

УДК 550.388.2

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 29 МАРТА 2006 г. ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЛЧМ ЗОНДИРОВАНИЯ

Г.Г. Вертоградов, Е.Г. Вертоградова, В.П. Урядов

Представлены результаты эксперимента и модельные расчеты по исследованию отклика ионосферы на солнечное затмение 29 марта 2006 г. по данным наклонного ЛЧМ зондирования на трассах различной протяженности и ориентации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ, ИОНОСФЕРА, ЛЧМ ЗОНДИРОВАНИЕ.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению эффектов солнечного затмения обусловлен уникальной возможностью исследования ионосферных процессов в условиях достаточно быстрого ($\sim 1\text{--}2$ часа) контролируемого «выключения» и «включения» источника ионизации. Известно, что солнечные затмения сопровождаются целым комплексом физико-химических и динамических процессов в атмосфере и ионосфере Земли. Эффекты солнечного затмения исследуются различными радиофизическими методами, включая вертикальное и наклонное зондирование, трансionoсферное просвечивание сигналами ИСЗ, доплеровские измерения, измерения с помощью радара некогерентного рассеяния и др.

Экспериментальные данные, полученные во время солнечных затмений с использованием различных средств и методов наблюдений, свидетельствуют о четко выраженном отклике параметров ионосферной плазмы на кратковременное изменение потока солнечного излучения. Во время затмения наблюдается уменьшение электронной концентрации во всей толще ионосферы, уменьшение полного электронного содержания и электронной температуры, изменение скорости и направления ионных дрейфов на высотах F -области. Как правило, в F -области отмечается некоторое запаздывание во времени отклика ионосферы относительно фазы затмения. Движение лунной тени в атмосфере Земли приводит к образованию акустико-гравитационных волн и их ионосферному отклику в виде перемещающихся ионосферных возмущений.

ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Эксперимент проводился 28–30 марта 2006 г. 29 марта наблюдалось солнечное затмение. Для выявления отклика ионосферы на солнечное затмение осуществлялось наклонное ЛЧМ зондирование на трассах различной протяженности и ориентации.



Рис. 1.

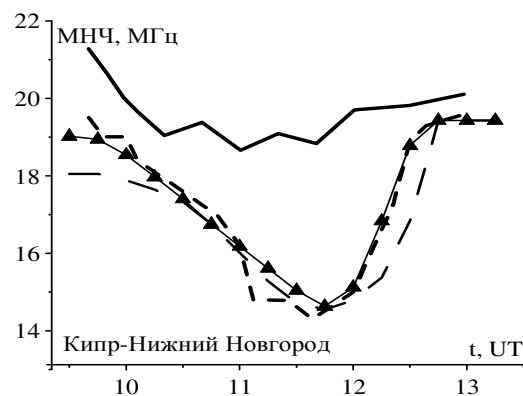


Рис. 2.

На рисунке 1 показаны трассы зондирования: Иркутск — Н.Новгород, Кипр — Н.Новгород, Иркутск — Ростов-на-Дону, Норильск — Ростов-на-Дону и Кипр — Ростов-на-Дону. На этом же рисунке показана траектория движения центра эллипсоидальной анизотропной неоднородности по поверхности Земли (черная жирная линия) и полоса полной фазы солнечного затмения 29 марта 2006 г., ограниченная черными штриховыми линиями. Эти кривые построены по данным [1].

На рисунке 2 представлена зависимость МНЧ от времени на трассе Кипр — Н. Новгород. Штриховая линия соответствует периоду солнечного затмения 29 марта 2006 г. Сплошная жирная линия - контрольный день 28 марта 2006 г. Результаты моделирования показаны треугольниками для следующих параметров анизотропной неоднородности $\delta = -0.45$, $a_x = a_y = 4500$ км, $a_z = 3000$ км. Также показаны результаты моделирования для тестового варианта $\delta = -0.45$, $a_x = a_y = 4500$ км, $a_z = 7000$ км (более тонкая линия с крупными штрихами).

Результаты обработки ионограмм наклонного зондирования (НЗ) приведены на рис. 3, на которых показаны зависимости максимально наблюдаемых частот (МНЧ) от времени на интервале наблюдения солнечного затмения для 29.03.2006 г. и в контрольные дни 28.03.2006 г. или 30.03.2006 г.

