

Оценка изменения эффективной высоты волновода Земля-ионосфера по вариациям фазы ОНЧ-НЧ радиосигналов в период солнечного затмения

КОРСАКОВ А.А.¹, КОЗЛОВ В.И.^{1,2}, КАРИМОВ Р.Р.¹

¹ Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН
г. Якутск, Россия

² Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Амосова г. Якутск, Россия
email: korsakovaa@ikfia.sbras.ru vkozlov@ikfia.sbras.ru karimov@ikfia.sbras.ru

Во время солнечного затмения лунная тень перекрывает потоки ультрафиолетового и рентгеновского излучений Солнца – основных источников ионизации нижней (D-область: 65-85 км) ионосферы. Так тень Луны способна менять параметры ионосферы. Особенно чувствительными к таким изменениям являются электромагнитные сигналы низких и очень низких частот (НЧ: 30 - 300 кГц, ОНЧ: 3 - 30 кГц), трассы распространения которых затеняются Луной. Долговременный приём с различных направлений ОНЧ - НЧ радиосигналов от удалённых источников даёт возможность проведения дистанционного исследования нижней ионосферы.

Первый контакт лунной тени с земной поверхностью состоялся 20 мая 2012 г. в 20:56:06 UT. Полоса кольцевого затмения возникла в южном Китае, прошла по островам Японии, через Тихий океан и исчезла на территории США. В точке с координатами 49,1 N, 176,3 E в Тихом океане затмение достигло максимума в 23:53:54 UT, и длилось 5 минут 46 секунд. Ширина лунной тени на земной поверхности составила 237 километров. В момент и в точке наибольшего затенения высота солнца над горизонтом составляла 61° . 21 мая 2012 г. в 02:49:18 UT тень покинула Землю.

В г. Якутске регистрирующий комплекс состоял из штыревой антенны (действующая высота 2 м), предварительного усилителя (коэффициент усиления 40 в полосе частот 0,3-100 кГц), быстродействующего АЦП, GPS-часов – приёмника с секундными импульсами и сигналом стабильной частоты (10 МГц), начальная фаза которого синхронизирована с мировым временем. Стабильный гармонический сигнал от GPS-часов поступал на вход делителя частоты, для создания высокостабильной частоты дискретизации АЦП (2,5 МГц), необходимой для выделения фазы. Оцифрованный сигнал с АЦП поступал через USB порт ноутбука с программой синоптической записи. Длительность записи составляла 18 сек. с интервалом 126 секунд.

В Якутске зарегистрированы устойчивые суточные вариации фазы ОНЧ сигналов удалённых радиостанций (рис. 1). В период солнечного затмения 20 - 21 мая 2012 года при затенении Луной трасс распространения зафиксированы вариации фазы сигналов. Для сигнала станции JJY40 (40 кГц, $37,4^\circ$ N, $140,84^\circ$ E) максимальные вариации фазы составили 0,77 радиан (22:55 UT), а для сигнала станции NPM (21,4 кГц, $21,4^\circ$ N, $158,1^\circ$ E) максимальное изменение фазы составило 0,54 радиан (23:58 UT). Эффекты затмения в виде фазовых вариаций соответствуют затенению Луной радиотрасс JJY40 – Якутск (2850 км) и NPM – Якутск (6995 км).

В качестве параметра, характеризующего фазу ОНЧ сигнала, введена эффективная высота волновода h , которая определяется как уровень постоянной концентрации электронов ионосферы вдоль трассы распространения радиосигнала. Для связи эффективной высоты волновода с линейной фазой затмения (отношения закрытой части диаметра к полному диаметру Солнца) использовалось представление профиля электронной концентрации слоем Чепмена. Электронная концентрация в максимуме слоя изменяется в зависимости от линейной фазы затмения, в результате чего любому фиксированному значению концентрации соответствуют различные высоты. Предполагая, что излучение по

