



УДК 621.371

© В. И. Нестеров, 2012

**ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ
СДВ ДИАПАЗОНА ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ
31 ИЮЛЯ 1981 ГОДА**

Нестеров В. И. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика», тел.22-43-47,
e-mail: vinestor@mail.ru (ТОГУ)

Во время солнечного затмения в нижней ионосфере, которую можно исследовать методами распространения радиоволн СДВ диапазона, происходит быстрое изменение интенсивности солнечной радиации. Изменения, происходящие в нижних слоях ионосферы, достаточно четко обнаруживаются при регистрации фазы СДВ сигналов, распространяющихся на трассах, пересекающих область затмения. В статье рассматривается связь между эффективной высотой ионосферы и фазой затмения.

During solar eclipse in lower ionosphere, which can be studied by the propagation of VLF radio waves, a rapid change of solar irradiation occurs. Variations in lower layers of ionosphere are clearly defined in phase recording of VLF waves that propagate along paths crossing the eclipse region. The paper deals with the relation between the effective ionosphere height and solar eclipse phase.

Ключевые слова: распространение радиоволн СДВ диапазона, затмение Солнца, фаза принимаемого сигнала, эффективная высота отражения.

Солнечное затмение приводит к уменьшению плотности электронов в нижней ионосфере (D-слой), которая в свою очередь приводит к увеличению эффективной высоты отражения радиоволн СДВ диапазона. Экспериментально это рассматривается как увеличение фазового пути волн данного диапазона при пересечении области затмения. Измерения фазы принимаемого сигнала, связанные во времени с вариациями отклика ионосфера во время солнечного затмения, могут оказаться полезными при исследовании времени реакции D-слоя. Соответственно, измерения фазы принимаемых сигналов данного диапазона радиоволн могут служить источником дополнительной информации о влиянии Солнца на параметры волновода Земля – ионосфера.

На длинных трассах преимущественно применяется модовая теория распространения и связанные с солнечным затмением фазовые эффекты могут

быть интерпретированы как увеличение фазовой скорости доминирующей моды распространения при пересечении зоны затмения.

В более ранних работах [1 - 6] (1956 – 1981 г.г.) применялись измерения фазы и амплитуды сигналов СДВ диапазона. В этих работах приводятся результаты наблюдений за изменениями характеристик принимаемых сигналов на трассах различной протяженности, в различное время суток.

В статье [2] рассматривалось полное солнечное затмение 12 ноября 1966 года на трассе NPM (26,1 кГц, Гавайи) – Сан Пауло (Бразилия). Длина трассы распространения составляла 13300 км. Значительная часть трассы находилась в ночных условиях, а затмение наблюдалось на освещенной части трассы. Наблюдалось резко выражено изменение фазы, соответствующее максимальной задержке, равной 12,3 мкс.

В работе [3] проводились исследования принимаемого сигнала на очень длинной трассе GBR (16,0 кГц, Регби) – Канберра (Австралия) во время полного солнечного затмения 22 сентября 1968 г. (длина трассы распространения составляла 17100 км).

В современных работах [7, 8], посвященных солнечным затмениям 29 марта 2006 г. и 1 августа 2008 г., также отмечается, что на распространение сигналов данного диапазона влияет прохождение лунной тени в момент затмения Солнца. Однако как в этих работах, так и в работе [5] отмечается, что наиболее эффективный метод наблюдения за изменением параметров трасс распространения радиосигналов является измерение фазы.

В работе [9] отмечается, что при затмении Солнца происходят следующие изменения в околоземной среде: охлаждение атмосферного газа, генерация ударной волны плотности и, как результат, акустико-гравитационных волн в атмосфере, уменьшение концентрации электронов в ионосфере, уменьшение температуры электронов и ионов во внешней ионосфере, вариации геомагнитного поля и др. Представляет интерес дальнейшее исследование уже обнаруженных эффектов и поиск других проявлений затмения Солнца в атмосфере, особенно на высотах нижней ионосферы.

