

РЕАКЦИЯ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОТРАСС РАЗНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ НА СОЛНЕЧНЫЕ ЗАТМЕНИЯ

В.В. Адушкин, К.И. Горелый

В работе исследованы эффекты воздействия солнечного затмения на состояние сети коротковолновых радиовещательных трасс северного полушария. Исследования полных солнечных затмений радиофизическими методами КВ-диапазона можно производить на любых принимаемых радиотрассах, пересекающих траекторию движения пятна полного затмения.

Введение и постановка задачи

Характерными для солнечных затмений эффектами в ионосфере является снижение электронной концентрации во всей толще ионосферы, зависящее от степени затенения Солнца. Спад электронной концентрации в D- области приводит к уменьшению поглощения радиоволн, что улучшает качество связи на радиотрассах, проходящих через зону затмения. Понижение электронной концентрации в F-области приводит к уменьшению максимальной применимой частоты (МПЧ) и при высоких (дневных) рабочих частотах (РЧ) может привести к потере связи на радиотрассе (уход радиоволны сквозь ионосферу) [Адушкин и др., 2009]. В этой работе использованы материалы наблюдения затмений на одно- и двух скачковых радиотрассах. Полученные новые данные во время затмения на сверхдлинной трассе позволили показать возможность исследования эффектов затмений на трассах любой протяженности.

Поскольку зона частичного затмения охватывает территории размером в тысячи километров, то все радиотрассы, проходящие через эту зону, в большей или меньшей степени испытают его влияние. Критические условия для коротковолновой радиосвязи на трассах наступают после понижения МПЧ, зависящей от освещенности ионосферы Солнцем, до присвоенной реперному передатчику РЧ.

В предлагаемой работе выполнены исследования откликов коротковолновых радиотрасс на три полных солнечных затмения: 29.03.2006 – траектория пятна полного затмения проходила через Кавказ, север Казахстана, Китай; 01.08.2008 – с траекторией через Шпицберген, Н. Землю, Западную Сибирь и Китай; 26.01.2009 – с траекторией южнее Африки через Индийский океан и юго-восточную Азию. Взаимное расположение траектории пятен указанных полных затмений (жирные линии) и выбранных КВ-радиотрасс (тонкие линии) показано на рис. 1.

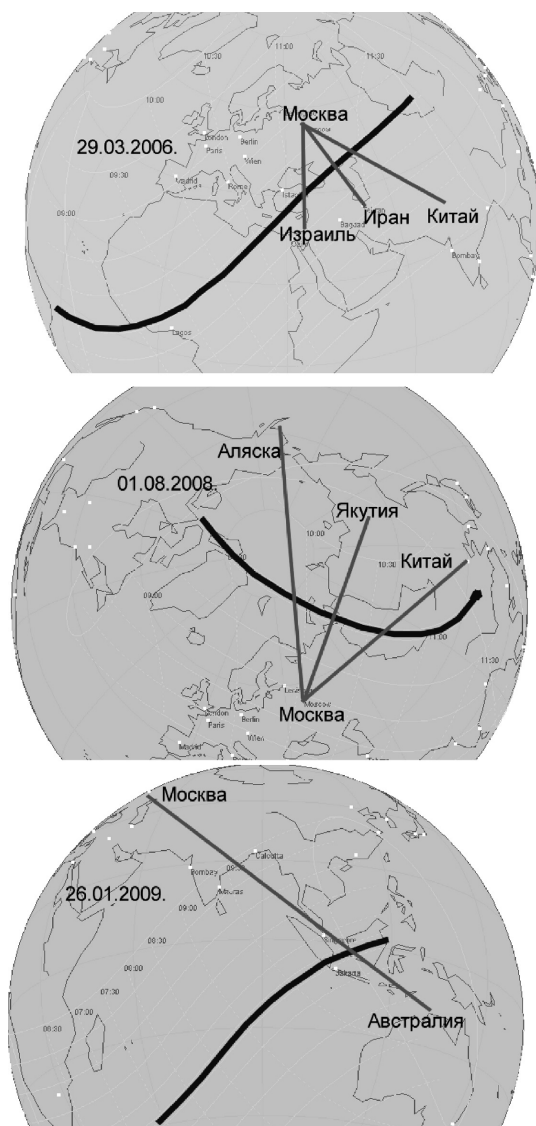


Рис. 1. Взаимное расположение траекторий пятен трех полных солнечных затмений и выбранных для анализа коротковолновых радиотрасс