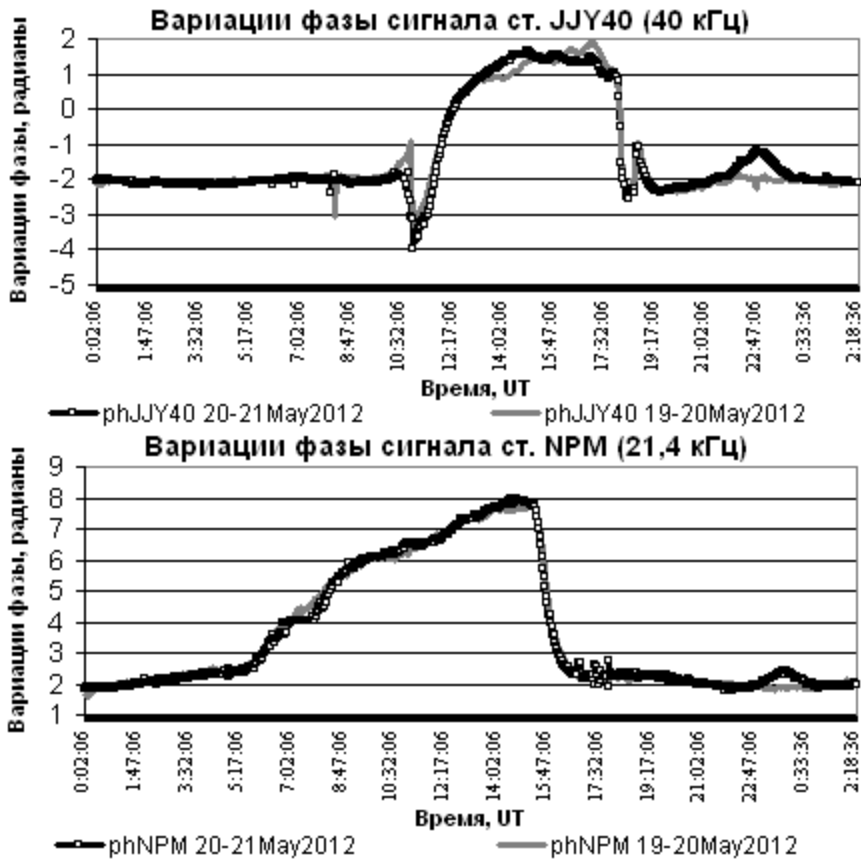


Рис. 1. Суточные вариации фазы сигналов радиостанций JY40 и NPM

диску Солнца и его короне распределено равномерно, а зенитный угол Солнца за время затмения сохраняется неизменным, изменение высоты можно представить в виде [1]:

$$\Delta h = H \cdot \ln(I(\Phi)/I(0)) \quad , \quad (1)$$

где $I(\Phi)$ – поток излучения, зависящий от линейной фазы затмения Φ , $I(0)$ – полный поток ионизирующего излучения Солнца в дневное время. H – нормировочный коэффициент для соответствующей радиотрассы. Полный поток ионизирующего излучения в дневное время можно представить, как сумму потоков от диска Солнца $I_D = bS(\Phi)$ и его короны I_K , а также потока ночных дополнительных источников ионизации I_H . Где $S(\Phi)$ – площадь открытой части диска Солнца, а b – коэффициент пропорциональности. Выразив b через значение полного потока ионизирующего излучения в дневное время, и подставив соответствующие потоки в формулу (1), получим изменение эффективной высоты в виде:

$$\Delta h = H \cdot \ln \left[\frac{I_H}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{I_k}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{S(\Phi)}{S_0} \right], \quad (2)$$

где S_0 – полная (открытая) площадь солнечного диска. При расчетах трасса разбита на n элементов, длиной по $\Delta r = 200$ км. Предполагается одинаковое изменение эффективной высоты волновода на протяжении элемента трасы. При одномодовом приближении распространения ОНЧ сигнала по дневной протяженной трассе фазу сигнала ϕ по длине трасы r представим в виде:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \beta_i \Delta r. \quad (3)$$

Для β – изменения фазы сигнала с расстоянием в [2] дана формула:

$$\beta(\text{рад/Мм}) = 20,95 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \left(1 - \frac{V_1}{c}\right),$$

где f – частота сигнала, V_1 – фазовая скорость первой моды, причем, с учетом, что радиус Земли $R_3 = 6378$ км:

$$\frac{V_1}{c} - 1 = \frac{\pi^2}{8k^2h^2} - \frac{h}{2R_3} \left(1 - \frac{4}{\pi^2}\right)$$

В диапазоне ОНЧ в интервале возможных значений высот волновода Земля-ионосфера использована линейная зависимость изменения фазы сигнала с расстоянием от высоты. Тогда β на частотах 40 и 21,4 кГц описывается линейным трендом с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,99$:

$$\beta(h) = 0,0991 \cdot h - 0,783,$$

$$\beta(h) = 0,062 \cdot h - 1,464, \quad (4)$$

Представим отклонения фазы радиосигнала в период затмения ϕ_3 от значения фазы ближайших невозмущенных суток ϕ_0 на основе выражений (3) и (4):

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_0 = \sum_{i=1}^n 0,0525 \cdot \Delta h_i \cdot \Delta r$$

С учетом выражения (2) получим:

$$\Delta\varphi = 0,0525 \cdot \Delta r \cdot H \cdot \sum_{i=1}^n \left(\ln \left[\frac{I_H}{I_{дн}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \frac{I_k}{I_{дн}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right] \right), \quad (5)$$