Отметим различие контролируемых трасс НЗ. Трассы Кипр — Н.Новгород и Кипр — Ростов-на-Дону пересекаются полосой полной фазы солнечного затмения в окрестности времени 11:03-11:06 UT. В то же время трассы Иркутск — Н.Новгород, Норильск — Ростов-на-Дону и Иркутск — Ростов-на-Дону не пересекаются полосой полной фазы солнечного затмения. Как следствие, максимальные эффекты должны наблюдаться на первых двух трассах (Кипр — Н.Новгород и Кипр — Ростов-на-Дону). Эта особенность хорошо прослеживается на рис. 2,4. Из рис. 2 видно, что при пересечении дуги большого круга трассы Кипр – Н.Новгород полосой полной фазы солнечного затмения (около 11:03 UT) наблюдается глубокий минимум МНЧ, т.е. МНЧ убывает от ~19 МГц до ~14 МГц, а затем возрастает до первоначальных значений. Аналогичное поведение наблюдается на рис. 4 для трассы Кипр – Ростов-на-Дону. На этой трассе полоса полной фазы солнечного затмения пересекает линию трассы в момент времени 11:06 UT. Однако минимальные экспериментальные значения МНЧ на обеих трассах НЗ смещены в сторону больших времен относительно момента пересечения полосой полной фазы солнечного затмения линии трасс. Запаздывание составляет около 30 минут.

При пересечении полосы полной фазы солнечного затмения дуги большого круга Кипр — Ростов-на-Дону, амплитуда принимаемого ЛЧМ сигнала возрастает на низких частотах на величину ~10-15 дБ. Причем для этой характеристики запаздывания практически не наблюдается, что свидетельствует о преимущественном влиянии нижней ионосферы на амплитуду сигналов, поскольку время реакции E-слоя на прохождение лунной тени составляет единицы минут.

Для интерпретации экспериментальных данных выполнено имитационное моделирование процесса распространения КВ (смотрите, например, [2,3]) в условиях солнечного затмения 29 марта 2006 г. С использованием 3-х мерной эллипсоидальной модели возмущения Ne гауссова вида и координат полосы полной фазы солнечного затмения проведены траекторные расчеты, при которых распределение электронной концентрации в невозмущенной ионосфере задано моделью IRI [4]. Модель возмущения содержит ряд неопределенных параметров: δ — относительная амплитуда возмущения, a_x , a_y , a_z — масштабы области возмущения, задержку — τ . Имитационное моделирование преследовало две цели:

- на основе решения многомерной оптимизационной задачи оценить параметры эллипсоидальной модели — a_x , a_y , a_z и задержку τ ;

- дать качественное объяснение полученным экспериментальным закономерностям.

Задача определения параметров локальной эллипсоидальной неоднородности решалась моделированием процесса распространения при различных параметрах возмущения. Во-первых, мы показали, что размеры анизотропной неоднородности вдоль осей x' и y' в локальной системе координат равны, т.е. $a_x = a_y$. Во-вторых, изменение вертикального масштаба a_z от 100 км до 5000 км показало, что при малом вертикальном масштабе, интервал времени, когда возмущение сказывается на процессе распространения, оказывается слишком малым. Это справедливо даже при больших масштабах $a_x = a_y$. Как следствие, нами выбрана для дальнейшего моделирования величина вертикального масштаба $a_z = 3000$ км. Это вполне разумное значение, которое соответствует тому, что экраниро-

вание солнечного излучения проявляется как «дыра» в ионосферной плазме (точнее, пониженная электронная концентрация во всем столбе ионосферной плазмы).