Постановка измерений

Состояние КВ-радиотрасс контролировалось путем измерения уровня радиосигналов вещательных передатчиков на 80 частотах КВ-диапазона с помощью сканирующего радиоприемника IC R-75 на приемной позиции в обсерватории ИДГ РАН «Михнево». Круглосуточная регистрация данных производилась автоматически с 15-секундным временным интервалом. Банк регистрируемых частот выбирался из сезонного расписания (<http://www.hfcc.org>) для радиостанций, работавших во время затмений. Для тонкого анализа процессов в ионосфере применялась трехчастотная КВ установка наклонного доплеровского зондирования ионосферы (НДЗИ). Реперные передатчики для НДЗИ во время затмений выбирались таким образом, чтобы радиотрассы пересекали траекторию перемещения пятна полного затмения Солнца.

Это условие лучше всего выполнялось для затмения 29.03.2006. – передатчики в Израиле, Иране, Китае и Кувейте (РЧ 15760, 15150, 17490 и 15605 кГц), середина односкачковой трассы находилась над пятном полного затмения. Для затмения 01.08.2008 работа проводилась на многоскачковых радиотрассах длиной 5–7 тыс. км с использованием передатчиков на Аляске, в Якутии и Китае (РЧ 11765, 7345 и 11630 кГц). Затмение 26.01.2009 происходило над Индийским океаном, где радиовещательных передатчиков нет. Измерения произведены в конце затмения с использованием трех передатчиков в одной точке на севере Австралии (РЧ 15555, 17635 и 17820 кГц), длина трассы около 12 тыс. км.

Все полученные результаты измерений приведены на рисунках 2 (для R-75) и 3 (для НДЗИ). На горизонтальных осях рисунков приведено мировое время, а затемненными прямоугольниками показан момент пересечения траектории пятна полного затмения с выбранными радиотрассами. На вертикальных осях рис. 2 приведены значения амплитуд сигналов выбранных реперных передатчиков, а на рис. 3 – доплеровские изменения несущих частот этих же передатчиков.

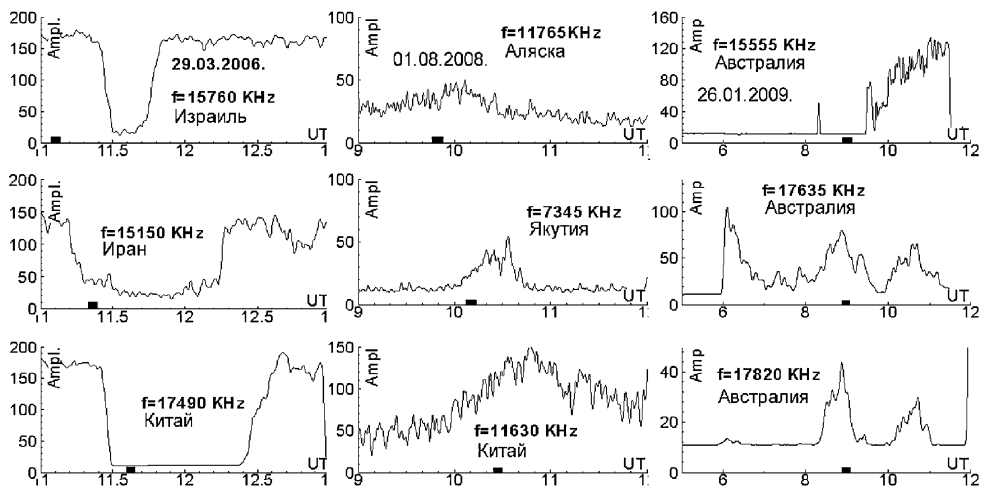


Рис. 2. Вариации уровня КВ-сигнала на трассах разной протяженности во время трех полных солнечных затмений