На основе обстоятельств и значений бесселевых элементов затмения 20-21 мая 2012 года из [3] по алгоритмам [4], получены распределения отношения площадей открытой части Солнца к полной $S(\Phi)/S_0$ вдоль радиотрасс JJY40 – Якутск и NPM – Якутск, с шагом $\Delta r = 200$ км и временным разрешением 3 минуты. Примем $I_H/I_{дн} = 0,01$ [5] и $I_k/I_{дн} = 0,1$ [6]. Методом наименьших квадратов, по данным о вариациях фазы во время затмения $\Delta\phi$ определен нормировочный коэффициент H , связывающий изменение эффективной высоты волновода Земля-ионосфера и логарифм отношения потока солнечного излучения во время затмения к полному потоку в дневное время. Нормировочные коэффициенты $H_{JJY40} = 3,27 \pm 0,08$ км, $H_{NPM} = 2,27 \pm 0,05$ км.

Изменения высоты волновода в максимумы затенения радиотрасс JJY40 – Якутск и NPM – Якутск представлены на рис. 2.

Из рис. 2. видно, что максимальное изменение высоты волновода Земля – ионосфера в период максимального затенения трассы JJY40 – Якутск (22:47 UT) составило 4,63 км (39N 140E, $\Phi=0,88$). На трассе NPM – Якутск (23:52 UT) максимальное изменение составило 4,25 км (49N 177E, $\Phi=0,96$).

По фазовым вариациям зарегистрированных в Якутске ОНЧ-НЧ сигналов радиостанций оценено влияние Солнца на нижнюю ионосферу в период солнечного затмения 20-21 мая 2012 года. Проведена оценка изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера на участках радиотрасс, затененных Луной. Изменения эффективной высоты волновода на участках рассмотренных радиотрасс соответствуют обстоятельствам солнечного затмения.

Работа поддержана РФФИ, проекты 15-45-05005 р_восток_a, 15-45-05135 р_восток_a и частично РНФ (проект 14-19-01079).

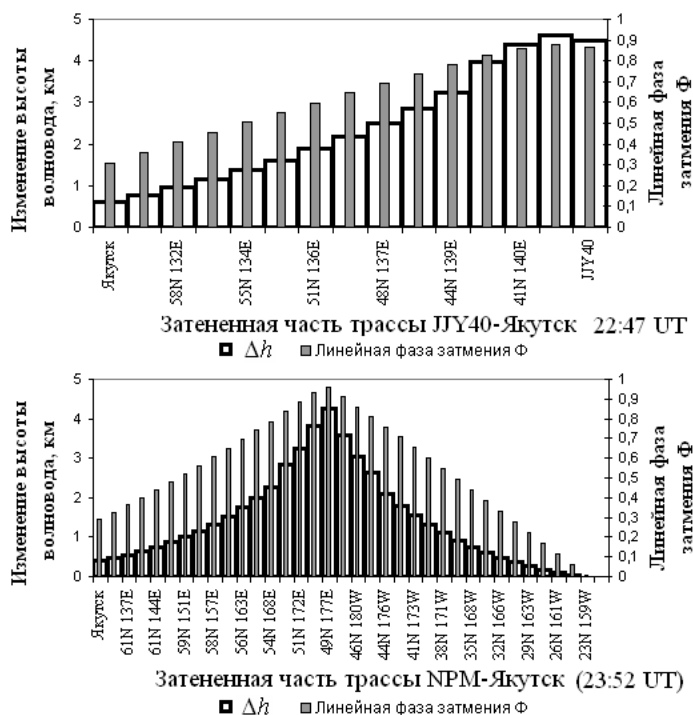


Рис. 2. Изменения высоты волновода Земля – ионосфера в максимумы затмения радиотрасс JJY40 – Якутск и NPM – Якутск

Литература

1. Моисеенко Л.Н., Шубова Р.С. Изменение эффективной высоты ионосферы в период солнечного затмения // Известия вузов. Радиофизика. 1978. Т. XXI. №2.
2. Орлов А.Б., Азарнин Г.В. Основные закономерности распространения сигналов СДВ-диапазона в волноводном канале Земля – ионосфера // Проблемы дифракции и распространения волн: сб. ст. Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. Вып. X. С. 3–107.
3. Обстоятельства затмения Солнца 20 мая 2012 г. ИПА РАН.
– URL <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/EDITION/RUS/AE/20120520soa.txt> (дата обращения 10.03.2016)
4. Дагаев М.М. Солнечные и лунные затмения. М.: Наука. 1978. 208 с.
5. Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера. М.: Наука. 1969. 456 с.
6. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1972. 564 с.