В работе [10] отмечается, что процессы и эффекты в момент солнечного затмения существенно зависят от фазы в солнечной активности, времени года, времени суток, степени покрытия диска Солнца, состояния космической и атмосферной погоды и т.д. По этой причине каждое затмение Солнца является уникальным, а исследование связанных с ними эффектов – актуальным.

В работах [12 - 14] рассматриваются результаты исследований распространения радиоволн данного диапазона во время полного солнечного затмения 31 июля 1981 года. Время запаздывания максимума ионосферных эффектов относительно момента наибольшей затененности на трассе наблюдения составляло порядка 8 мин [12].

Рассмотрим подробнее обстоятельства полного солнечного затмения, состоявшегося 31 июля 1981 года. Это затмение началось в $2^{\text{h}} 13^{\text{m}}$ всемирного времени (UT) в восточной акватории Черного моря и закончилось в $5^{\text{h}} 13^{\text{m}}$ UT в центральной части Тихого океана. Полное солнечное затмение наблюдалось



в полосе шириной от 57 км до 108 км, протянувшейся от Черного моря до Курильских островов и максимальной скорости до 3 км/с. В точке приема (г. Хабаровск) начало затмения $2^{\text{h}}30^{\text{m}}$ UT, момент наибольшей фазы $3^{\text{h}}52^{\text{m}}$ UT (наибольшая фаза затмения - 0.90), конец затмения $5^{\text{h}}12^{\text{m}}$ UT. Общая продолжительность солнечного затмения на Земле составила 5 часов 9 минут. За это время лунная тень пройдет по земной поверхности расстояние около 12300 км.

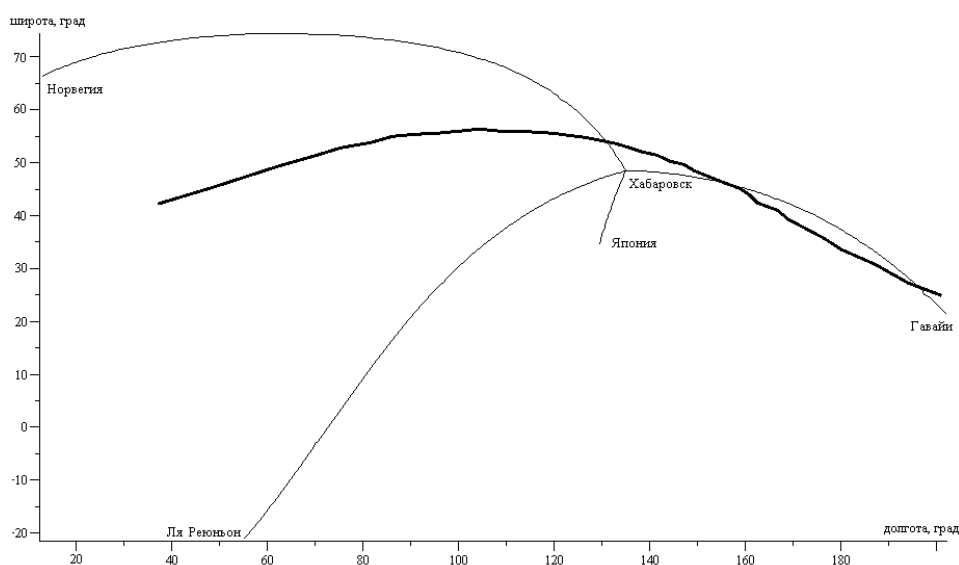


Рис.1. Трассы распространения и движения лунной тени во время полного солнечного затмения 31 июля 1981 г

На рис.1 представлены трассы распространения сигналов радионавигационной системы «Омега» (РНС) с пунктом приема в г.Хабаровске и движением лунной тени во время полного солнечного затмения. Как видно из рисунка, лунная тень пересекает трассы распространения. Трассу Норвегия – Хабаровск приблизительно в $3^{\text{h}}45^{\text{m}}$ UT, а трассу Гавайи – Хабаровск – дважды, сначала в $4^{\text{h}}15^{\text{m}}$ UT, а затем в $5^{\text{h}}15^{\text{m}}$ UT. Время отклонений фазы принимаемого сигнала, предположительно связанного с полным солнечным затмением, составляет от $1^{\text{h}}05^{\text{m}}$ для трасс Япония - Хабаровск, Ля Реюньон – Хабаровск до $1^{\text{h}}25^{\text{m}}$ для трасс Норвегия – Хабаровск, Гавайи – Хабаровск.

