

*Э. Л. АФРАЙМОВИЧ, С. В. ВОЕЙКОВ, В. В. ВОДЯННИКОВ,  
Г. И. ГОРДИЕНКО, Ю. Г. ЛИТВИНОВ, А. Ф. ЯКОВЕЦ*

## **ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29 МАРТА 2006 г. НАД КАЗАХСТАНОМ**

Представлены результаты исследования ионосферных эффектов солнечного затмения 29 марта 2006 г., полученные по данным измерений локальной электронной концентрации на станции вертикального зондирования ионосферы в Алматы и измерений полного электронного содержания (ПЭС) на казахстанской сети двухчастотных приемников навигационной системы GPS.

Наблюдения за изменениями ионосферных параметров во время полных солнечных затмений обеспечивают уникальную возможность изучения влияния Солнца на земную атмосферу [1–3]. Электронная плотность ионосферы определяется процессами производства и потерь электронов. В первых затменных экспериментах предполагалось, что в момент максимальной фазы полного затмения производство электронов полностью прекращается, и скорость потерь может

быть определена из экспериментальных оценок скорости уменьшения электронного содержания. Однако результаты таких экспериментов значительно отличались от теоретических оценок скоростей рекомбинации. Со временем это отличие было объяснено неучетом того факта, что даже во время максимальной фазы затмения в атмосферу Земли продолжало поступать ионизирующее излучение, генерируемое источниками, находящимися в хромосфере и короне за лимбом

Солнца. В работе [4] для исследования относительной величины ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения хромосферы и короны, находящихся за лимбом Солнца, использованы значения параметров ионосферы, полученные во время полных солнечных затмений, происшедших в 1932–1999 гг. Результаты анализа показали, что поток ионизирующего излучения претерпевает значительные вариации в солнечном цикле. Кроме того, данные с космического аппарата SOHO показали, что вариации ионизирующего излучения имеют и короткопериодную составляющую. Наряду с работами, посвященными оценкам величины потока ионизирующего излучения, поступающего в момент максимальной фазы затмения, большое внимание уделяется изучению параметров атмосферных и ионосферных волн, генерируемых сверхзвуковой скоростью движения тени затмения.

Несколько авторов сообщили о наблюдении волн, генерируемых затмением. Vertin et al. [5], измеряя  $f_oF_2$  серий ионозондов в Западной Африке во время затмения 30 июня 1973 г., зарегистрировали слабые перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) с периодом 18 мин и горизонтальной скоростью 275 м/с. Butcher et al. [6], измеряя высоты отражения радиосигнала во время полного затмения 23 октября 1976 г., обнаружили сильные ПИВ с периодом 30–35 и 17 мин. При этом вертикальная фазовая скорость для волны с большим периодом составила 120 м/с. Измерения, проведенные на доплеровской решетке [7] во время затмения 11 августа 1999 г., позволили установить непосредственную связь между индивидуальными волнами и источниками их генерации. Помимо этого были зарегистрированы волны в диапазоне периодов от 10 до 100 мин. Следует заметить, что 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 и измерений вариаций полного электронного содержания (ПЭС) на казахстанской сети двухчастотных приемников навигационной системы GPS, при этом пункты измерений находились на расстоя-

~ 750 – 1100 км от полосы полного затмения.

**Параметры затмения и геометрия эксперимента.** Полное солнечное затмение 29 марта 2006 г. наблюдалось в полосе, пересекающей значительную территорию земного шара. Затмение началось в Бразилии, пересекло Атлантический океан, Северную Африку, Центральную Азию и Казахстан. На рис.1 изображена геометрия прохождения полосы полного солнечного затмения и расположения регистрирующих станций на территории Казахстана. Полоса полного затмения шириной около 150 км проходила примерно 750 км севернее Алматы в долготном направлении. Жирная линия показывает центральную линию полосы затмения, а тонкие линии представляют границы полосы 100 %-ного закрытия Солнца, где продолжительность полной фазы нулевая. В Алматы, обозначенной треугольником, максимальное закрытие составило 76 %. Для станций приема сигналов GPS, изображенных на рис. 1, величина максимального закрытия значительно отличалась от алматинского. В Алматы затмение началось в 15:45:25 местного вре-

