \approx 10^3$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Плотность энергии, переносимой инфразвуком, дается известным соотношением

$$\epsilon_a = \rho v^2 = \frac{(\Delta p)^2}{\gamma p} = \frac{p \delta_p^2}{\gamma}, \quad (3)$$

где v – амплитуда скорости частиц в волне, Δp – амплитуда возмущения давления воздуха, $\delta_p = \Delta p/p$, γ – показатель адиабаты. За период T частицы воздуха смещаются по высоте на

$$\Delta z = \frac{vT}{2\pi}.$$

Электроны с концентрацией N , являясь малой примесью, колеблются вместе с плотностью воздуха. При этом амплитуда возмущения N

$$\Delta N = \left| \frac{dN}{dz} \right| \Delta z = N \frac{\Delta z}{L_N},$$

где L_N – характерный высотный масштаб изменения $N(z)$. Отсюда относительная амплитуда возмущений концентрации электронов в волне

$$\delta_N = \frac{\Delta z}{L_N} = \frac{vT}{2\pi L_N}.$$

Учитывая, что

$$v = \frac{\Delta p}{\rho v_s} = \frac{v_s \delta_p}{\gamma},$$

где $v_s = (\gamma p/\rho)^{1/2}$ – скорость звука, получим

$$\delta_N = \frac{v_s T}{2\pi \gamma L_N} \delta_p. \quad (4)$$

При $T = 300 \div 500$ с, $L_N \approx 50$ км и $v_s \approx 400$ м/с имеем

$$k_N = \frac{\delta_N}{\delta_p} \frac{v_s T}{2\pi \gamma L_N} \approx 0.27 \div 0.45.$$

Важно, что коэффициент k_N пропорционален T .

С учетом (2) и (3) получим

$$\eta = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_T} = \frac{p}{\gamma \rho C \Delta T_a} \delta_p^2 = \frac{v_s^2}{\gamma^2 C \Delta T_a} \delta_p^2. \quad (5)$$

Из (4) следует, что

$$\delta_p = \frac{2\pi\gamma L_N}{v_s T} \delta_N. \quad (6)$$

С учетом (1) и (6) имеем

$$\delta_p = \frac{\gamma L_N c}{2 L v_s} \delta_f,$$

где $\delta_f = f_{da}/f$. Обычно $L_N \approx L$, тогда

$$\delta_p = \frac{\gamma c}{2 v_s} \delta_f. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), получим

$$\eta = \frac{c^2}{4C\Delta T_a} \delta_f^2. \quad (8)$$

При экспериментальных значениях $\delta_f = (0.5 \div 2.5) \cdot 10^{-8}$ и $\Delta T_a = 10$ К из (8) имеем $\eta \approx 5.6 \cdot 10^{-5} \div 1.4 \cdot 10^{-3}$.

Для сравнения укажем, что в энергию ВГВ преобразуется от 0.02 до 0.1 внутренней энергии газа [14]. Эффективность генерации инфразвука на 2–3 порядка ниже, чем эффективность генерации ВГВ. Именно это обстоятельство существенно затрудняет обнаружение инфразвуковых колебаний, сопровождающих СЗ.

Таким образом, примененная в настоящей работе ППФ позволила уверенно выделить инфразвуковые вариации ДСЧ для всех шести СЗ, а следовательно, подтвердить независимым методом обработки обнаруженный ранее в работах [16, 17] инфразвуковой эффект.

7. Выводы

1. При помощи доплеровского ВЧ радара вертикального зондирования с использованием спектрального оценивания и ППФ для шести событий надежно подтвержден факт генерации инфразвука под действием СЗ. Обнаружены три цуга колебаний, сопровождавших затмение.

2. Первый цуг колебаний в четырех случаях появлялся за 30 ÷ 80 мин до начала СЗ в месте наблюдения. Если этот цуг связан с затмением, он не является результатом прямого воздействия СЗ. Он может быть результатом вторичных процессов, стимулируемых затмением в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера.

3. Второй цуг колебаний регистрировался практически сразу, а третий – с запаздыванием 110 ÷ 130 мин после начала СЗ в месте наблюдения. Эти цуги колебаний, скорее всего, вызваны СЗ. Механизм генерации инфразвука связан с охлаждением атмосферного газа в затененной области и со сверхзвуковым движением лунной тени.

4. Амплитуда обоих цугов колебаний в среднем превышала уровень шума в 3 ÷ 8 раз, а отношение сигнал/шум составляло 3 ÷ 28.

5. Продолжительность всех цугов колебаний была близка к 40 ÷ 50 мин.

6. Амплитуде колебаний ДСЧ в 20 ÷ 100 мГц соответствовало относительное изменение концентрации электронов в поле инфразвуковой волны, равное 0.1 ÷ 0.5 %.

7. Показано, что эффективность генерации инфразвука СЗ была близка к $10^{-4} \div 10^{-3}$. Это на два – три порядка ниже эффективности генерации ВГВ.

