

УДК 550.388.2

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29 МАРТА 2006 Г. В СРЕДНЕЙ АЗИИ

¹Э.Л. Афраимович, ¹С.В. Воейков, ²В.В. Водяников,
²Г.И. Гордиенко, ²Ю.Г. Литвинов, ²А.Ф. Яковец, ¹Ю.В. Ясюкевич

IONOSPHERIC EFFECTS OF THE SOLAR ECLIPSE OF MARCH 29, 2006 OVER KAZAKHSTAN

¹E.L. Afraimovich, ¹S.V. Voeikov, ²V.V. Vodyannikov, ²G.I. Cordienko, ²Yu.G. Litvinov,
²A.F. Yakovets, ¹Yu.V. Yasyukevich

В работе представлены результаты исследования ионосферных эффектов солнечного затмения 29 марта 2006 г. в Средней Азии, полученные по данным измерений локальной электронной концентрации (ЭК) на станции вертикального зондирования ионосферы в Алматы и измерений полного электронного содержания (ПЭС) на среднеазиатской сети двухчастотных приемников навигационной системы GPS. Максимальное уменьшение ЭК в максимуме F2 области достигало ~21 %. После окончания затмения наблюдалось возникновение периодических вариаций электронной плотности с затухающей амплитудой и периодом ~90 мин. Данные вертикального зондирования подтверждаются результатами анализа ПЭС. Относительный дефицит ПЭС во время затмения составил около 10 %.

A description of ionospheric effects yielded by the solar eclipse of March 29, 2006 over Kazakhstan is presented. Parameters of the ionosphere were derived from data of an ionospheric sounder located at Alma-Ata and set of GPS receivers scattered in the vicinity of Alma-Ata. The electron density in the F2-layer maximum decreased by ~21% and decreasing was about 25 % in the E-layer. After the eclipse the well-defined periodic ionospheric disturbances with a period of ~90 min were detected. Vertical sounding data were supported by data of Total Electron Content (TEC) measurements. The relative TEC depression was about 10 %.

1. Введение

Наблюдения за изменениями ионосферных параметров во время полных солнечных затмений обеспечивают уникальную возможность изучения влияния Солнца на земную атмосферу [1–3]. Наряду с работами, посвященными оценкам величины потока ионизирующего излучения, поступающего в момент максимальной фазы затмения, большое внимание уделяется изучению параметров атмосферных волн, генерируемых во время затмения. Авторы [4] развили теорию генерации акустико-гравитационных волн (АГВ) в озоновом слое вблизи 45 км, рассматривая охлаждение слоя во время затмения благодаря экранировке потока солнечного излучения рентгеновского и ультрафиолетового диапазонов. Было показано, что сверхзвуковое движение лунной тени в стратифицированной атмосфере приведет к генерации АГВ. Волны, распространяясь вверх, на ионосферных высотах образуют перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые можно зарегистрировать радиофизическими методами.

На протяжении уже 35 лет было предпринято множество попыток получить достоверное подтверждение этой гипотезы. Несколько авторов сообщили о регистрации волн, генерируемых затмением (например, [5, 6]). В работе [7] отметили методические сложности выделения таких волн на фоне постоянно существующих в атмосфере фоновых ПИВ. Следует заметить, что ранее проведенные наблюдения ПИВ проводились или вблизи полосы полного затмения, или в самой полосе. В настоящей работе представлены результаты исследования ионосферных эффектов солнечного затмения 29 марта 2006 г., полученные по данным измерений вариаций локальной электронной концентрации над станцией вертикального зондирования ионосферы в Алматы (43.25° N;

76.92° E) и измерений вариаций ПЭС на среднеазиатской сети двухчастотных приемников навигационной системы GPS, расположенных на расстоянии ~ 750–1100 км от полосы полного затмения.

2. Общие сведения об эксперименте

На рис. 1 показана полоса полного солнечного затмения на территории Средней Азии, а также схема расположения регистрирующих станций GPS (отмечены жирными точками, рядом подписаны названия станций). В Алматы, обозначенном на рисунке треугольником, максимальное закрытие Солнца составило 76%, затмение началось в 15:45:25 местного времени (LT), максимальная фаза наблюдалась в 16:47:37 LT, и конец – в 17:45:21 LT. Разница местного времени в Алматы с мировым временем (UT) составляет 5 ч. Затмение проходило в вечерние часы (высота Солнца в Астане составляла ~18°), поэтому моменты наступления различных фаз затмения на высотах ионосферы заметно отставали от соответствующих моментов на поверхности Земли. В целом скорость перемещения пятна в интервале долгот от 68° до 82° изменялась практически вдвое – от 2450 до 4840 м/с. Магнитная активность в день затмения, а также в предшествующий и последующий дни была очень низкой. Суммарный за сутки K-индекс, полученный на магнитной обсерватории Института ионосферы в Алматы, варьировался в пределах от 11 до 13.

В работе использовались данные измерений критических частот f_0F2 , выполненные с 5-минутным шагом на станции Алматы. С целью выделения вариаций Δf_0F2 производилось удаление тренда скользящим окном длительностью 120 мин.

