# Вариации амплитуды и фазы сигналов ОНЧ-радиостанций в период солнечного затмения 20 марта 2015 г. при регистрации в Якутске и Улан-Удэ

**В.И. Козлов[1,2], А.А. Корсаков[1], Р.Р. Каримов[1,2], В.В. Аргунов[1], В.П. Мельчинов[2], Ю.Б. Башкуев[3], А.Л. Бояров[3]**

*[1]Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, 677980, Россия*
*E-mail: vkozlov@ikfia.sbras.ru*
*[2]Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова Физико-технический институт, Якутск, 677000, Россия*
*[3]Институт физического материаловедения СО РАН Улан-Удэ, 670047, Россия*

Эффект затмения Солнца 20 марта 2015 г. проявился в увеличении амплитуды (23,7% суточной вариации) принимаемого в г. Якутске сигнала DHO (23,4 кГц) и в вариациях фазы сигнала станции Краснодар (14,88 кГц) при приеме в г. Якутске (на 0,39 радиан) и в г. Улан-Удэ (на 0,45 радиан). Получены распределения отношения площадей открытой части Солнца к полной для трасс Краснодар–Якутск и Краснодар–Улан-Удэ. По вариациям фазы ОНЧ-радиосигнала определен нормировочный коэффициент, связывающий изменение эффективной высоты волновода Земля-ионосфера и логарифм отношения потока солнечного излучения во время затмения к полному потоку в дневное время. Для трасс Краснодар–Якутск нормировочный коэффициент составляет 4,69±0,42 км, для трасс Краснодар–Улан-Удэ – 7,62±0,37 км. Оценка изменения эффективной высоты ночного и дневного волновода на трассе Краснодар–Якутск составляет 21,6 км, а на трассе Краснодар–Улан-Удэ – 35,1 км. Максимальное изменение высоты волновода Земля–ионосфера в период максимального затенения трассы Краснодар–Якутск составило 2,88 км (фаза затмения 0,59). На трассе Краснодар–Улан-Удэ максимальное изменение высоты волновода составило 2,43 км (фаза затмения 0,42).

**Ключевые слова:** солнечное затмение, распространение радиоволн, D область ионосферы, эффективная высота волновода Земля-ионосфера

*Одобрена к печати: 22.06.2016*
*DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-195-203*

## Введение

Солнечное затмение предоставляет возможность изучения радиофизических процессов в ионосфере в условиях быстрого изменения интенсивности ионизирующего излучения при почти постоянном зенитном угле. Затмение служит естественным коронографом, позволяющим изучать влияние излучения как диска Солнца, так и его короны на ионизацию затеняемой части ионосферы в дневных условиях. В работах (Черногор, 2010; Гоков, Гритчин, Тырнов, 2008) показано, что при солнечных затмениях происходит уменьшение концентрации электронов в ионосфере и уменьшение температуры электронов и ионов во внешней ионосфере. Величина эффектов зависит от степени покрытия диска Солнца (фазы затмения), зенитного угла Солнца, состояния космической погоды. Поскольку затмение Солнца – довольно редкое явление, и каждое из них является уникальным в силу прохождения тени через различные области земной поверхности, исследования их эффектов остаются актуальными. Затмение 20 марта 2015 года проходило на фоне восстановления сильных геомагнитных возмущений, максимум которых пришелся на 17 марта 2015 г., когда $Dst_{min} \approx -230$ нТл, $Kp_{max} \approx 8_$, $AE_{max} \approx 1600$ нТл. 20 и 21 марта суммарный индекс ΣKp составлял 27 и 22 соответственно.

Регистрируемые амплитудно-фазовые вариации сигналов радиостанций в диапазоне очень низких частот (ОНЧ: 3–30 кГц) при солнечном затмении дают сведения о влиянии Солнца на параметры D области ионосферы. При пересечении лунной тени протяженных трасс распространения (более 2 Мм) эффект затенения более отчетлив в фазовых вариациях принимаемых радиосигналов (Козлов, Муллаяров, Каримов, 2008).