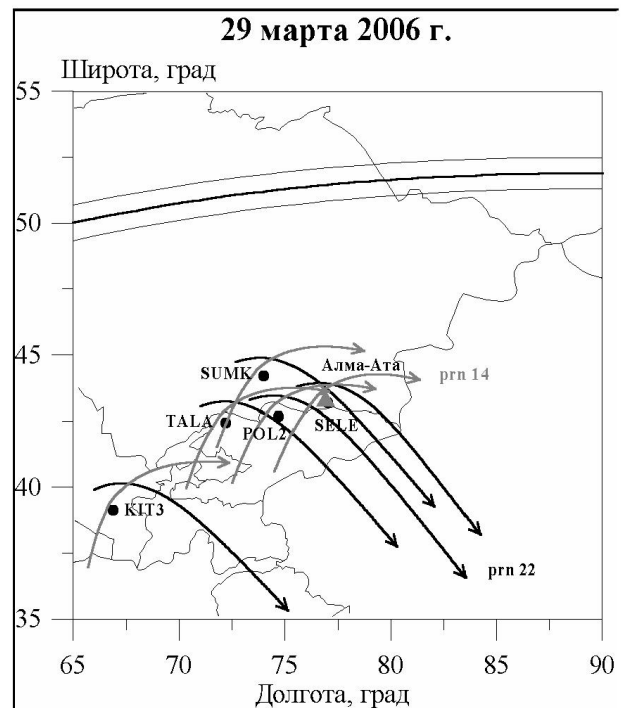


Рис. 1. Геометрия прохождения полосы полного солнечного затмения и расположения регистрирующих станций на территории Казахстана. Жирными точками обозначены положения приемников сигналов системы GPS. Линии со стрелками представляют траектории и направления движения подионосферных точек для каждого из приемников для спутника prn 22

мени (LT), максимальная фаза наблюдалась в 16:47:37 LT и конец – в 17:45:21 LT. Разница алматинского (LT) с мировым временем (UT) составляет 5 ч. Затмение проходило в вечерние часы (высота Солнца в Астане составляла  $\sim 180$ ), поэтому моменты наступления различных фаз затмения на высотах ионосферы заметно отставали от соответствующих моментов на поверхности Земли. Малая высота Солнца над горизонтом определила заметную вытянутость пятна тени вдоль полосы полного затмения и значительную скорость его движения ( $\sim 470$  км и  $\sim 2600$  м/с соответственно) для долготы Астаны.

Магнитная активность в день затмения, а также в предшествующий и последующий дни была очень низкой. Суммарный за сутки К-индекс, полученный на магнитной обсерватории Института ионосферы, равнялся  $K = 13$  для 28 марта,  $K = 11$  для 29 марта и  $K = 12$  для 30 марта.

**Аппаратура и методы обработки.** Наблюдения ионосферы проводились на установленном в Институте ионосферы (Алматы  $76^{\circ}55' E$ ,  $43^{\circ}15' N$ ) ионозонде «Парус», сопряженном с компьютером «Pentium-166», который предназначен для сбора, хранения и обработки ионограмм в цифровом виде. Информация, необходимая для расчетов разнообразных параметров, считывалась с ионограмм полуавтоматическим методом. Анализировались данные наблюдений, полученные в день затмения 29 марта 2006 г., а также 28 и 30 марта. Зондирование ионосферы проводилось каждые 5 мин. С ионограмм считывались значения действующих высот отражения  $h'x(t)$  радиосигнала на ряде фиксированных рабочих частот зондирования, значения критических частот и, кроме того, рассчитывались высотные распределения электронного содержания ( $N(h)$ -профили) для определения истинного расстояния между высотами отражения зондирующего сигнала на разных частотах.