Однако в данной работе рассматриваются результаты изменений фазы принимаемого сигнала на частотах 10.2 кГц и 13.6 кГц только для двух трасс: Гавайи – Хабаровск и Япония – Хабаровск. Это обусловлено тем, что на трассе Ля Реюньон – Хабаровск начало затмения совпало по времени с моментом восхода Солнца на трассе. Трасса Норвегия – Хабаровск в это время года полностью освещена, но так как 2/3 трассы проходит через авроральный овал, поэтому здесь в большей мере проявляются эффекты, связанные с возмущениями в ионосфере в высоких широтах. Также необходимо отметить,

что в этот день в 0^h50^m UT произошло внезапное ионосферное возмущение, которое могло оказать значительное влияние.

Вариации фазы принимаемых сигналов измерялись относительно высокостабильного опорного генератора. С целью обнаружения влияния затмения на параметры распространения выполнены измерения суточного изменения фазы в день затмения, а также дни, предшествующие этому событию, и после затмения. С 27 июля 1981 года по 3 августа регистрация принимаемых сигналов по всем трассам и частотам осуществлялась с дискретностью в 30 секунд.

Изменение эффективной высоты отражения. В некоторых работах [8, 12, 13] отмечается, что при прохождении полосы лунной тени вдоль трассы распространения сигналов не обнаруживаются изменения амплитуды принимаемого сигнала. В работе [13] отмечается о необходимости свести влияние затмения к изменению геометрических размеров волновода Земля - ионосфера, а не импеданса его стенок. В качестве такого параметра вводится h - эффективная высота волновода, который определяется как уровень постоянной концентрации электронов вдоль трассы распространения.

Электронная концентрация в максимуме слоя изменяется в зависимости от линейной фазы затмения: $N_m = N_m(\Phi)$ (Φ - отношение закрытой части диаметра Солнца к полному), в результате чего любому фиксированному значению $N(h) = N_0$ соответствуют различные высоты h [13]. Аппроксимируя профиль электронной концентрации в нижней ионосфере экспонентой, выбираем в качестве N_0 значение электронной концентрации на высоте дневного волновода $h_0 = 64$ км, определим изменение эффективной высоты отражения волновода h_{Φ} как функцию Φ . В предположении, что излучение по диску Солнца и его короне распределено равномерно, изменение высоты слоя $\Delta h = h_{\Phi} - h_0$ можно представить в виде

$$\Delta h = H \ln \frac{I(\Phi)}{I(0)}, \quad (1)$$

где $I(\Phi)$ - поток излучения, зависящий от фазы затмения, $I(0)$ - полный поток в дневное время.

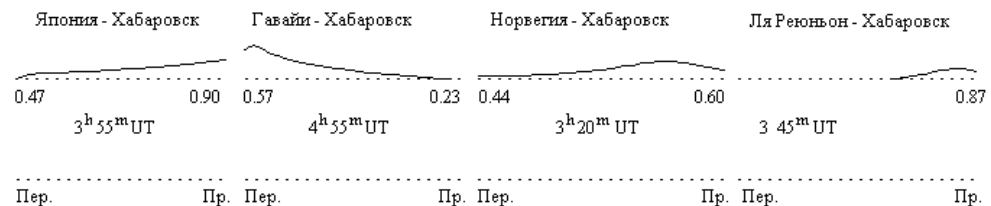


Рис.2. Схематические профили трасс в определенные моменты времени; пунктирная линия - уровень невозмущенного волновода, цифры на краях указывают на фазу затмения

Согласно [13], изменение эффективной высоты Солнца во время солнечного затмения можно посчитать по формуле:



$$\Delta h = H \ln \left[\frac{I_N}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_{\odot}} \right) + \frac{I_0}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_{\odot}} \right) + \frac{S(\Phi)}{S_{\odot}} \right], \quad (2)$$

где I_N - ионизирующее излучение, действующее в ночное время, I_0 - поток от солнечной короны, $S(\Phi)$ - площадь открытой части Солнца, S_{\odot} - полная площадь солнечного диска. При расчете изменения высоты по формуле (2), значения величин были выбраны: $H = 6.5$ км, $I_N/I_{\text{дн}} = 0,01$, $I_0/I_{\text{дн}} = 0,1$ [15]. Отношение открытой площади Солнца к полной во время солнечного затмения выразили через линейную фазу затмения [15].