## Обстоятельства солнечного затмения 20 марта 2015 г.

Частное затмение Солнца началось в 07:40:51 UT 20.03.2015, а полное затмение – в 09:09 UT. Тень Луны пересекла Фарерские острова, архипелаг Шпицберген и закончилась на Северном полюсе в 10:21 UT. Полутень покинула поверхность Земли в 11:50:11 UT. Максимум затмения (64,4° с.ш., 6,6° з.д.) с линейной фазой 1,0445 длился 167 секунд при высоте Солнца над горизонтом 18°. Ширина лунной тени на поверхности Земли составила 463 км. В Краснодаре затмение наблюдалось с 09:15 UT до 11:19 UT с максимальной фазой 0,412 в 10:17 UT при зенитном угле Солнца 46,7°. Обстоятельства солнечного затмения для г. Новосибирск: затенение 10:12 – 11:48 UT, максимальная фаза 0,391 в 11:01 UT при зенитном угле 78°. В Улан-Удэ частное затмение длилось с 10:32 UT до захода Солнца с максимальной фазой 0,236 в 10:59 UT при зенитном угле 90,5°.

## Методика

В Якутске (62° с.ш., 129° в.д.) и Улан-Удэ (52° с.ш., 108° в.д.) регистрируются сигналы радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 («Альфа»). Радиостанции системы расположены вблизи городов Краснодар (45° с.ш., 38° в.д.), Новосибирск (55° с.ш., 84° в.д.) и Хабаровск (50° с.ш., 136° в.д.) и излучают на частотах 11,904 кГц, 12,649 кГц и 14,881 кГц. Длительность радиоимпульса равна 0,4 с, пауза между сигналами – 0,2 с, а цикл излучения станций – 3,6 с. Привязка к абсолютному времени и высокостабильная частота дискретизации АЦП, необходимые для регистрации фазы радиосигналов и синхронного запуска сбора данных в соответствии с режимом работы радиостанций, организованы при помощи GPS часов (Каримов и др., 2012). По подобной методике 19–25 марта 2015 г. в Якутске регистрировался и радиосигнал станции DHO (53° с.ш., 8° в.д., частота 23,4 кГц) с субполярной и частично полярной радиотрассы.

Протяженности трасс Краснодар–Якутск и Краснодар–Улан-Удэ составляют 5780 км и 4975 км соответственно. Для трассы Новосибирск–Якутск протяженность составила 2640 км, для трассы Новосибирск–Улан-Удэ – 1580 км. Протяженности трасс Хабаровск–Якутск и Хабаровск–Улан-Удэ составляют 1395 км и 2030 км соответственно. Протяженность трассы DHO–Якутск – 6270 км.

## Экспериментальные данные и их анализ

Эффект затмения, наблюдавшийся в суточной вариации амплитуды сигнала станции DHO при приеме в Якутске, излучающей на частоте 23,4 кГц, в день солнечного затмения 20 марта состоял в увеличении амплитуды с 08:55 по 11:18 UT (*рис. 1*). В максимуме в 10:15 UT амплитуда сигнала увеличилась на 1,79 отн. ед. (23,7% суточной вариации). Суточная вариация составляет 400% (12 дБ) относительно минимума принимаемого сигнала (4 UT). Средняя суточная вариация амплитуды с 19 по 24 марта 2015 г. также представлена на *рис. 1*. Каждые сутки в 07–08 UT DHO не излучает сигнал, что позволяет оценить в эти часы уровень естественных радиошумов и отношение сигнал/шум как равное 3.