Методы определения ионосферных параметров на основе фазовых измерений GPS сигналов описаны в нескольких работах, включая [8]. Измерения фазы в системе GPS проводятся с высокой степенью точности, при которой ошибка в определении полного электронного содержания (ПЭС) не превышает  $10^{14}$  эл/м<sup>2</sup>. Это позволяет изучать вариации ПЭС в широком динамическом диапазоне, достигающем  $10^{-4}$ , от полного суточного изменения ПЭС. В литературе принята

единица измерения полного электронного содержания, обозначаемая TECU и равная  $10^{16}$  эл/м<sup>2</sup>. В данном методе первичными данными являются временные ряды измерений ПЭС  $I(t)$  вдоль наклонного луча, связывающего приемник и ИСЗ, а также соответствующие им ряды угла места и азимута текущего направления на ИСЗ. Наиболее достоверные результаты определения параметров ионосферы соответствуют большим углам места ИСЗ, поэтому среди созвездия спутников, постоянно «видимых» в любой точке земного шара, следует выбирать спутники с максимальными углами места. В нашем эксперименте такому условию соответствовал спутник prn 22. В целях исключения регулярных вариаций ионосферы, а также трендов, обусловленных движением спутника, была использована процедура удаления тренда скользящим окном.

**Поведение ионосферы во время затмения.** На рис. 2, а сплошной линией показан ход критических частот F2 - слоя ( $f_oF2$ ), полученный на алматинском ионозонде в день затмения 29 марта 2006 г. Штриховой линией проведена сглаженная зависимость  $f_oF2$ , полученная с помощью скользящего среднего с шириной окна, равной 120 мин. На рис. 2, б сплошной линией представлены вариации  $Df_oF2$ , полученные вычитанием сглаженной зависимости из исходного ряда  $f_oF2$ . Как видно, относительное уменьшение критических частот в момент максимального закрытия составило 14%, что соответствует уменьшению электронного содержания в максимуме слоя на 28%. Штриховой линией изображена функция закрытия Солнца  $S(t)$ , рассчитанная для высоты 250 км, соответствующей положению максимума F2-слоя. Функция  $S(t)$  промасштабирована таким образом, чтобы ее минимум находился на одном уровне с минимумом  $Df_oF2$ . Сравнение поведения  $S(t)$  и  $Df_oF2$  показывает, что запаздывание отклика ионосферы на уменьшение потока ионизирующего излучения заметно превосходит запаздывание, характерное для восходящей ветви функции. Соответствующие запаздывания реакции ионосферы на уровне  $Df_oF2 = 5\%$  составили 18,5 мин для рекомбинационных процессов и 4,0 мин для ионизационных процессов.

Солнечное затмение произошло незадолго до захода Солнца, по-видимому, поэтому полное восстановление ионизации в максимуме F2-слоя до уровня, соответствующего предыдущему и пос-