С помощью бесселевых элементов затмения, по методике, изложенной в [15], были рассчитаны распределение фаз затмения вдоль трасс распространения в интересующие моменты времени. Для этого предварительно разбивались трассы на промежуточные точки через 100 км, рассчитывались их координаты. Затем по графику из работы [11] определяем эффективную высоту отражения. На рис.2 показаны профили трасс в момент времени, соответствующий максимальному изменению фазы сигнала. Аналогичные профили, рассчитанные для различных моментов времени, будут использоваться при расчете ожидаемых вариаций фазы во время солнечного затмения.

Вариации фазы на трассах во время солнечного затмения. Согласно [16], характер зависимости фазовой скорости от частоты определяется преимущественно геометрическими характеристиками волноводного канала (высотой и кривизной), а электрические характеристики его стенок играют значительно меньшую роль. Сферичность волновода приводит к уменьшению фазовой скорости. Необходимо также отметить, что многомодовый характер распространения в СДВ диапазоне приводит к тому, что поле с расстоянием и частотой изменяется нерегулярно. При расстояниях больше 3000 км одномодовое распространение имеет место только для частот ниже 14 кГц (на этих частотах доминирующей является первая мода).

При одномодовом распространении на трассе фаза поля линейно изменяется с расстоянием [13]:

$$\varphi = \beta r \quad (3)$$

Параметр β , определяющий приращение аргумента функции ослабления отдельной (в нашем случае – первой) моды при изменении расстояния на 1000 км [16]:

$$\beta \left[\frac{\text{РМ}}{1000 \text{ км}} \right] \cong 2,095 \cdot 10^{-2} f \left(1 - \frac{v_1}{c} \right), \quad (4)$$

где f – частота сигнала в герцах, v_1 - фазовая скорость первой моды.

В случае трасс переменной высоты волновода Земля-ионосфера фазовая скорость вдоль трассы распространения не остается постоянной. Как видно из рисунка 2, изменения высоты волновода в случае полного солнечного затмения 31 июля 1981 года происходят достаточно плавно, поэтому определить значение φ_z можно по формуле

$$\varphi_z = \int_0^r \beta(r) dr. \quad (5)$$

Приближенная формула для нахождения фазовой скорости в случае однодогового распространения (основной является первая мода) [16]:

$$\frac{v_g}{c} - 1 \approx \frac{\pi^2}{8k^2 h^2} - \frac{h}{2a} \left(1 - \frac{4}{\pi^2}\right), \quad (6)$$

где $a = 6370$ км – радиус Земли, $k = \omega/c$ – волновое число в вакууме, $c = 299792,5$ км/с – скорость света в вакууме, ω – циклическая частота.

Таким образом, в соответствии с профилем трасс с использованием линейной интерполяции находятся фазовые скорости и вычисляется фаза сигнала для различных моментов времени.