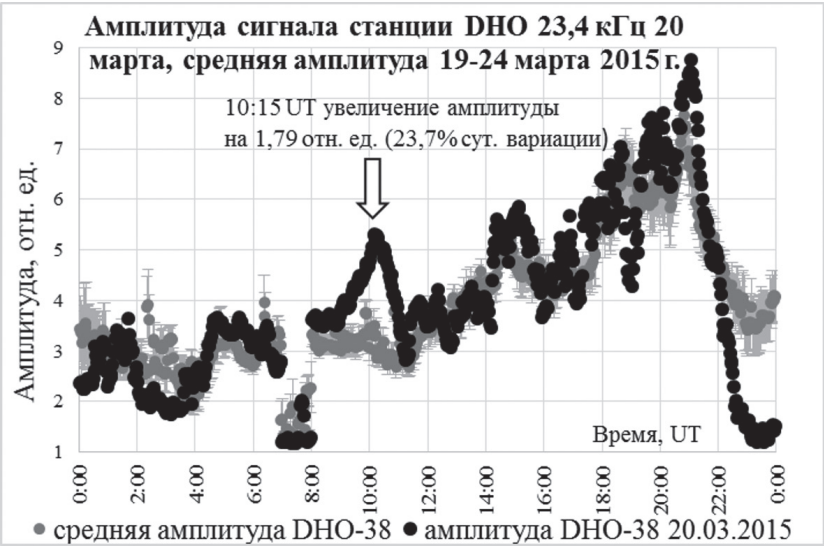


*Рис. 1. Суточная вариация амплитуды сигнала станции DHO (23,4 кГц), принятого в Якутске 20 марта, и средняя суточная вариация амплитуды 19–24 марта 2015 г.*

Эффект солнечного затмения при регистрации в Якутске и Улан-Удэ 20–21 марта 2015 г. сигнала радиостанции Краснодар (14,88 кГц) проявился в вариациях фазы при регистрации в Якутске с 9:36 до 11:15 UT (*рис. 2*). Максимум отклонения фазы в 10:45 UT составил 0,39 радиан. Эффект затмения проявился также в вариациях фазы сигнала Краснодар (14,88 кГц) при приеме в г. Улан-Удэ (*рис. 2*) с максимумом отклонения фазы 0,45 радиан (10:57 UT). В амплитуде сигнала станции Краснодар эффект затмения не превысил фонового уровня естественных вариаций.

Эффект затмения лишь обозначился начальной фазой на фоне естественных амплитудно-фазовых вариаций сигнала станции Новосибирск (*рис. 3*) и не проявился в сигнале станции Хабаровск (*рис. 4*) по причине малого затенения Луной этих радиотрасс перед самым наступлением заката.

*Рис. 2. Суточные вариации амплитуды и фазы сигнала радиостанции Краснодар (14,88 кГц) при регистрации в Якутске и Улан-Удэ 20–21 марта 2015 г.*