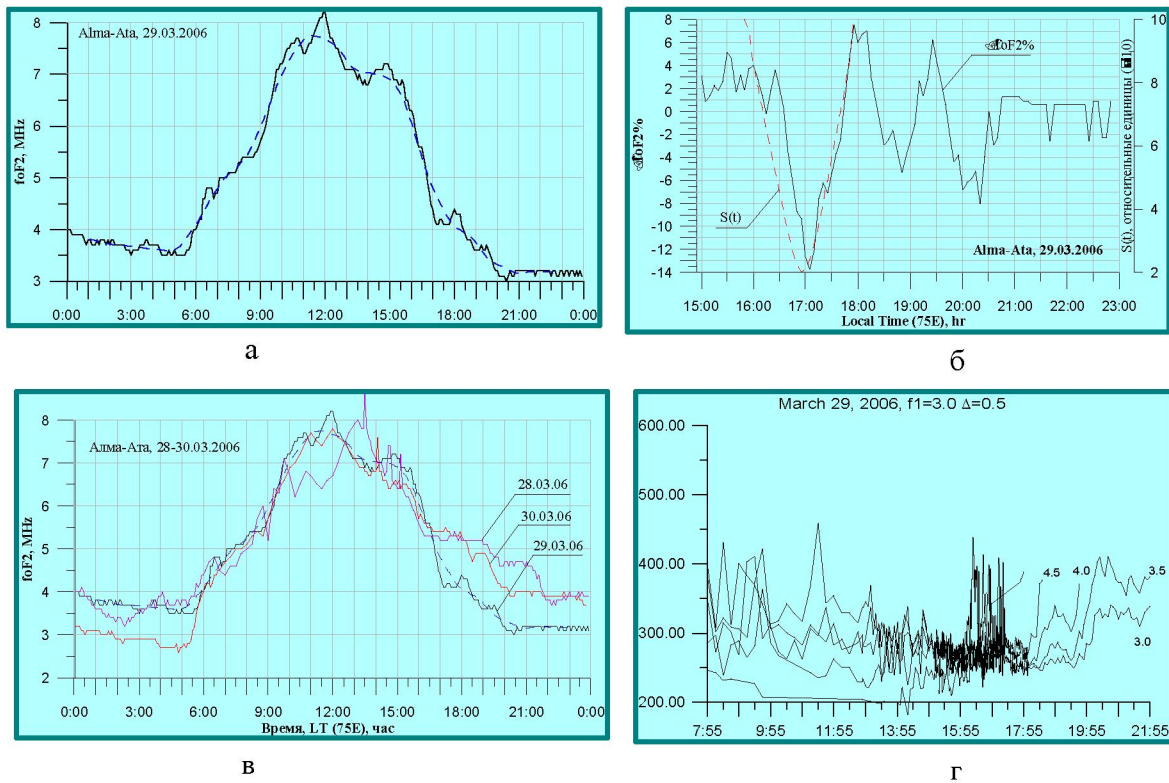


Рис. 2. Вариации критических частот F2-слоя (а–в) и действующих высот отражения сигналов на серии зондирующих частот (г)

ледующему дней, произошло только утром следующего дня, когда включился “главный” источник ионизации ионосферы – Солнце. На рис. 2, в изображено поведение  $f_oF_2$  за три последовательных дня. Как упоминалось выше, эти дни характеризовались чрезвычайно низкой магнитной активностью, поэтому сглаженный ход критических частот в соседние дни достаточно хорошо повторяется.

Однако наблюдался пониженный уровень сглаженного хода критических частот в ночное время, начиная с момента наступления первой фазы солнечного затмения вплоть до 06.00 LT 30 марта. Это понижение следует, видимо, объяснить тем, что затмение произошло перед заходом Солнца и, таким образом, источник ионизации преждевременно выключился. Для количественного объяснения этого факта следует промоделировать обстоятельства затмения с учетом потоков плазмы в системе ионосфера – плазмосфера, направленных в дневное время из ионосферы в плазмосферу, а в ночное время в обратном направлении.

Кроме понижения электронного содержания

F-области, вызванного уменьшением потока ионизирующего излучения Солнца, во время затмения наблюдались и другие эффекты. На рис. 3 приведены четыре ионограммы, показывающие характерные изменения высотного профиля ионосферы. Первая ионограмма, полученная в 15.39 (LT) до момента первого контакта, является типичной дневной ионограммой, на которой представлены E, F1 и F2 слои. Вторая и третья ионограммы получены незадолго до и после главной фазы затмения. На них видны дополнительные межслоевые образования. Четвертая ионограмма, полученная через 25 мин после окончания затмения, представляет собой стандартную ионограмму, характерную для этого времени суток. Следует отметить значительную динамику образования, движения и исчезновения межслоевых образований. Этот эффект хорошо просматривается на рис. 2, г, где приведены вариации действующих высот отражения зондирующих сигналов на ряде фиксированных частот (3,0, 3,5, 4,0 МГц...). Интервал затмения (15.45 – 17.45 LT) характеризуется быстрыми шумоподобными вариациями высот, вызванными появлением и исчезновением дополнительных слоев. Эффект

