

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ
ПО ВАРИАЦИЯМ ФАЗЫ ОНЧ РАДИОСИГНАЛОВ,
РЕГИСТРИРУЕМЫХ В ЯКУТСКЕ В ПЕРИОД СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20.03.2015**

А.А. Корсаков, В.И. Козлов, Р.Р. Каримов, В.В. Аргунов

**LOW IONOSPHERE EFFECTIVE HEIGHT CHANGES ESTIMATED BY PHASE VARIATIONS
OF VLF RADIO SIGNALS REGISTERED IN YAKUTSK DURING SOLAR ECLIPSE 20.03.2015**

A.A. Korsakov, V.I. Kozlov, R.R. Karimov, V.V. Argunov

В период 19–25 марта 2015 г. в Якутске проводилась регистрация радиосигналов диапазона очень низких частот (ОНЧ: 3–30 кГц) навигационных станций. Эффект солнечного затмения 20.03.2015 проявился в вариациях фазы сигнала радиостанции Краснодар (14.88 кГц) 9:36–11:15 UT. Максимум отклонения фазы (относительно 21 марта 2015, 10:45 UT) составил 0.39 радиан. Построено распределение линейной фазы затмения по радиотрассе Краснодар-Якутск. По вариациям фазы радиосигнала оценен нормировочный коэффициент, связывающий изменение эффективной высоты волновода Земля-ионосфера с отношением потока солнечного излучения при затмении и полным ионизирующим потоком в дневное время, $N=4.69\pm 0.42$ км. Оценка изменения высоты волновода при максимальном затенении трассы Краснодар-Якутск (10:45 UT) составляет 2.88 км (63° N, 74° E, $\Phi=59.3\%$).

Very low frequency (VLF: 3–30 kHz) radio signals of navigation stations registered in Yakutsk during March 19–25, 2015. The effect of solar eclipse 20.03.2015 manifested in phase variations of the Krasnodar radio signal (14.88 kHz) 9:36–11:15 UT. Maximum phase deviation (relative to March 21, 2015, 10:45 UT) is 0.39 radians. The distribution of the solar eclipse linear phase Φ on the path Krasnodar-Yakutsk (200 km intervals, 3 min. resolution) built. The normalization factor $N=4.69\pm 0.42$ (from the effective height changes dependence on the ratio of the flux of solar radiation during the eclipse and daytime total ionizing flux) estimated by phase deviations of Krasnodar radio signal. The waveguide height changing at maximum shading Krasnodar-Yakutsk path is 2.88 km (63° N, 74° E, $\Phi=0.593$).

Радиосигналы в диапазоне очень низких частот (ОНЧ: 3–30 кГц) способны распространяться на большие расстояния в волноводе Земля-ионосфера, их прием дает возможность мониторинга околоземного пространства. В частности, амплитудно-фазовые вариации ОНЧ сигналов, регистрируемые в период солнечного затмения, служат дополнительным источником информации о влиянии Солнца на параметры волновода Земля-ионосфера. В работе [Черногор, 2010] отмечается зависимость процессов и эффектов в момент солнечного затмения от фазы в солнечной активности, времени года и суток, степени покрытия диска Солнца, состояния атмосферной и космической погоды, откуда следует, что каждое затмение Солнца является уникальным, а исследования связанных с ним эффектов остаются актуальными.

В Якутске с 2009 г. в непрерывном режиме ведется регистрация сигналов станций радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20), расположенных вблизи Краснодара, Новосибирска и Хабаровска. С помощью решетчатых функций преобразования Фурье осуществляется выделение амплитуды и фазы на трех частотах 14.88 кГц, 12.649 кГц и 11.904 кГц. В качестве высокостабильного генератора, необходимого для выделения фазы радиосигналов, а также временной синхронизации работы регистратора в соответствии с режимом работы РСДН-20 применяются сигналы (синусоидальный 10 МГц и прямоугольный импульсный 1 Гц) от приемника GPS [Каримов Р.Р. и др., 2012]. На рис. 1 представлены зарегистрированные в Якутске суточные вариации фазы сигнала (14.88 кГц) станции Краснодар в день затмения 20.03.2015, а также вариации фазы 21 марта 2015 г. Эффект солнечного затмения проявился

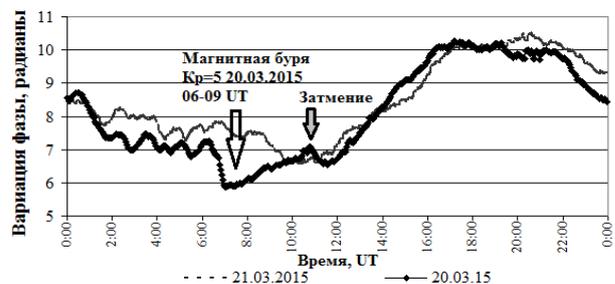


Рис. 1. Суточные вариации фазы сигнала станции Краснодар в день затмения 20.03.2015 и в последующие невозмущенные сутки 21 марта 2015 г.