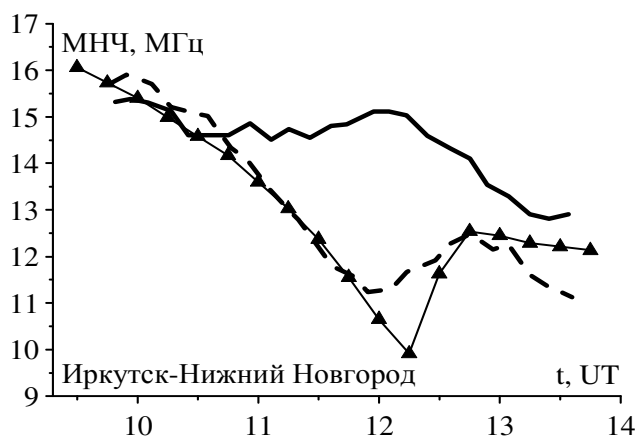


Рис. 3. Зависимость МНЧ от времени на трассе НЗ Иркутск — Нижний Новгород, протяженностью 3800 км и азимутом на передатчик 70.5°. Штриховая линия соответствует периоду солнечного затмения 29 марта 2006 г. Сплошная жирная линия - контрольный день 30 марта 2006 г. Результаты моделирования показаны треугольниками для следующих параметров анизотропной неоднородности $\delta = -0.45$, $a_x = a_y = 4500$ км, $a_z = 3000$ км.

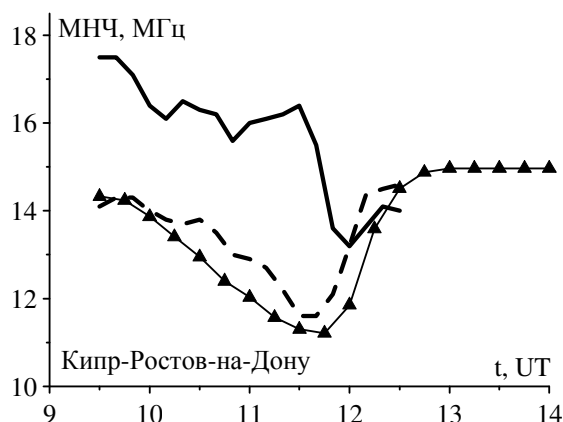


Рис. 4. Зависимость МНЧ от времени на трассе НЗ Кипр — Ростов-на-Дону, протяженностью 1470 км и азимутом на передатчик 203.6°. Штриховая линия соответствует периоду солнечного затмения 29 марта 2006 г. Сплошная жирная линия - контрольный день 30 марта 2006 г. Результаты моделирования показаны треугольниками для следующих параметров анизотропной неоднородности $\delta = -0.45$, $a_x = a_y = 4500$ км, $a_z = 3000$ км.

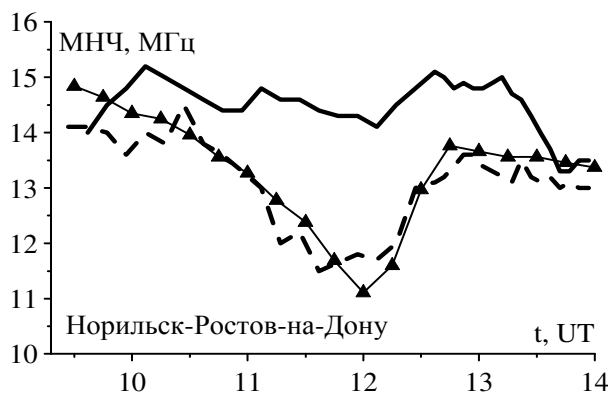


Рис. 5. Зависимость МНЧ от времени на трассе НЗ Норильск-Ростов-на-Дону, протяженностью 3595 км и азимутом на передатчик 29.7°. Штриховая линия соответствует периоду солнечного затмения 29 марта 2006 г. Сплошная жирная линия - контрольный день 30 марта 2006 г. Результаты моделирования показаны треугольниками для следующих параметров анизотропной неоднородности $\delta = -0.45$, $a_x = a_y = 4500$ км, $a_z = 3000$ км.