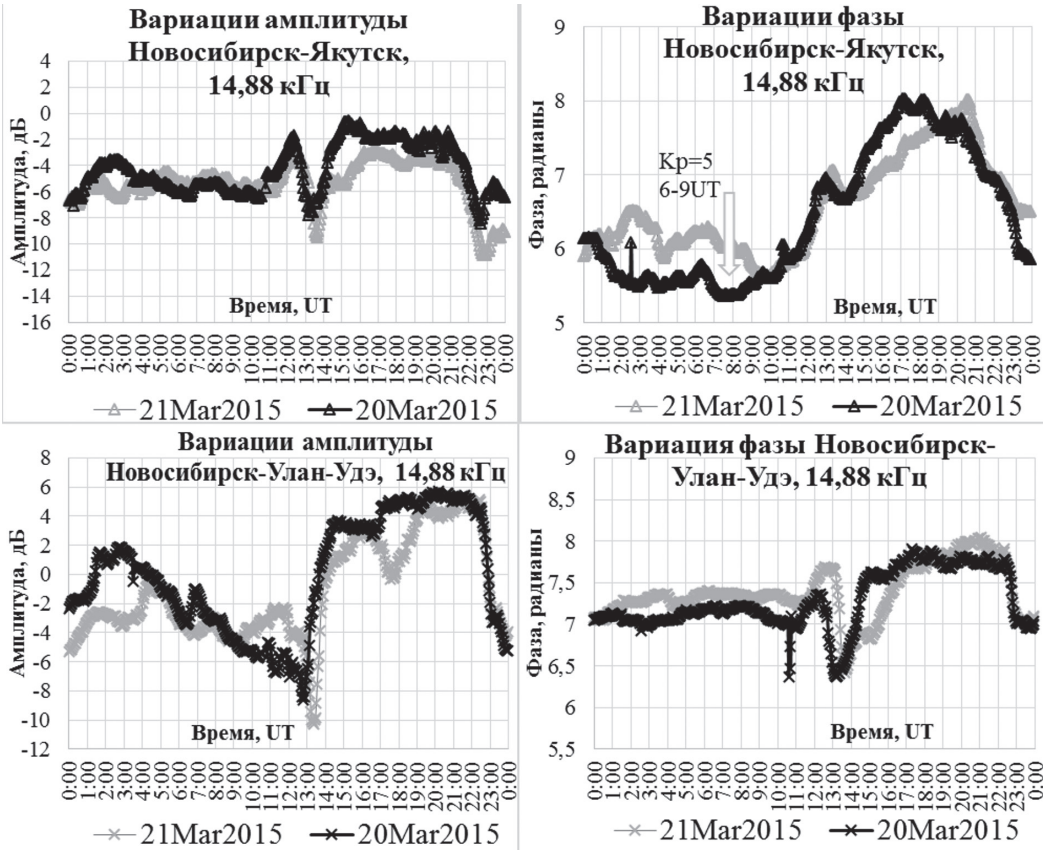


*Рис. 3. Суточные вариации амплитуды и фазы сигнала радиостанции Новосибирск (14,88 кГц) при регистрации в Якутске и Улан-Удэ 20–21 марта 2015 г.*

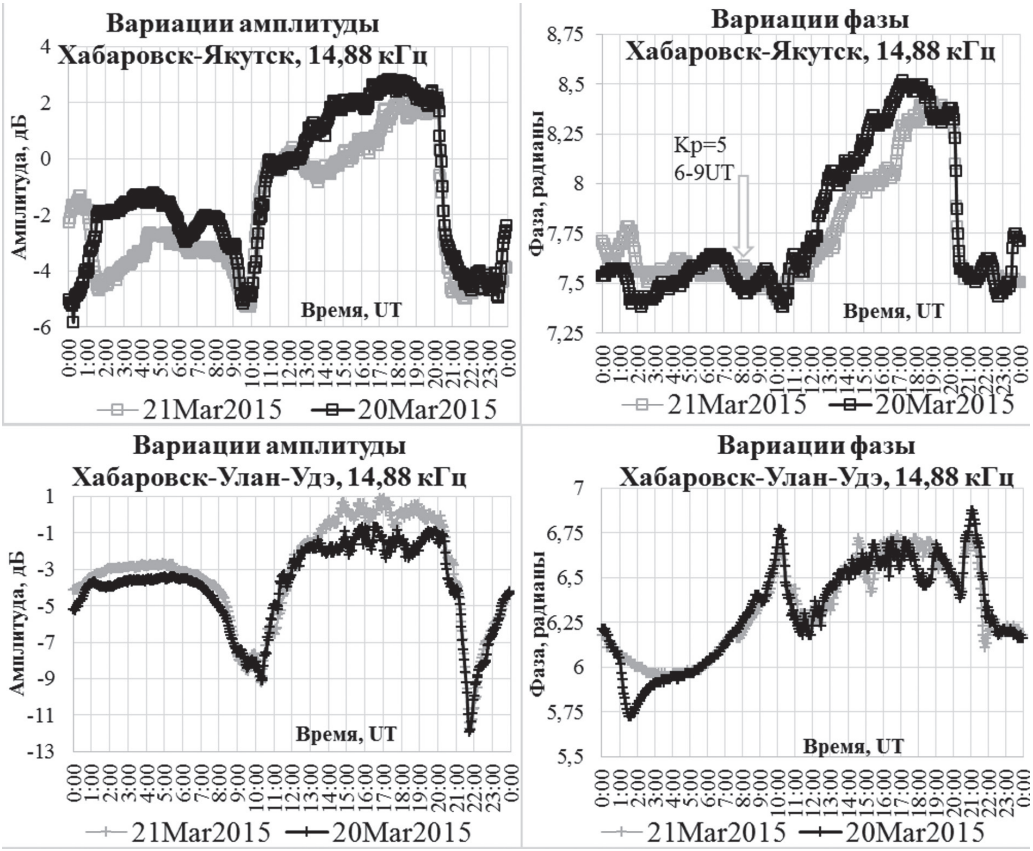


*Рис. 4. Суточные вариации амплитуды и фазы сигнала радиостанции Хабаровск (14,88 кГц) при регистрации в Якутске и Улан-Удэ 20–21 марта 2015 г.*