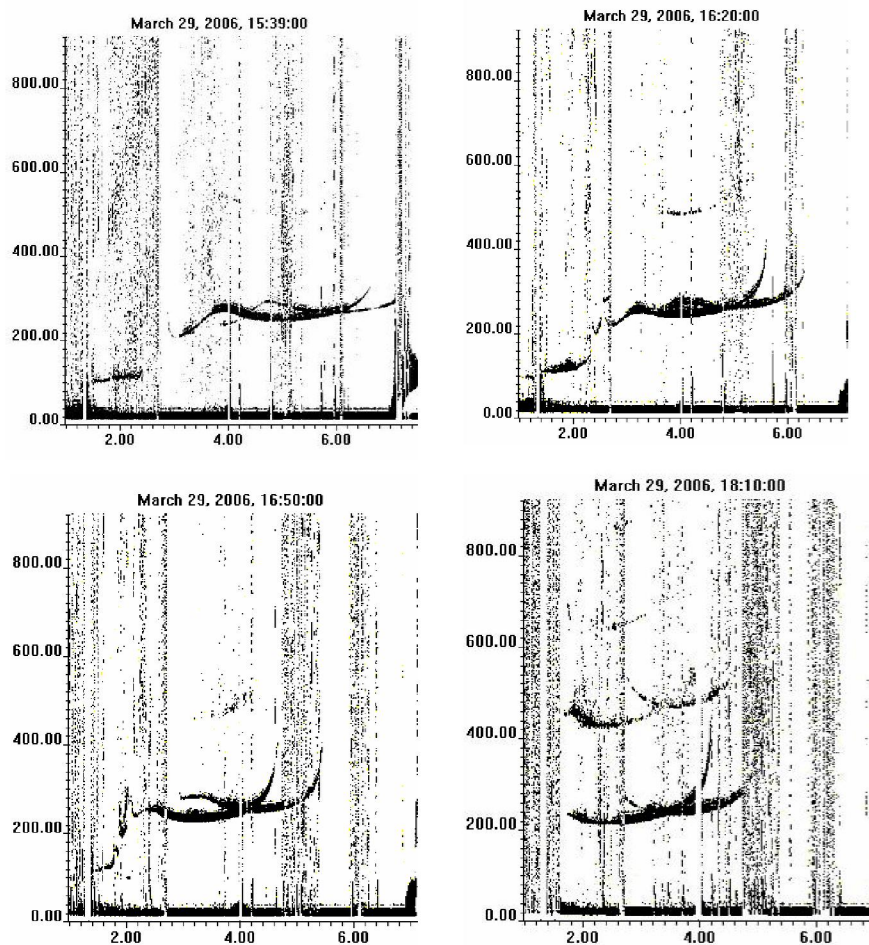


Рис. 3. Последовательность ионограмм, показывающих характерные изменения высотного профиля ионосферы во время затмения

возникновения дополнительных межслоевых образований отмечен также в работе [9].

*Перемещающиеся ионосферные возмущения*, сгенерированные затмением. Кроме эффектов, представляющих реакцию ионосферы непосредственно во время затмения, наблюдались также послезатменные эффекты. Из рис. 2, б видно, что после окончания затмения в вариациях  $f_0F_2$  были зафиксированы две квазипериодические волны с периодом  $\sim 90$  мин. Амплитуды волн не превышают амплитуды вариаций  $f_0F_2$ , наблюдавшихся и до затмения (рис. 2, а), однако характер послезатменных вариаций другой. Это отличие можно обнаружить, если обратиться к рис. 2, г. Поведение действующих высот отражения сигналов на серии зондирующих частот позволяет проследить вариации параметров ионосферы во всей толще.