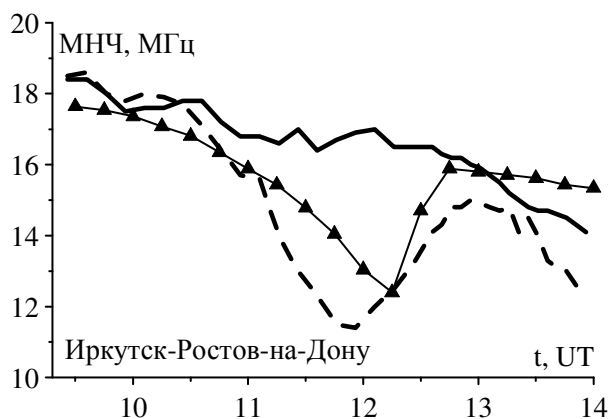


Рис. 6. Зависимость МНЧ от времени на трассе НЗ Иркутск-Ростов-на-Дону. Штриховая линия соответствует периоду солнечного затмения 29 марта 2006 г. Сплошная жирная линия - контрольный день 30 марта 2006 г. Результаты моделирования показаны треугольниками для следующих параметров анизотропной неоднородности $\delta = -0.45$, $a_x = a_y = 4500$ км, $a_z = 3000$ км.

Подбор δ — относительной вариации электронной концентрации так же осуществлялся на осно-

ве численного моделирования при различных значениях от -0.1 до -0.9 . Значение δ оказывает влияние на амплитуду вариации МПЧ от максимального значения (в невозмущенной ионосфере) до минимального в момент, когда возмущение пересекало дугу большого круга Кипр — Н.Новгород. Экспериментальное значение вариации достигает 5 МГц (рис. 2). По результатам имитационного моделирования достигнут разумный компромисс при значении $\delta = -0.45$.

Выбор масштабов $a_x = a_y$ так же выполнен на основе имитационного моделирования при масштабах 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 4500, 5000 км. Моделирование всех рассмотренных трасс НЗ показало, что наилучшим компромиссным значением для указанных параметров является величина $a_x = a_y = 4500$ км. В качестве иллюстрации влияния параметра a_z , на рис. 2 штриховой линией (более тонкой с крупными штрихами) показана зависимость МПЧ при $a_z = 7000$ км. Видно, что параметр a_z , влияя на ширину конуса полутени, воздействует на ширину минимума на зависимости МПЧ от времени. Кроме того, этот же параметр существенно влияет на крутизну переднего фронта минимума на зависимости МПЧ от времени. При этом задний фронт минимума остается практически без изменений. Как следствие, путем решения многопараметрической задачи минимизации отклонения экспериментальных значений МНЧ от модельных МПЧ на различных трассах НЗ и удовлетворения условиям качественного описания переднего и заднего фронтов, глубины и ширины минимума, были найдены следующие компромиссные значения параметров эллипсоидальной анизотропной неоднородности: $\delta = -0.45$, $a_z = 3000$ км, $a_x = a_y = 4500$ км.

Запаздывание реакции ионосферы на прохождений зоны тени и полутени от Луны по ионосфере Земли находилось также на основе имитационного моделирования путем расчетов характеристик при различных задержках τ . В результате установлено, что оптимальным является значение $\tau = 1800$ с.

Далее при полученных параметрах эллипсоидальной неоднородности рассчитаны зависимости МПЧ от времени на интервале 9:00–14:00 UT для трасс НЗ Кипр — Н. Новгород, Иркутск — Н. Новгород, Кипр — Ростов-на-Дону, Норильск — Ростов-на-Дону, Иркутск — Ростов-на-Дону. Результаты расчета для возмущенных солнечным затмением условий показаны на рис. 2–6 тонкими сплошными линиями и треугольниками.

Расчеты для всех трасс НЗ, как для приемного пункта Н.Новгород, так и для приемного пункта Ростов-на-Дону, достаточно хорошо согласуются с результатами эксперимента, рис. 2–6, как количественно, так и по характеру изменений МПЧ и МНЧ от времени, особенно в области переднего и заднего фронтов минимума на зависимости МНЧ от времени. Несколько выбивается по результатам имитационного моделирования трасса НЗ Иркутск — Ростов-на-Дону. Здесь совпадение измеренных МНЧ и рассчитанных МПЧ не столь хорошее. Это связано с особенностями корректировки модели на длинной трассе Иркутск — Ростов-на-Дону и отсутствием в полном объеме данных о движении конуса полутени во время солнечного затмения после того, как его ось оторвалась от поверхности Земли, что обусловило большие расхождения измеренных МНЧ и расчетных МПЧ.