## Моделирование изменения эффективной высоты волновода при солнечном затмении

Поскольку эффект затенения более отчетлив в фазовых вариациях принимаемых радиосигналов, это позволяет объяснить вариации параметров регистрируемых сигналов изменением геометрии волновода Земля-ионосфера, а не импеданса его стенок. При моделировании изменения эффективной высоты волновода во время солнечного затмения для трасс Краснодар–Якутск и Краснодар–Улан-Удэ использована идеология, изложенная в работе (Моисеенко, Шубова, 1978). Эта идеология предполагает, что для характеристики фазы ОНЧ-сигнала введена эффективная высота волновода $h$, определяемая как уровень постоянной концентрации электронов ионосферы вдоль элемента трассы распространения.

Профиль электронной концентрации изменяется в зависимости от линейной фазы затмения, и разным концентрациям соответствуют различные высоты. Предполагая, что зенитный угол за время затмения постоянен и излучение по диску Солнца и его короне распределено равномерно, изменение эффективной высоты элемента трассы можно выразить в виде:

$$\Delta h = H \cdot \ln\left(\frac{I(\Phi)}{I_{дн}}\right), \qquad (1)$$

где $I(\Phi)$ – поток излучения, зависящий от линейной фазы затмения $\Phi$ (отношения закрытой части диаметра Солнца к полному); $I_{дн}$ – полный поток излучения в дневное время; $H$ – нормировочный коэффициент для соответствующей радиотрассы. Полный поток ионизирующего излучения в дневное время можно представить как сумму потоков ночных дополнительных источников ионизации $I_н$, диска Солнца $I_D=bS(\Phi)$ и его короны $I_к$, 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:

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

где $S_0$ – полная (открытая) площадь солнечного диска. При расчетах трасса разбита на $n$ элементов, длиной по $\Delta r$=200 км, использовано предположение об одинаковом изменении эффективной высоты волновода на протяжении элемента трассы. Для величины элемента выбрано $\Delta r$=200 км, поскольку ширина лунной тени на поверхности Земли составила 463 км. При одномодовом приближении распространения ОНЧ-сигнала по дневной протяженной трассе фазу сигнала $\varphi$ по длине трассы $r$ представим в виде:

$$\phi = \sum_{i=1}^{n} \beta_i \cdot \Delta r \ . \qquad (3)$$

Для $\beta$ – изменения фазы сигнала с расстоянием – в (Орлов, Азарнин, 1970) 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 $R_з$ = 6378 км:

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

В диапазоне ОНЧ в интервале возможных значений высот волновода Земля-ионосфера нами использовано линейное представление фазовой скорости по высоте. Тогда и изменения фазы сигнала с расстоянием $\beta$ на частоте сигнала 14,88 кГц описываются линейным трендом с коэффициентом детерминации $R^2$ = 0,996:

$$\beta(h) = 0,0525 \cdot h - 2,1058 \ . \qquad (4)$$

Представим отклонения фазы радиосигнала в период затмения $\varphi_з$ от значения фазы ближайших невозмущенных суток $\varphi_0$ на основе выражений (3) и (4):

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

С учетом выражения (2) получим:

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

На основе обстоятельств и значений бесселевых элементов затмения 20.03.2015 из (ИПА РАН URL: http://www.ipa.nw.ru/PAGE/EDITION/RUS/AE/20150320soa.txt) по алгоритмам (Дагаев, 1978) получены распределения отношения площадей открытой части Солнца к полной $S(\Phi)/S_0$ вдоль трасс Краснодар–Якутск и Краснодар–Улан-Удэ с шагом $\Delta r$ = 200 км и временным разрешением 3 минуты для каждого из элементов трассы. Примем $I_н/I_{дн}$ = 0,01 (Иванов-Холодный, Никольский, 1969) и $I_к/I_{дн}$ = 0,1 (Альперт, 1972). Методом наименьших квадратов, по данным о вариациях фазы во время затмения $\Delta\varphi$ 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. Для трассы Краснодар–Якутск нормировочный коэффициент $H_{_Якутск}$ равен 4,69±0,42 км. На трассе Краснодар–Улан-Удэ нормировочный коэффициент $H_{_Улан\text{-}Удэ}$ составил 7,62±0,37 км. Оценка изменения эффективной высоты ночного и дневного волновода $\Delta h$ на трассе Краснодар–Якутск составляет 21,6 км, а на трассе Краснодар–Улан-Удэ $\Delta h$ = 35,1 км, что соответствует принятым значениям (https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.684-4-200503-S!!PDF-E.pdf). Изменения высотного профиля волновода Земля-ионосфера в период максимального затенения трасс Краснодар–Якутск (10:45 UT) и Краснодар–Улан-Удэ (10:54 UT) представлены на *рис. 5*.

Максимальное изменение высоты волновода в период максимального затенения трассы Краснодар–Якутск составило 2,88 км (64° с.ш., 78° в.д., линейная фаза затмения $\Phi$=0,59). На трассе Краснодар–Улан-Удэ (10:54 UT) максимальное изменение высоты составило 2,43 км (53° с.ш., 63° в.д., линейная фаза затмения $\Phi$=0,42).

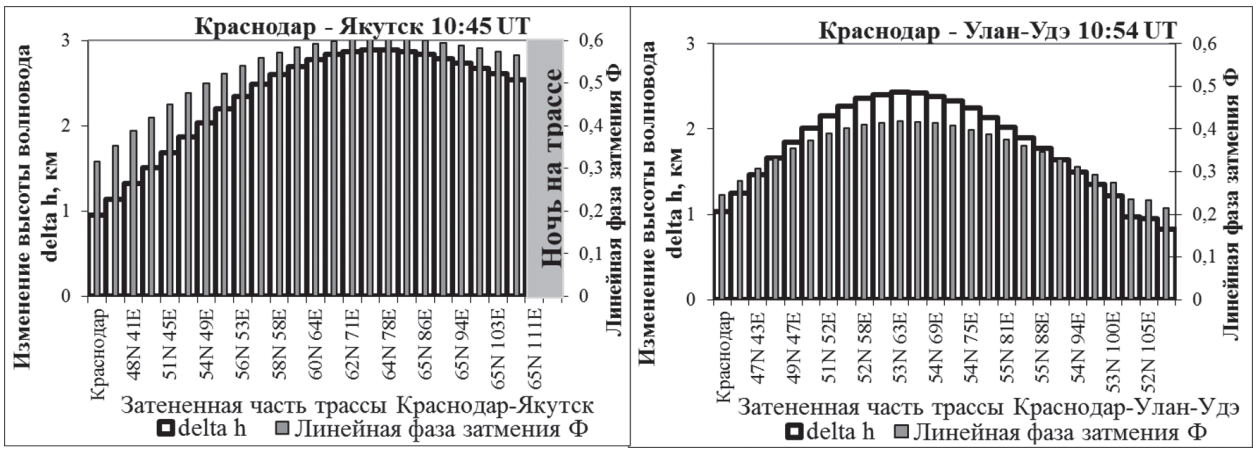


*Рис. 5. Изменения высоты волновода Земля-ионосфера в период максимального затенения трасс Краснодар–Якутск (10:45 UT) и Краснодар–Улан-Удэ (10:54 UT)*