Видно, что вариации высот после затмения когерентны во всей толще ионосферы, тогда как

когерентность не наблюдается в дозатменных вариациях. Кроме того, расчет фазовых задержек между вариациями на различных частотах показал, что фазовая скорость волны направлена сверху вниз, что позволило заключить, что причиной периодических вариаций электронной плотности являются атмосферные гравитационные волны, сгенерированные затмением [10]. Вертикальная фазовая скорость оказалась равной 140 м/с, что также характерно для АГВ.

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) (рис.4).

Расположение соответствующих подионосферных точек позволило выделить две трехточки (GPS-решетки). По данным первой GPS-решетки (sumk, tala, pol2) горизонтальная скорость составила 565 м/с, направление – 139 град. Для

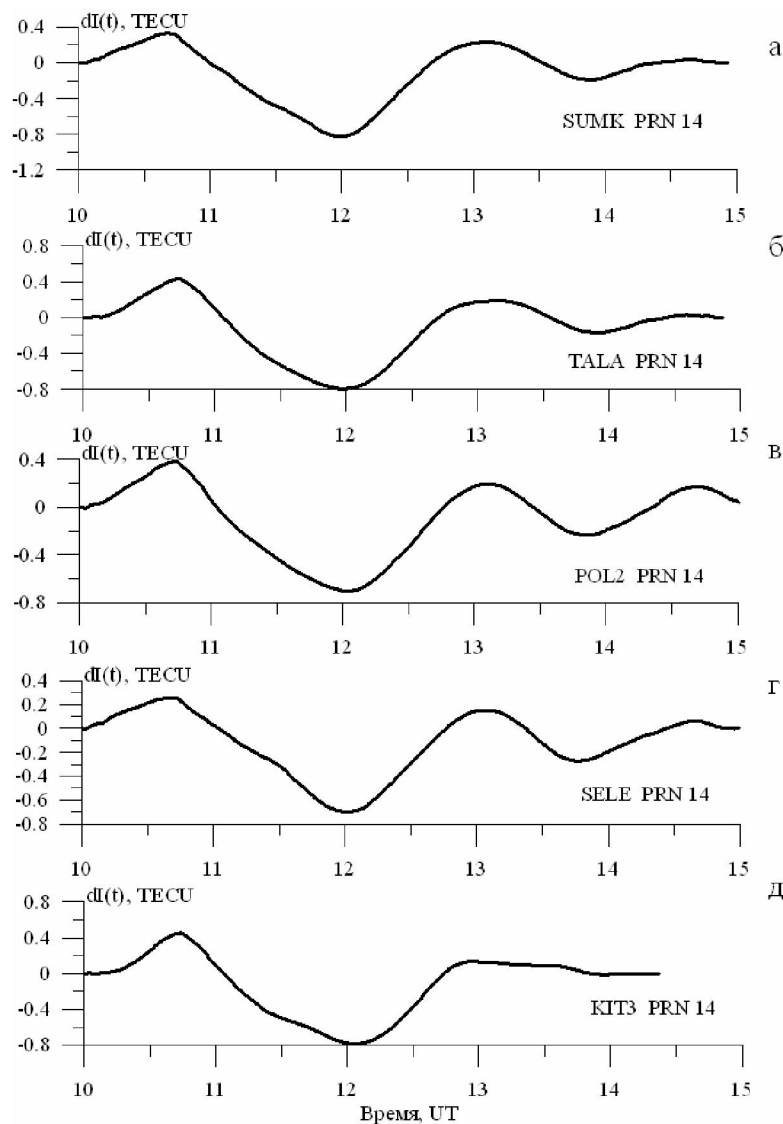


Рис. 4. Вариации полного электронного содержания ионосферы по данным пяти GPS станций

второй решетки (sumk, pol2, sele) скорость 602 м/с, направление 164 град. Если взять среднее по двум решеткам, то скорость составляет ~ 580 м/с, направление – порядка 150 град.