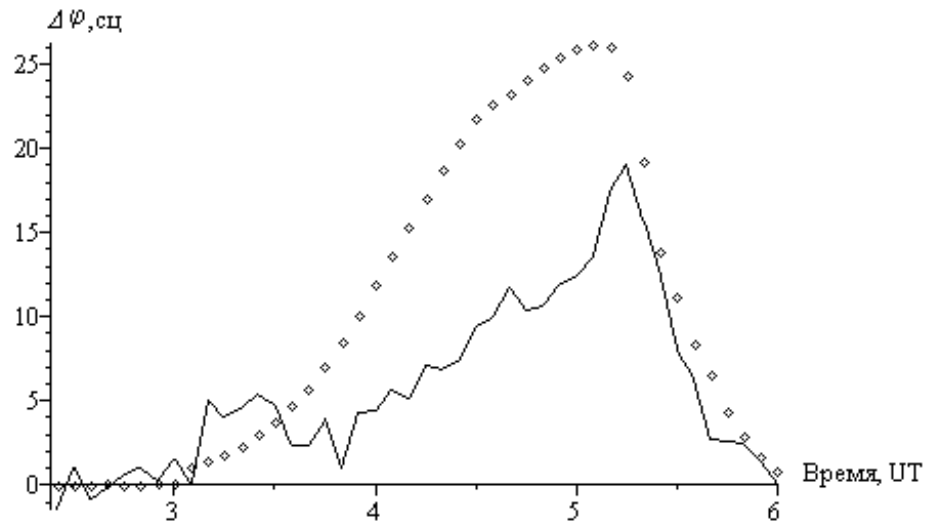


Рис.3. Сравнение расчетных (кружочки) и экспериментальных (сплошная линия) значений фазы сигнала. Трасса Гавайи – Хабаровск, частота 13,6 кГц

Сравнение расчетных и экспериментальных вариаций фазы. Изменения фазы $\Delta\varphi$ определяются относительно невозмущенного значения фазы φ_0 ($\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0$). Распространение сигналов в условиях полного солнечного затмения можно считать однодоговым, так как при небольшой его продолжительности ночные условия распространения не успевают сформироваться. Как уже отмечалось выше, лунная тень пересекала следующие трассы: Норвегия – Хабаровск и Гавайи – Хабаровск (дважды). Для выявления суточных и сезонных зависимостей фазы принимаемого сигнала от различных параметров была проведена обработка экспериментального материала [17]. Среднеквадратическое отклонение фазы принимаемого сигнала для трассы Гавайи – Хабаровск (частота 13,6 кГц) для невозмущенных условиях соответствующих дневным условиям распространения составляет 2 – 3 сантицикла. Как видно из рисунка 3, характер изменения фазы принимаемого сигнала совпадает с расчетным, однако относительная погрешность составляет 27%. В работах [11, 13] говорится о более хорошем совпадении расчетной величины



фазы с экспериментальной. Так на частоте 16 кГц относительная погрешность составляет меньше 10%, на частоте 60 кГц расхождение несколько больше (порядка 33 %). Эти данные приведены также для солнечного затмения 31 июля 1981 года, по приемам сигналов двух радиостанций в г. Харькове относительно высокостабильного опорного генератора. В работе [13] по данной методике приводятся ожидаемые вариации фазы для двух частных затмений и одного полного затмения. Здесь отмечено, что лучшие результаты получены для затмений, происходящих на дневных трассах, но даже если эти условия не выполняются (на трассе переходный период ночь – день или наоборот), относительная погрешность не превышает 20%.

Относительную погрешность можно снизить. Для этого можно увеличить эффективную высоту отражения волноводного канала Земля – ионосфера. Так, например, если принять $h_{эфф} = 66$ км, тогда относительная погрешность будет составлять 23%. Однако это противоречит теории, согласно которой эффективная высота уменьшается с уменьшением частоты принимаемого сигнала.

Из рисунка 3 видно, что расхождение между максимумами фазы принимаемого сигнала и рассчитанного составляет порядка 10 минут. В работе [6] также отмечается, что разность между временем максимального значения отклонения фазы принимаемого сигнала и максимумом фазы смоделированного сигнала колеблется в диапазоне 6 – 16 минут.

В статье [8] отмечается различие времени полной фазы солнечного затмения 29 марта 2006 г. и времени максимального эффекта в изменении фазы принимаемого сигнала для трассы Краснодар – Якутск, которое объясняется тем, что путь лунной тени проходил по всей трассе до «терминатора». Таким образом, максимум эффекта наблюдался, когда лунная тень затеняла наибольший участок трассы распространения сигнала.

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить влияние Солнца на нижнюю ионосферу. Эту оценку можно провести как во время полного солнечного затмения, так и для суточного хода изменения фазы принимаемого сигнала. Для уменьшения относительной погрешности необходимо учитывать дополнительные эффекты, которые приводят к изменению эффективной высоты отражения. Например, это может быть зависимость эффективной высоты отражения волновода Земля – ионосфера от зенитного угла Солнца.