## Заключение

Эффект солнечного затмения 20.03.2015 г. проявился в виде увеличения амплитуды принимаемого в Якутске сигнала станции DHO (в максимуме 23,7% суточной вариации, 10:15 UT). Эффект затмения проявился в вариациях фазы сигнала Краснодар. При приеме в Якутске вариации фазы составили 0,39 радиан (10:45 UT), а в Улан-Удэ – 0,45 радиан (10:57 UT). По данным о вариациях фазы сигнала на трассе Краснодар–Якутск при затмении 20.03.2015 нормировочный коэффициент $H_{_Якутск}$ равен 4,69±0,42 км, на трассе Краснодар–Улан-Удэ нормировочный коэффициент $H_{_Улан\text{-}Удэ}$ составил 7,62±0,37 км. Оценки изменения эффективной высоты волновода ночь – день $\Delta h$ для трасс Краснодар–Якутск и Краснодар–Улан-Удэ составили 21,6 км и 35,1 км соответственно. Наибольшие изменения высоты волновода Земля-ионосфера в период максимального затенения трасс Краснодар–Якутск (64° с.ш., 78° в.д., $\Phi$=0,59, 10:45 UT) и Краснодар–Улан-Удэ (53° с.ш., 63° в.д., $\Phi$=0,42, 10:54 UT) составили 2,88 км и 2,43 км соответственно. Различие изменения высоты волновода Земля–ионосфера во время затмения определяется особенностями более высокоширотной трассы Краснодар–Якутск. Несмотря на то, что область затенения Луной трассы Краснодар–Якутск была больше, время солнечного затмения соответствовало меньшему зенитному углу над трассой Краснодар–Улан-Удэ. Эффекты соответствуют обстоятельствам затмения Солнца на рассмотренных радиотрассах.

Изменения интенсивности и фазы принимаемого ОНЧ-радиосигнала во время солнечного затмения определяются вариацией высоты верхней стенки волновода Земля-ионосфера (области D ионосферы), возникающей из-за изменения потока ионизирующего излучения, определяемого соотношением открытой и закрытой частей солнечного диска.

Работа поддержана РФФИ, проекты № 14-05-31056 мол_а, 15-45-05005 р_восток_а, 15-45-05135 р_восток_а и частично РНФ (проект №14-19-01079).

## Литература

1. *Альперт Я.Л.* Распространение электромагнитных волн и ионосфера. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1972. 564 с.
2. *Гоков А.М., Гритчин А.И, Тырнов О.Ф.* Экспериментальное исследование отклика среднеширотной D-области ионосферы на затмение Солнца 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 2. С. 241–249.
3. *Дагаев М.М.* Солнечные и лунные затмения. М.: Наука, 1978. 208 с.
4. *Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М.* Солнце и ионосфера. М.: Наука, 1969. 456 с.
5. *Каримов Р.Р., Козлов В.И., Корсаков А.А., Муллаяров В.А., Мельчинов В.П.* 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.
6. *Козлов В.И., Муллаяров В.А., Каримов Р.Р.* Особенности вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 2. С. 250–254.
7. *Моисеенко Л.Н., Шубова Р.С.* Изменение эффективной высоты ионосферы в период солнечного затмения // Известия вузов. Радиофизика. 1978. Т. XXI. № 2. С. 269–274.
8. *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.
9. *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. С. 100–110.

# Amplitude and phase variations of VLF radio signals during the solar eclipse on 20 March 2015 registered in Yakutsk and Ulan-Ude

**V.I. Kozlov[1,2], A.A. Korsakov[1], R.R. Karimov[1,2], V.V. Argunov[1], V.P. Mel'chinov[1,2], Yu.B. Bashkuev[3], A.L. Boyarov[3]**

*[1]Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS*
*Yakutsk 677980, Russia*
*E-mail: vkozlov@ikfia.sbras.ru*
*[2]Physical Technical Institute of the North-Eastern Federal University, Yakutsk 677000, Russia*
*[3]Institute of Physical Material Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia*