Chimonas and Hines [11] высказали предположение, что солнечное затмение может генерировать атмосферные гравитационные волны (АГВ). В полосе полного солнечного затмения лунная тень приводит к образованию в озоновом слое охлажденного пятна, движущегося со сверхзвуковой скоростью. На рис. 5 приведена схема образования ударной волны. Источник волн движется в направлении, указанном стрелкой, со сверхзвуковой скоростью  $V$ , непрерывно генерируя волны, чья скорость распространения равна  $C$ . Интерференция волн приводит к образованию

ударной волны, формирующей в пространстве конус Маха. Фронт ударной волны наклонен к направлению движения источника под углом  $\alpha$ , определяемым из выражения

$$\sin \alpha = C/V. \quad (1)$$

Chimonas [12] развил теорию генерации гравитационных волн в озоновом слое вблизи 45 км, рассматривая охлаждение слоя во время затмения благодаря экранировке потока солнечного рентгеновского и ультрафиолетового излучения. Он показал, что сверхзвуковое движение лунной тени в стратифицированной атмосфере приведет к генерации атмосферных гравитационных волн. Волны, распространяясь вверх, на ионосферных высотах образуют перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые можно зарегистри-

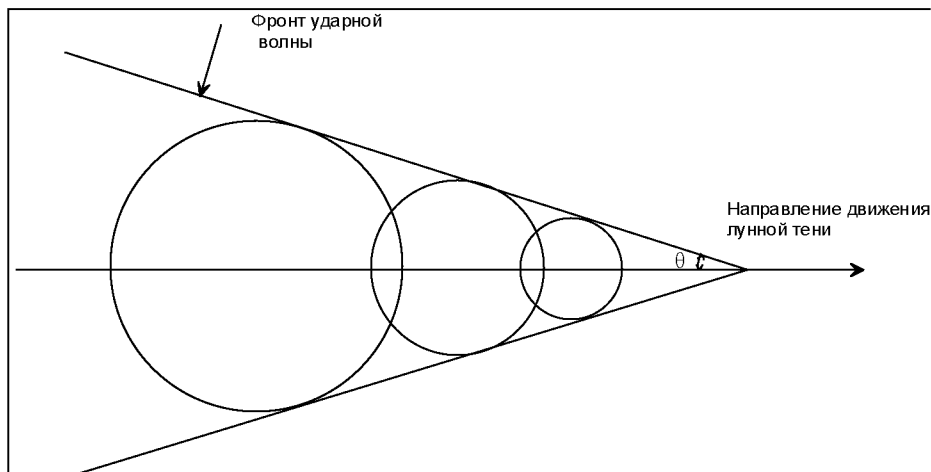


Рис. 5. Схема образования ударной волны сверхзвуковым источником

стрировать радиофизическими методами. Направление распространения волн в горизонтальной плоскости должно быть нормально к фазовому фронту ударной волны.

Оценим соответствие направления распространения волн, полученных из эксперимента с расчетом наклона фронта ударной волны. Подставляя в (1)  $C = 580$  м/с (полученную на горизонтальной решетке) и скорость движения тени  $V = 2600$  м/с, имеем и  $\sim 13^\circ$ . Наклон центральной линии полосы полного затмения составляет  $\nu = 12.4^\circ$  к географической параллели. Тогда наклон фронта ударной волны к параллели равен  $\gamma = \nu + \theta = 25,4^\circ$ . Из эксперимента мы получили, что фазовый фронт АГВ в горизонтальной плоскости наклонен под углом  $\sim 30^\circ$ , что достаточно близко к приведенной выше оценке.