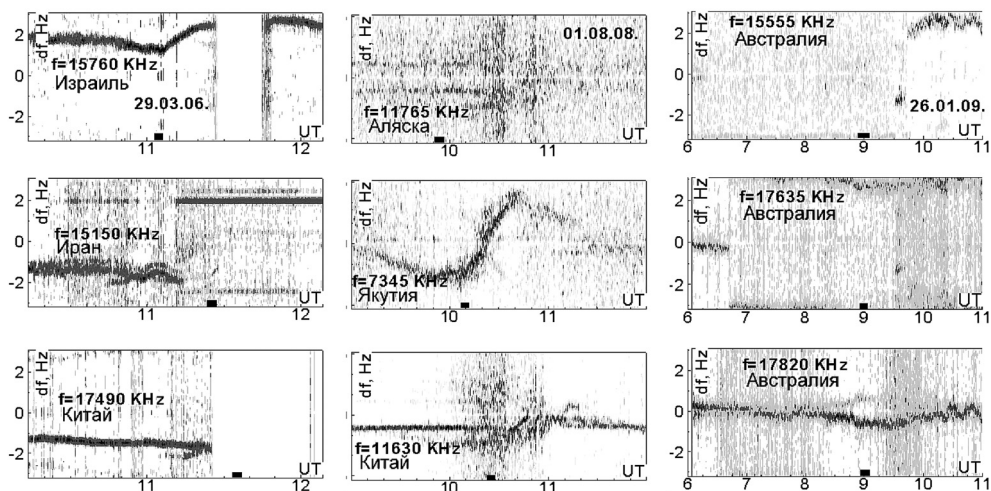


Рис. 3. Доплеровские вариации KB-сигнала на трассах разной протяженности во время трех полных солнечных затмений

Результаты измерений сканирующим приемником

В работе [Клименко и др., 2007] теоретически показано, что во время затмения возникает и перемещается с запаздыванием за лунной тенью обширная пространственная область пониженных значений электронной концентрации. Этот эффект лучше всего наблюдается на однокачковых трассах 29.03.2006, когда спад электронной концентрации на трассах проявился в понижении (вплоть до пропадания) сигнала более чем на полчаса после наступления полного затмения на трассах. Понижение амплитуд сигналов на выбранных частотах связано с модификацией F-области ионосферы в процессе развития затмения – понижение МПЧ, выше которой радиоволны не отражаются ионосферой.

Во время затмения 01.08.2008 выбор реперных радиотрасс ограничен арктическим и сибирским регионом, где имелись передатчики на РЧ не выше 12 МГц, обеспечивавшие многоскачковое распространение через ионосферу. А это значит, что излученный пучок радиоволн может распространяться к приемной позиции несколькими путями, в том числе и через область полного затмения. Поскольку условия распространения KB во время затмения улучшаются, то сигнал даже дальнего передатчика будет усиливаться, что и наблюдается на всех используемых трассах.

Во время солнечного затмения 26.01.2009 на радиотрассе из Австралии (г. Дарвин, передатчики мощностью 250 кВт) наблюдались обе рассмотренные выше (01.08.2008 и 29.03.2006) ситуации:

- до контакта радиотрасс с областью затмения их сигнал не регистрируется;
- после контакта отмечен рост сигнала на более низкой РЧ (15555 кГц – время работы передатчика 09:30–11:30 UT, азимут излучения 303°);
- после прохождения над трассой пятна затмения наблюдается полное пропадание сигнала на фоне его общего роста на более высоких РЧ (17635 кГц – время работы 06–12 UT, азимут 340° и 17820 кГц – время работы 04–11 UT, азимут 240°).

Результаты доплеровских измерений

Результаты измерений на установке НДЗИ для трех затмений показаны на рис. 3 в виде временных графиков 10-секундных доплеровских спектров несущей частоты выбранных в предыдущем разделе реперных передатчиков. Доплерограммы несут информацию о движении и изменении среды на трассе наклонного зондирования. Из рисунка видно, что пропадание сигналов во время затмения на трассах НДЗИ соответствует полученным в предыдущем разделе.

С началом измерений на НДЗИ во время затмения 29.03.2006 максимум доплеровских спектров на трассе из Израиля медленно смещался в сторону отрицательных значений, а после прохождения через радиотрассу пятна полного затмения знак смещения изменился на противоположный. На двух других трассах этот эффект выражен слабее, но на них наблюдались S-образные доплерограммы [Намазов и др., 1975]. Характерные S-образные доплерограммы косвенно указывают на формирование на трассах крупномасштабных корытообразных структур с наклоном линий равной электронной концентрации и минимумом вдоль траектории пятна полного затмения, что способствует изменению траектории радиоволны и ее уходу сквозь ионосферу. После прохождения через трассу пятна полного затмения (11:05 UT) на фоне роста электронного содержания отмечено полное пропадание на 20 минут зондирующего сигнала (11:26–11:46 UT).