в вариациях фазы сигнала радиостанции Краснодар (14.88 кГц) 9:36–11:15 UT. Максимум отклонения фазы (10:45 UT) составил 0.39 радиан.

В работе [Моисеенко, Шубова, 1978] в качестве параметра, характеризующего фазу ОНЧ сигнала введена эффективная высота волновода h , которая определяется как уровень постоянной концентрации электронов ионосферы вдоль трассы распространения. Для связи эффективной высоты волновода с фазой затмения использовалось представление профиля электронной концентрации слоем Чепмена. Электронная концентрация в максимуме слоя изменяется в зависимости от линейной фазы затмения, и любому фиксированному значению концентрации соответствуют различные высоты. Предполагая, что излучение по диску Солнца и его короне распределено равномерно, изменение высоты принимает вид:

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

где $I(\Phi)$ – поток излучения, зависящий от линейной фазы затмения Φ (Φ – отношение закрытой части

диаметра Солнца к полному), $I(0)$ – полный поток в дневное время, H – нормировочный коэффициент. Поток излучения во время затмения зависит от площади открытой части Солнца. В ночное время в нижней ионосфере сохраняется высокое значение концентрации электронов, которое объясняется наличием дополнительных источников ионизации. Изменение высоты представим в виде [Моисеенко, Шубова., 1978]:

$$\Delta h = H \ln \left[\frac{I_n}{I_{он}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{I_0}{I_{он}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{S(\Phi)}{S_0} \right], \quad (2)$$

где I_n – ионизирующее излучение, действующее в ночное время, $I_{он}$ – ионизирующее излучение, действующее в дневное время, I_0 – поток от солнечной короны, $S(\Phi)$ – площадь открытой части солнца, S_0 – полная площадь солнечного диска. Пусть:

$$X(\Phi) = \ln \left[\frac{I_n}{I_{он}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{I_0}{I_{он}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{S(\Phi)}{S_0} \right], \quad (3)$$

При распространении ОНЧ-сигнала по дневной протяженной трассе можно воспользоваться одно-модовым приближением. При достаточно плавных изменениях высоты волновода фазу сигнала φ по длине трассы r можно представить в виде:

$$\varphi = \int_0^r \beta dr. \quad (4)$$

Для β справедлива приближенная формула [Моисеенко, Шубова, 1978]:

$$\beta \text{ (рад / Мм)} = 20.95 \cdot 10^{-3} f \left(1 - \frac{V_1}{c} \right), \quad (5)$$

где f – частота сигнала, V_1 – фазовая скорость первой моды, приближенная формула для нахождения которой:

$$\frac{V_1}{c} - 1 = \frac{\pi^2}{8k^2 h^2} - \frac{h}{2a} \left(1 - \frac{4}{\pi^2} \right), \quad (6)$$

где $a=6378$ км – радиус Земли. В диапазоне ОНЧ в интервале возможных значений высот волновода Земля-ионосфера можно воспользоваться линейной интерполяцией фазовой скорости по высоте. Тогда и угловая скорость β на частоте сигнала 14.88 кГц описывается линейным трендом с коэффициентом детерминации R^2 равным 0.996:

$$\beta(h) = 0.0525h - 2.1058. \quad (7)$$

Представим отклонения фазы радиосигнала в период затмения φ_z от фазы невозмущенных суток φ_0 на основе выражений (4) и (7), с учетом (2) и (3):

$$\Delta\varphi = 0.05215H \int_0^r X(\Phi) dr. \quad (8)$$

На основе обстоятельств и значений бесселевых элементов затмения 20.03.2015 [http://www.ipa.nw.ru/PAGE/EDITION/RUS/AE/20150320soa.txt] по алгоритмам из [Дагаев, 1978], от момента касания лунной полутени поверхности Земли, до момента окончания затмения, получены распределения