Методы определения ионосферных параметров на основе фазовых измерений GPS-сигналов были описаны в нескольких работах, включая [1, 8]. В нашем

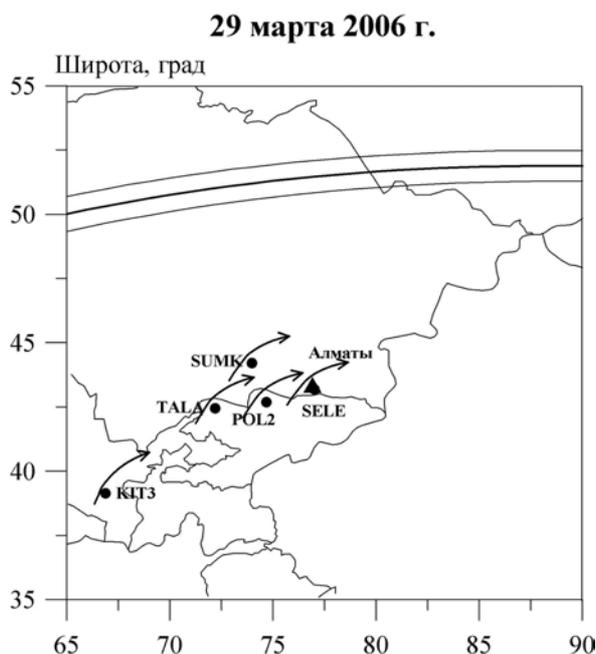


Рис. 1. Геометрия эксперимента 29 марта 2006 г.

эксперименте использовались данные ПЭС на лучах с приемников GPS на спутник с номером PRN 14. На рис. 1 жирными точками обозначены положения приемников сигналов системы GPS. Линии со стрелками представляют траектории и направления движения подыоносферных точек для каждого из приемников для спутника PRN 14. Для исключения регулярных вариаций ионосферы, а также трендов, обусловленных движением спутника, была использована процедура удаления тренда скользящим окном длительностью 90 мин. Для определения горизонтальной скорости перемещения ионосферных возмущений использовался метод SADM-GPS, учитывающий поправки на движение ИСЗ [1].

3. Результаты обработки данных

На рис. 2, *г* тонкой линией представлены отфильтрованные вариации Δf_0F2 . Треугольником на рис. 2, *г* отмечен момент времени, соответствующий максимальной фазе затмения над Алматы на высоте 250 км – высота F2-слоя. Относительное уменьшение критических частот в момент максимального закрытия составило 14 %, что соответствует уменьшению электронной концентрации в максимуме слоя F2 на 28 %. Длительность депрессии электронной концентрации по уровню 0.5 оказалась равной 30 мин. Запаздывание минимального значения электронной концентрации относительно момента максимальной фазы – около 11 мин.

На рис. 2, *г* представлены отфильтрованные вариации Δf_0F2 . Видно, что после наступления максимальной фазы затмения в вариациях f_0F2 наблюдается квазипериодическое возмущение с периодом ~90 мин. Расчет фазовых задержек между вариациями на различных частотах показал, что фазовая скорость волны направлена сверху вниз. Это позволило сделать заключение, что причиной периодических вариаций электронной концентрации являются АГВ. Вертикальная фазовая скорость оказалась равной 140 м/с, что также характерно для АГВ.

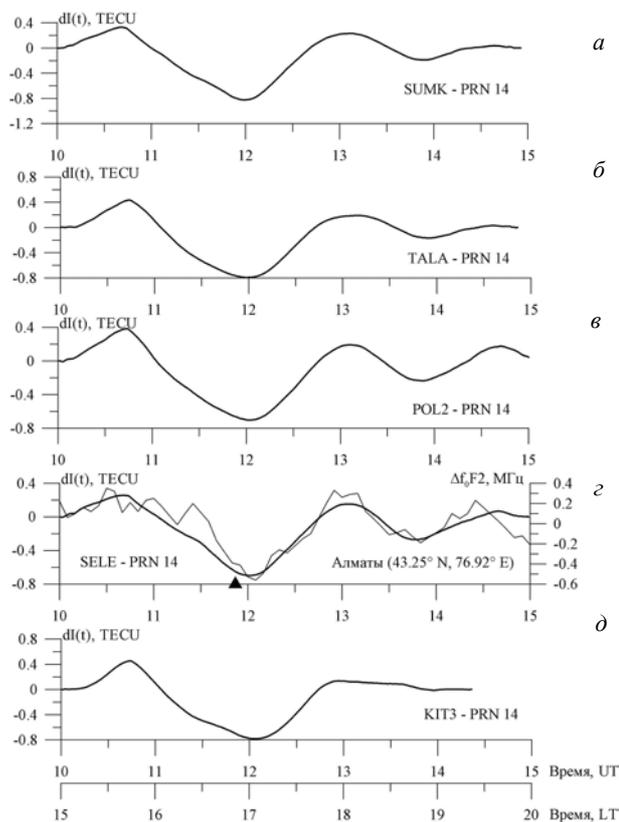


Рис. 2. Отфильтрованные вариации ПЭС по данным среднеазиатских станций GPS (жирные линии) и отфильтрованные колебания f_0F2 , полученные на ионосферной станции Алматы (тонкая линия на рис. 2, *г*).