Аналогичная ситуация наблюдается на других трассах НДЗИ, причем время пропадания сигнала на восточной паре трасс почти в 3 раза больше чем на западных трассах. Это связано с ростом скорости перемещения пятна на заключительной фазе затмения до сверхзвуковых величин (роль кривизны Земли), из-за чего происходит генерация ударной волны и АГВ [Афраймович и др., 2006]. Структура ионосферы при этом становится более сложной, а пропадание сигнала на восточных трассах более продолжительное чем на западных.

Солнечное затмение 01.08.2008 отличается от выше рассмотренного большой протяженностью измерительных трасс и низкими значениями РЧ, что определяется геометрией перемещения пятна полного затмения (Арктика, Западная Сибирь) и малым выбором реперных передатчиков. На трассе из Аляски принимаемый сигнал был на уровне шума и доплеровский эффект затмения обозначился «проявлением» трассы и расширением доплеровского спектра.

С началом затмения на НДЗИ максимум доплеровских спектров на трассе из Якутии медленно смещался в сторону отрицательных значений, а после прохождения через радиотрассу пятна полного затмения знак смещения изменился на противоположный. За характерное смещение максимума доплеровского спектра на трассе из Якутска ответственным является ход электронного содержания на радиотрассе до и после фазы полного затмения.

Аналогичный эффект в первую половину события наблюдался на трассе из Китая: с началом затмения от основного мода отделился второй мод, который смещался, как и на якутской трассе, в сторону отрицательных сдвигов частоты. После 10 UT образовался новый мод в доплеровском спектре с положительным сдвигом частоты, который через 15–20 минут сменился на отрицательный. Это можно интерпретировать как генерацию ударной волны, связанной с переходом скорости движения пятна затмения через звуковой барьер. В интервале 10:30–11:00 UT появилось несколько колебательных изменений максимума доплеровского спектра, которые можно трактовать как следствие перемещения АГВ.

Во время затмения 26.01.2009 производились доплеровские измерения сигналов трех передатчиков мощностью 250 кВт, расположенных в г. Дарвин и отличающихся друг от друга азимутом излучения. Наиболее близко к дуге большого круга (325°) проходит излучение передатчика с РЧ 17635 кГц, благодаря чему хорошо видна динамика доплерограмм на этой трассе – расщепление доплеровских модов и колебательных изменений максимума доплеровского спектра (перемещение АГВ).

Телесный угол, в который излучает реперный передатчик, зависит от диаграммы направленности передающей антенны, положения дуги большого круга между передатчиком и приемником, углом верхнего и нижнего луча, которые определяют модовую структуру излученных радиоволн. При многомодовом распространении сигналы разных мод накладываются друг на друга, сглаживая принимаемый сигнал.

Заключение

Измерения трехчастотной доплеровской установкой и сканирующим радиоприемником позволили установить следующие особенности реакции радиотрасс на динамику зон частичного и полного затмения.

В ионосфере над областью затенения Солнца наблюдается понижение электронной концентрации зависящее от степени затенения, что улучшает качество связи на радиотрассах, проходящих через зону затмения. Понижение электронной концентрации в F-области приводит к уменьшению МПЧ, что может привести к потере связи на радиотрассе (уход радиоволны сквозь ионосферу). Этот эффект может усилиться при образовании горизонтальных градиентов электронной концентрации во время прохождения пятна полного затмения через радиотрассу.

Из-за кривизны Земли на заключительной фазе затмения возрастает скорость перемещения пятна до сверхзвуковых величин, что приводит к генерации ударной волны и АГВ. Структура ионосферы при этом усложняется и нарушения связи на трассе более продолжительны.

Исследования полных солнечных затмений радиофизическими методами КВ-диапазона можно производить на любых принимаемых радиотрассах, пересекающих траекторию движения пятна полного затмения. Рекомендуемые частоты – 20-метровый радиовещательный диапазон.

Литература

Адушкин В.В., Горелый К.И. Реакция коротковолновых радиотрасс на солнечные затмения / Доклады Академии Наук, 2009, т. 425, № 6, с. 816–820.

Афраймович Э.Л., Воейков С.В. и др. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. в Средней Азии // Тезисы БШШФ-2006, Иркутск, 2006, с. 101–103.

Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н. // Численное моделирование эффектов солнечного затмения 11 августа 1999 года во внешней ионосфере / Космические исследования, т. 45, № 2, 2007, с. 102–110.

Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении дециметровых радиоволн // Известия ВУЗов, Радиофизика, 1975, т. 18, N 4, с. 473–499.