ВЫВОДЫ

1. Разработан подход к моделированию и компьютерная модель для имитации влияния солнечного затмения на процессы распространения КВ.

2. На основе имитационного моделирования ЛЧМ зондирования на трассах Кипр — Н. Новгород, Иркутск — Ростов-на-Дону и Норильск — Ростов-на-Дону определены параметры локальной эллипсоидальной неоднородности с помощью которой может моделироваться влияние солнечного затмения на процесс распространения волн КВ диапазона. Для затмения 29.03.2006 г. получены следующие значения параметров эллипсоидальной неоднородности: $\delta = -0.45$, $a_z = 3000$ км, $a_x = a_y = 4500$ км, $\tau = 1800$ с.

3. Моделирование процессов распространения КВ показало хорошее соответствие разработанной модели экспериментальным данным МНЧ на 4-х трассах Кипр — Н.Новгород, Иркутск — Н. Новгород, Кипр — Ростов-на-Дону, Норильск — Ростов-на-Дону. Особенности трассы Иркутск — Ростов-на-Дону и отсутствие в полном объеме данных о движении конуса полутени во время солнечного затмения после того, как его ось оторвалась от поверхности Земли, обусловили большие расхождения измеренных МНЧ и расчетных МПЧ.

4. Имитационное моделирование показало, что предложенная модель процесса распространения

волн КВ диапазона при солнечном затмении удовлетворительно описывает вариации амплитуды сигнала на трассе Кипр – Ростов-на-Дону. Т.е. модель при солнечных затмениях удовлетворительно описывает модификацию нижней ионосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-02-00177а.

THE RESPONSE OF THE IONOSPHERE TO THE SOLAR ECLIPSE MARCH 29, 2006 BASED ON OBLIQUE LFM SOUNDING DATA

G.G. Vertogradov, E.G. Vertogradova, V.P. Uryadov

Solar eclipse gives the unique possibility of the ionospheric processes studying in conditions of sufficiently rapid “switching-on” and “switching-off” of the source of ionization (~ 1-2 hours). It is known that solar eclipses are accompanied with a complex of physicochemical and dynamic processes in the Earth ionosphere and atmosphere. So, the effects of solar eclipse can be investigated by various radiophysical methods, such as vertical and oblique sounding, transionospheric raying by radio signals from satellite, Doppler measurements, incoherent scattering radar measurements and so on.

Experimental data, obtained during solar eclipse by different methods and equipment, indicate of the clearly defined response of ionospheric plasma parameters to short-time changing of solar flux. Actually the decreasing of electron density is observed in total thickness of the ionosphere during solar eclipse, the decreasing of total content, electron temperature and changing of ion drift velocity, ion drift direction at F-layer altitude are also occurred. As a rule there is a delay between eclipse phase and following ionosphere response. Acoustic-gravity waves and consequently traveling ionospheric disturbances occur as the result of movement of the moon shadow in the Earth atmosphere.

The experimental results of investigation of ionosphere response to solar eclipse on the 29th of March 2006 based on oblique LFM sounding on paths of different path length and orientation and computer simulation of the eclipse are presented in the paper. The model of the ionosphere irregularity for computer simulation of HF radiowave propagation channel during the eclipse is suggested, while quiet ionosphere is described by IRI model.

The parameters of the ionosphere irregularity are obtained during the simulation. It is shown that suggested model provides adequate description of the processes in lower ionosphere during the solar eclipse on March 29, 2006.

KEYWORDS: SOLAR ECLIPSE, IONOSPHERE, LFM SOUNDING.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://eclipse.gsfc.nasa.gov>
2. Г.Г. Вертоградов. Имитатор широкополосного ионосферного радиоканала// Радиотехника и электроника. Т.48, №11. 2003. С.1322-1329.
3. Г.Г. Вертоградов. Особенности решения лучевых уравнений для крутопадающих на ионосферу дециметровых радиоволн// Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Материалы Международной научной конференции “Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ-2005” –Таганрог:ТРТУ, 2005. –440 с. С.397-399.
4. <http://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/models/iri/iri2012/>