Волновое возмущение наблюдалось и по данным разнесенных станций GPS (рис. 2). На рис. 2, *г* жирной линией представлены вариации ПЭС на луче SELE–PRN14. Расстояние по горизонтали между подыоносферной точкой, соответствующей минимуму вариаций ПЭС, и ионозондом в Алматы составило порядка 50 км, что много меньше длины волны исследуемого возмущения. Видно, что вариации ПЭС практически повторяют соответствующие изменения Δf_0F2 .

Для определения параметров горизонтальной проекции скорости ПИВ использовались данные вариаций ПЭС с четырех лучей «приемник–ИСЗ» (GPS-станции SUMK, TALA, POL2, SELE для спутника GPS PRN 14). Расположение соответствующих подыоносферных точек позволило выделить две трехэлементные GPS-решетки (рис. 1). По данным первой GPS-решетки (SUMK, TALA, POL2) среднее значение горизонтальной скорости составило на интервале времени 11:00–13:00 UT ~741 м/с, направление распространения (азимут волнового вектора, отсчитываемый от направления на Север) 140°. Для второй решетки (SUMK, POL2, SELE) скорость 626 м/с, направление 150°. Средние по двум решеткам значения составляют: скорость ~684 м/с, направление порядка 145°.

4. Обсуждение и заключение

Полученные нами результаты оценки параметров отклика ионосферы на затмение, обусловленного уменьшением потока излучения Солнца, находятся в хорошем согласии с данными проведенных ранее

измерений [1–3]. Отличие параметров запаздывания, амплитуды (глубины) отклика и его длительности можно объяснить различием геометрии затмений, а также отличием широтных и долготных характеристик регионов регистрации ионосферного отклика.

В то же время наблюдаемые ионосферные возмущения могли быть откликом на АГВ, сгенерированные при сверхзвуковом движении лунной тени [4]. В этом случае направление распространения волн в горизонтальной плоскости должно быть нормально к фазовому фронту ударной волны. Оценим соответствие направления распространения волн, полученного из эксперимента, с расчетом наклона фронта ударной волны. Расчеты показывают, что при скорости звука ~ 680 м/с (горизонтальная скорость, полученная на решетках GPS) и скорости движения тени 2450–4840 м/с наклон фронта ударной волны к параллели составит 20–30°. Из эксперимента мы получили, что фазовый фронт АГВ в горизонтальной плоскости наклонен под углом $\sim 35^\circ$ (азимут волнового вектора 145°), что достаточно близко к приведенной выше оценке.

Таким образом, совместное использование данных ионозонда в Алматы и среднеазиатской сети приемников GPS позволило определить параметры депрессии электронной концентрации в максимуме F-слоя, вызванной уменьшением потока солнечной радиации. Глубина депрессии ЭК достигала примерно 28 %, запаздывание минимального значения ЭК относительно момента максимальной фазы затмения – около 11 мин.

Зарегистрировано перемещающееся ионосферное возмущение, возможно генерированное на фронте ударной волны при сверхзвуковом движении лунной тени. Период возмущения составил около 90 мин, горизонтальная проекция скорости ~ 680 м/с; азимут волнового вектора (145°) совпадает с модельным значением нормали к фронту ударной волны.

Таким образом, возмущение является суперпозицией уменьшения электронной концентрации, вызванного выключением источника ионизации, и ионосферного проявления АГВ, генерированной в области лунной тени.

Авторы выражают благодарность Куркину В.И. и Медведеву А.В. за интерес к работе и обсуждение полученных результатов. Эта работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-05-64634 и 06-05-64577) и гранта INTAS № 03-51-6425.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Afraimovich E.L., Palamarchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of traveling ionospheric disturbances // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 1998. V. 60. P. 1205–1223.
2. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Lesyuta O.S. Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network // *Ibid.* 2002. V. 64. P. 1933–1941.
3. Van Zandt T.E., Norton R.B., Stonehocker G.H. Photochemical rates in the equatorial F2 region from the 1958 eclipse // *J. Geophys. Res.* 1960. V. 5. P. 2003–2009.
4. Chimonas G., Hines C.O. Atmospheric gravity waves induced by a Solar Eclipse // *Ibid.* 1970. V. 75. P. 875–876.
5. Arendt P.R. Ionosphere-gravity waves interactions during the March, 7, 1970, solar eclipse // *Ibid.* 1971. V. 76, N 19. P. 4695–4697.
6. Jones T.B., Wright D.M., Milner J., et al. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2004. V.66, N 5. P. 363–374.
7. Ishinose T., Ogawa T. Internal gravity waves deduced from HF doppler data during the April 19, 1958, solar eclipse // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81, N 13. P. 2401–2404.
8. Afraimovich E.L., Palamarchouk K.S., Perevalova N.P., et al. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from the GPS data // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, N 4. P. 465–468.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, serg3108@iszf.irk.ru

²Институт ионосферы АН РК, Республика Казахстан, Алматы, artyak40@mail.ru