Библиографические ссылки

1. *Some Observations of the Lower Ionosphere during the Solar Eclipse of 30 June 1954*/K. Weekes// J. Atmos. Terr. Phys. (Special Suppl.), 1954. Vol.6.
2. *The effect of a total solar eclipse on a long path VLF transmission*/P. Kaufmann, R.E. Schaal// J. Atmos. Terr. Phys., 1968. Vol.30. №3.
3. *The effect of a total solar eclipse on the phase of long path v.l.f. transmissions*/R.D. Hoy// J. Atmos. Terr. Phys., 1969. Vol.31. №7.



4. *Измерение* фазы СДВ-сигналов во время солнечного затмения 22 сентября 1968 г./Л.А.Протопопов, Б.А.Хаджи//Геомagnetизм и аэрономия. 1970. Т.10. №2.
5. *Вариации* фазы сигнала станции NAA, $f=17.8$ кГц в период полного солнечного затмения 10 июля 1972 г/ Р.С.Шубова // Геомagnetизм и аэрономия. 1974. Т.14. №1.
6. *The total solar eclipse of 23 October 1976 observed at VLF/K.*J.W.Lynn// J. Atmos. Terr. Phys., 1981. Vol.43.№12.
7. *Особенности* вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г./Р.Р.Каримов, В.И.Козлов, В.А.Муллаяров// Геомagnetизм и аэрономия. 2008. Т.48. №2.
8. *Одновременные* наблюдения на Камчатке и в Якутии естественного электромагнитного излучения в КНЧ – ОНЧ – диапазонах в период солнечного затмения 1 августа 2008 г./Г.И.Дружин, В.Н.Уваров, В.А.Муллаяров, В.И.Козлов, А.А.Корсаков// Геомagnetизм и аэрономия. 2010. Т.50. №2.
9. *Экспериментальное* исследование отклика среднеширотной D-области ионосферы на затмение Солнца 29 марта 2006 г./А.М.Гоков, А.И.Гритчин, О.Ф.Тырнов// Геомagnetизм и аэрономия. 2008. Т.48. №2.
10. *Вариации* амплитуды и фазы ОНЧ радиоволн в ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г./Л.Ф.Черногор// Геомagnetизм и аэрономия. 2010. Т.50. №1.
11. *Вариации* фазы СДВ и ДВ полей во время солнечного затмения 31 июля 1981 г./В.И.Рубинштейн, М.Д.Сопельников, Р.С.Шубова// Известия вузов. Радиофизика.1983.Т.26.№9.
12. *Солнечное* затмение 31 июля 1981г. и вариации характеристик распространения ДВ- и СДВ-радиосигналов на коротких трассах./ В. А.Живулин, Ю.В.Кашпар, Б.Г.Кутаков, Б.Л.Осоченко, Ю.М.Яневич// XIV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. Тез. докл. Ч.1.М.: Наука, 1984.
13. *Изменение* эффективной высоты ионосферы в период солнечного затмения/Л.Н.Моиссенко, Р.С.Шубова//Известия вузов. Радиофизика. 1978. Т.XXI. №2
14. *Особенности* распространения радиоволн СДВ-диапазона в Дальневосточном регионе/В.И.Нестеров//Вестник ТОГУ.2008.№4(11).
15. *Михайлов А.А.* Солнечное затмение 31 июля 1981 г. и его наблюдения /Под ред. акад. А.А. Михайлова. – М.: Наука, 1980. – 160 с.
16. *Основные* закономерности распространения сигналов СДВ-диапазона в волноводном канале Земля – ионосфера/А.Б.Орлов, Г.И.Азарнин.//Проблемы дифракции и распространения волн. Изд-во ЛГУ, 1970, вып.Х.
17. *Особенности* СДВ радиоканала синхронизации при трансэкваториальном распространении/В.И.Нестеров, А.И.Щавелев, Г.Д.Апрышкин//Измерительная техника.1987.№10.