отношения площадей открытой части Солнца к полной $S(\Phi)/S_0$ вдоль трассы Краснодар – Якутск, с шагом $\Delta r=0.2$ Мм и временным разрешением 3 мин. Примем $I_n/I_{он}=0.01$ и $I_0/I_{он}=0.1$ [Моисеенко, Шубова, 1978]. В выражении (8) интегрирование заменим суммированием по n – числу элементов трассы, покрытых полутенью Луны, получим:

$$\Delta\varphi = 0.05215\Delta r H \sum_n X(\Phi). \quad (9)$$

Из выражения (9), каждому трехминутному интервалу суммы по трассе значений величины $X(\Phi)$ ставится в соответствие зарегистрированное отклонения фазы $\Delta\varphi$ во время затмения (с разрешением 3 мин). На основе регрессионного анализа методом наименьших квадратов определен нормировочный коэффициент $H=4.69\pm 0.42$ км.

На рис. 2 представлено сравнение расчетных и экспериментальных отклонений фазы радиосигнала (14.88 кГц) на трассе Краснодар–Якутск в период затмения Солнца 20.03.2015. Стандартная ошибка модели фазы составляет 0.138 радиан. На рис. 3 представлен профиль изменения эффективной высоты волновода Земля-ионосфера на трассе Краснодар–Якутск в 10:45 UT – момент максимального затенения трассы при затмении. Терминатор при заходе солнца находился вблизи точки с координатами 65° N, 111° E, поэтому условия распространения радиоволн на участке трассы к востоку считаются ночными.

Оценка изменения высоты волновода на трассе Краснодар–Якутск составляет $\Delta h=2.88$ км, что не противоречит значениям, принятым для нижней ионосферы [Моисеенко, Шубова, 1978]. Проведена адаптация нормировочного коэффициента, связывающего изменение эффективной высоты волновода Земля-ионосфера от отношения потока ионизиру-

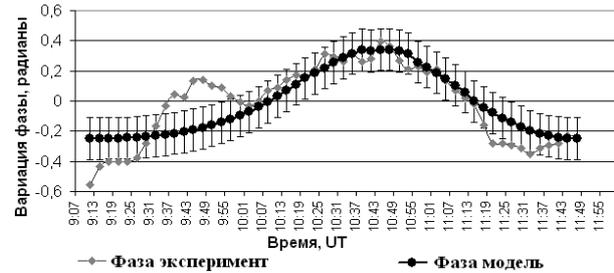


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных отклонений фазы радиосигнала на трассе Краснодар–Якутск в период частного затмения Солнца 20.03.2015 г.

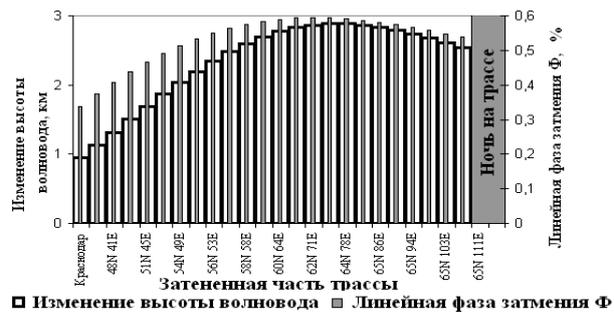


Рис. 3. Профиль изменения эффективной высоты волновода на трассе Краснодар–Якутск в 10:45 UT – момент максимального затенения трассы при затмении.

щего излучения при затмении к потоку ионизирующего излучения в дневное время на трассе Краснодар–Якутск.

Работа поддержана РФФИ, проекты № 14-05-31056 мол_а, 15-45-05005 р_восток_а, 15-45-05135 р_восток_а, а также грантом «Научно-образовательный фонд поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия)» № 2014-01-0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дагаев М.М. Солнечные и лунные затмения. М.: Наука, 1978. 208 с.

Каримов Р.Р., Козлов В.И., Корсаков А.А. и др. Вариации параметров сигналов радионавигационных станций, регистрируемых в Якутске в диапазоне очень низких частот // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2012. Т. 9, № 4. С. 57–62.

Моисеенко Л.Н., Шубова Р.С. Изменение эффективной высоты ионосферы в период солнечного затмения // Известия вузов. Радиофизика. 1978. Т. XXI, № 2.

Черногор Л.Ф. Вариации амплитуды и фазы ОНЧ радиоволн в ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50, № 1.

Обстоятельства затмения Солнца 20 марта 2015 г. ИПА РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/EDITION/RUS/AE/20150320soa.txt> (дата обращения 20.04.2015).

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шадера СО РАН, Якутск, Россия