Таким образом, наблюдения отклика ионосферы на затмение 29 марта 2006 г. проведены на установленном в Институте ионосферы ионозонде «Парус» и решетке двухчастотных приемников GPS сигналов. Показано, что относительное уменьшение критических частот в момент максимального закрытия составило 14%, что соответствует уменьшению электронного содержания в максимуме слоя на 28%. Запаздывание отклика ионосферы на изменения потока ионизирующего излучения составило 18,5 мин для рекомбинационных процессов и 4,0 мин для ионизационных процессов. Кроме понижения электронного содержания F-области, вызванного уменьшением потока ионизирующего излучения Солнца, во время затмения наблюдались динамические межслоевые образования. После окон-

чания затмения в вариациях  $f_oF_2$  были зафиксированы две квазипериодические волны с периодом  $\sim 90$  мин. Пространственно-временные характеристики волн показали, что они сгенерированы сверхзвуковым движением лунной тени в озоновом слое в полосе полного солнечного затмения.

*Работа выполнена в рамках проекта 221 (контракт № 8 от 2 марта 2006 года) по программе фундаментальных исследований (шифр Ф.0351) по Государственному заказу.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Afrainovich 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 // Journ. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 1933-1941.
3. Tsai H.F., Liu J.Y. Ionospheric total electron content response to solar eclipses // Journ. Geophys. Res. –Space. 1999. V.104. P.12657.
4. Davis C.J., Clarke E.M., Bamford R.A., Lockwood M., Bell S.A. Long term changes in EUV and X-ray emission from the solar corona and chromosphere as measured by the response of the Earth's ionosphere during total solar eclipses from 1932 to 1999 // Annales Geophysicae. 2001. V. 19. P. 263-273.
5. Bertin F., Hughes K.A., Kersley L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973 // Journ. Atm. Terr. Phys. 1977. V. 39. P. 457-461.
6. Butcher E.C., Downing A.M., Kole K.D. Wavelike variations in the F-region in the path of totality of the eclipse of 23 October 1976 // Journ. Atm. Terr. Phys. 1979. V.41. P. 439-444.
7. Jones T.B., Wright D.M., Milner J., Yeoman T.K., Reid

*T., Senior A., and Martinez P.* The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 // Journ. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2004. V. 66, N 5. P. 363-374.

8. *Afraimovich E.L., Palamarchouk K.S., Perevalova N.P.* GPS radio interferometry of traveling ionospheric disturbances // Journ. Atm. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 1205-1223.

9. *Мусатенко С.И., Максименко О.И., Мусатенко Ю.С., Чолий В.Я., Сухой А.А., Курочка Е.В., Слипченко А.С., Москалюк В.И., Делюков А.А.* Возмущения в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 11 августа 1999 // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т 46, N 1. С. 78-87.

10. *Hines C.O.* Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. 1960. V. 58. P. 1441.

11. *Chimonas G. and C.O. Hines.* Atmospheric gravity waves launched by a solar eclipse // J. Geophys. Res. 1970. V. 75, P. 875.

12. *Chimonas G.* Internal gravity-wave motion induced in the Earth's atmosphere by a solar eclipse // J. Geophys. Res., 1970. V. 75. P. 5545-5551.

#### Резюме

2006 жылдың 29 наурызындағы күн тұтылуының ионосфералық эффектілерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Ол нәтижелер Алматық. ионосфераны тік зондтау стансасында локальдік электрондық концентрацияны өлшеу мәліметтері және толық электрондық құрамның (ТЭҚ) навигациялық GPS-жүйенің екіжиілікті қабылдағышының қазақстандық желісіндегі өлшемдері бойынша алынған.

#### Summary

Results of studying the ionospheric response on the March 29, 2006 total solar eclipse are presented. The study is based on using data of vertical sounding of the ionosphere and GPS station located in the neighborhood of Alma-Ata.

*Институт ионосферы МОН РК,  
г. Алматы*