8. Инфразвуковые эффекты СЗ и солнечных терминаторов оказались подобными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beer T. and 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.
2. Broche P., Crochet M., and 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.
3. Ishinose T. and 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.
4. Bertin F., Hughes K.A., and Kersley L. Atmospheric waves induced by solar eclipse of 30 June 1973 // J. Atmos. Terr. Phys. – 1977. – Vol. 39, No. 3. – P. 457–461.
5. Butcher E. C., Downing A. M., and 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, No. 5. – P. 439–444.
6. Chandra H., Sethia G., Vyas G. D., Deshpande M. R., and 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.
7. Deshpande M. R., Chandra H., Sethia G., Vats H. O., Vyas G. D., Iyer K. N., and 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. A48, No. 3. – P. 427 – 433.
8. Rama Rao P. V. S., Rao B. V. P. S., Nru D., and Niranjana K. TEC observations at Waltair during the total solar eclipse of 16 February 1980 // Proc. Indian Nat. Acad. Sci. – 1982. – Vol. A48, No. 3. – P. 434–438.

9. Salah J. I., Oliver W. L., Foster J. C., Holt J. M., Emery B. A., and Roble R. G. Observations of the May 30, 1984, annual solar eclipse at Millstone Hill // *J. Geophys. Res.* – 1986. – Vol. 91, No. A2. – P. 1651–1660.
10. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., and Chernukhov V. V. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data // *Geophys. Res. Lett.* – 1998. – Vol. 25, No. 4. – P. 465–468.
11. Jones T. B., Wright D. M., Milner J., Yeoman T. K., Reid T., Senior A., and 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.
12. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Радиофизические наблюдения волновых возмущений в ионосфере в период частного солнечного затмения 1 августа 2008 г. // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 390–402.
13. Кащеев С. Б., Зализовский А. В., Колосков А. В., Галушко В. Г., Пикулук И. И., Ямпольский Ю. М., Куркин В. И., Литовкин Г. И., Орлов А. Н. Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 353–366.
14. Черногор Л. Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2010. – Т. 50, № 3. – С. 361–376.
15. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., and Lyashenko M. V. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv // *Int. J. Remote Sens.* – 2011. – Vol. 32, No. 11. – P. 3219–3229.
16. Черногор Л. Ф. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 1. Экспериментальные данные // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2012. – Т. 52, № 6. – С. 807–817.
17. Черногор Л. Ф. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 2. Спектральный анализ // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2012. – Т. 52, № 6. – С. 818–831.
18. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Динамика ионосферной плазмы над Харьковом во время солнечного затмения 4 января 2011 г. // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 132–145.
19. Пушин В. Ф., Черногор Л. Ф. Обнаружение квазипериодических процессов в ионосфере в диапазоне акустико-гравитационных волн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 333–343.
20. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2000. – Т. 5, № 4. – С. 371–375.
21. Пономарев Е. А., Ерущенков А. И. Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (обзор) // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1977. – Т. 20, № 12. – С. 1773–1789.
22. Chimonas G. and Hines C. O. Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse // *J. Geophys. Res.* – 1970. – Vol. 75. – P. 875–876.

В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ИНФРАЗВУКОВИЙ ЕФЕКТ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ

Актуальність роботи обумовлена необхідністю дослідження фізичних ефектів, що супроводжують рідкісне природне явище – сонячне затемнення. До тепер досліджувались особливості генерації сонячним затемненням внутрішніх гравітаційних хвиль в атмосфері з періодами $T \sim 10 \div 100$ хв. У цій роботі зроблено спробу підтвердити факт генерації та оцінити основні параметри інфразвукових коливань з $T \sim 1 \div 10$ хв, що супроводжували сонячні затемнення. Для спостережень використовувався доплерівський ВЧ радар вертикального зондування. У обробці даних застосовувався спектральний аналіз і смуго-пропускаюча фільтрація. Підтвержено, що часткові сонячні затемнення, які мали місце над Харковом (Україна) в 1999–2011 рр., як правило, супроводжувалися коливаннями доплерівського зміщення частоти інфразвукового діапазону ($T \sim 5 \div 8$ хв) і амплітудою $20 \div 100$ мГц. Їм відповідала відносна амплітуда коливань концентрації електронів близько $0.1 \div 0.5$ %.

V. F. Pushin and L. F. Chernogor

V. Kazarin National University of Kharkiv, 4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

INFRASONIC EFFECT OF SOLAR ECLIPSES

The relevance of this study is due to the need to understand physical effects associated with rare phenomenon, solar eclipse. Until recently, the features of internal gravity wave generation have been studied in the 10–100 min period range, while in this study an attempt is made to confirm the fact of generation and estimate the general parameters of infrasound oscillations associated with solar eclipses in the 1–10 min period range. The observations were made with the HF Doppler radar at vertical incidence. The data were subjected to spectral analysis and band-pass filtering. The solar eclipses that had occurred over Kharkiv city (Ukraine) within 1999–2011 are determined to be associated with Doppler shift of frequency oscillations in the infrasound frequency band (~ 5 –8 min period range) and with amplitude of 20–100 mHz. The corresponding amplitude of electron density oscillations was approximately equal to 0.1–0.5 %.

Статья поступила в редакцию 19.11.2012