The effect of solar eclipse of 20 March 2015 was manifested by amplitude increasing (23.7% daily variations) of the DHO signal (23.4 kHz) received in Yakutsk. It also was manifested by phase variations of the Krasnodar station signal (14.88 kHz) received in Yakutsk (0.39 radians) and Ulan-Ude (0.45 radians). Along paths of Krasnodar–Yakutsk and Krasnodar–Ulan-Ude, the distribution of the ratio between the open part of solar disk area during eclipse and total solar disk is presented. From VLF radio signal phase variation, a normalization coefficient was determined. The coefficient relates the change in the effective height of the Earth-ionosphere waveguide to the logarithm of the ratio of the flux of solar radiation during the eclipse to full daytime flux. For the Krasnodar–Yakutsk path, the normalization coefficient is 4.69±0.42 km. For the Krasnodar–Ulan-Ude path, the coefficient is 7.62±0.37 km. The night-to-day changes of the effective height of Krasnodar–Yakutsk waveguide was estimated at 21.6 km. For the Krasnodar–Ulan-Ude path the night-to-day changes were estimated at 35.1 km. For the maximum shading of Krasnodar–Yakutsk path, the maximum change of the Earth-ionosphere waveguide height was 2.88 km (eclipse phase 0.59). For the Krasnodar–Ulan-Ude path, the maximum waveguide height change was 2.43 km (eclipse phase 0.42).

**Keywords:** solar eclipse, radio wave propagation, D region of the ionosphere, effective height of the Earth-ionosphere waveguide

*Accepted: 22.06.2016*
*DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-195-203*

## References

1. Al'pert Ya.L., *Rasprostranenie elektromagnitnykh voln i ionosfera* (Electromagnetic waves propagation and the ionosphere), Moscow: Nauka, 1972, 564 p.
2. Gokov A.M., Gritchin A.I, Tyrnov O.F., Eksperimental'noe issledovanie otklika sredneshirotnoi D-oblasti ionosfery na zatmenie Solntsa 29 marta 2006 g. (Experimental study of the response of the midlatitude ionospheric D-region at the solar eclipse on March 29, 2006), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2008, Vol. 48, No. 2, pp. 241–249.
3. Dagaev M.M., *Solnechnye i lunnye zatmeniya* (Solar and lunar eclipses), Moscow: Nauka, 1978, 208 p.
4. Ivanov-Kholodnyi G.S., Nikol'skii G.M., *Solntse i ionosfera* (The Sun and the ionosphere), Moscow: Nauka, 1969, 456 p.
5. Karimov R.R., Kozlov V.I., Korsakov A.A., Mullayarov V.A., Mel'chinov V.P., Variatsii parametrov signalov radionavigatsionnykh stantsii, registriruemykh v Yakutske v diapazone ochen' nizkikh chastot (Variations of very low frequency signal parameters of radio navigation stations, registrated in Yakutsk), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 57–62.
6. Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Karimov R.R., Osobennosti variatsii kharakteristik ONCh-signalov pri prokhozhdenii lunnoi teni po trasse v period solnechnogo zatmeniya 29 marta 2006 g. (Specific features of variations in the characteristics of VLF signals when the lunar shadow propagated along the path during the solar eclipse of March 29, 2006), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2008, Vol. 48, No. 2, pp. 250–254.
7. Moiseenko L.N., Shubova R.S., Izmenenie effektivnoi vysoty ionosfery v period solnechnogo zatmeniya (The change of ionosphere effective height during the solar eclipse period), *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 1978, Vol. XXI, No. 2, pp. 269–274.
8. Orlov A.B., Azarnin G.V., Osnovnye zakonomernosti rasprostraneniya signalov SDV-diapazona v volnovodnom kanale Zemlya – ionosfera (Basic consistent pattern of VLF signal propagation in the Earth – Ionosphere waveguide), In: *Problemy difraktsii i rasprostraneniya voln* (Problems of Diffraction and Wave Propagation): Leningrad: Izd-vo LGU, 1970, Issue X, pp. 3–107.
9. Chernogor L.F., Variatsii amplitudy i fazy ONCh radiovoln v ionosfere v period solnechnogo zatmeniya 1 avgusta 2008 g. (Variations in the amplitude and phase of VLF radiowaves in the ionosphere during the August 1, 2008, solar eclipse), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2010, Vol. 50, No. 1, pp. 100–110.