

УДК 520.16+523.31+523.9:520.86, 550.388

Д. В. Котов<sup>1</sup>, В. А. Пуляев<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

## ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ИОННОГО СОСТАВА ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ В ПЕРИОД СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 1 АВГУСТА 2008 г.

---

*Представлено результати спостережень поведінки іонного складу в зовнішній іоносфері під час часткового затемнення Сонця 1 серпня 2008 р. (фаза 0.42). Вимірювання виконано за допомогою радару некогерентного розсіяння поблизу м. Харкова. Виявлено, що під час головної фази відносний вміст іонів водню збільшувався на висотах 450–650 км до 50 % у порівнянні з контрольним днем. Початок збільшення величини відносного вмісту іонів водню був різним на різних висотах, а вище 560 км зростання випереджало початок затемнення над пунктом спостережень. Висунуто припущення, що цей ефект міг бути обумовлений тим, що 1 серпня 2008 р. місячна тінь наближалася до пункту спостережень з півночі.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Отклики ионосферы на солнечные затмения (СЗ) изучаются достаточно давно и успешно. Несмотря на это, их исследование по-прежнему остается актуальной задачей. Это связано с тем, что реакция среды существенно зависит от фазы в цикле солнечной активности, состояния космической погоды, времени суток, географического расположения обсерватории и т. п. Указанные факторы усложняют решение задач моделирования и предсказания поведения основных параметров ионосферной плазмы в течение СЗ для конкретных гелиогеофизических условий.

Самым информативным из методов диагностики процессов в ионосфере является метод некогерентного рассеяния (НР), который применяется для исследования эффектов СЗ с середины 1960-х гг. [16–18, 21]. Преимущества этого метода подтверждались и в дальнейшем [19, 20]. Из дистанционных методов радиозондирования ионосферы только метод НР позволяет исследовать временные вариации ионного состава.

Харьковский радар НР также систематически используется для наблюдения процессов в

ионосфере, сопровождающих СЗ [1–3, 5–9, 12]. В этих работах изучена реакция на СЗ 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г., которые имели место над Харьковом. Показано, что затмение приводит к уменьшению концентрации электронов  $N$ , температур электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$ , изменению направления и величины вертикальной составляющей скорости  $V$  движения плазмы, ионного состава, потоков частиц из ионосферы в плазмосферу и в обратном направлении, потоков тепла, подводимой к электронному газу энергии, скорости амбиполярной диффузии и т. п. Кроме регулярных параметров плазмы, изменяются также параметры волновых процессов в ионосфере [6–7].

Особенностью СЗ 1 августа 2008 г. было то, что оно имело место в период глубокого минимума солнечной активности. Максимальное значение  $N$  не превышало  $3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , а высота максимума ионизации — 195 км.

Целью работы является описание результатов экспериментальных исследований ионного состава во внешней ионосфере в период частного СЗ 1 августа 2008 г. (фаза около 0.42) вблизи г. Харькова. Сведения о поведении ионного состава получены с помощью метода НР.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СОЛНЕЧНОМ ЗАТМЕНИИ

Солнечное затмение началось в 08:04 (здесь и далее мировое время) в северной части Канады, а закончилось в 12:38 в Китае. Ширина полностью затененной области составляла 237 км, а скорость ее движения — около 900 м/с. Максимальное по продолжительности полное затмение имело место в 10:21.

В месте проведения измерений (вблизи г. Харькова) покрытие диаметра диска Солнца достигало 0.42. При этом максимальная затененная площадь диска составляла около 31.1 %. СЗ началось в 09:11, а закончилось в 11:17, главная фаза имела место в 10:15. Максимальное значение функции покрытия  $A(t)$  диска Солнца (в момент главной фазы) было равно 0.311, а минимальное значение функции светимости  $B(t) = 1 - A(t)$  составляло 0.689.

Затмению предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс  $K_p$  изменялся от 0 до 2). Незначительными были вариации плотности потока протонов. Плотность потока электронов изменялась по квазипериодическому закону с периодом около 1 сут в пределах  $(2-5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1}$ . Составляющая  $B_z$  хаотически варьировала с амплитудой 2–3 нТл. Малосущественными были флуктуации уровня  $B_i$  (около  $\pm 1$  нТл). Достаточно упорядоченными с периодом в 1 сут были вариации  $H_p$ -компонента геомагнитного поля (в пределах 50 нТл). Значения индекса  $D_{st}$  также хаотически флуктуировали в пределах 3–5 нТл. Вариации индекса  $AE$  были незначительными, но в отдельные временные интервалы достигали 300 нТл.

Таким образом, день солнечного затмения 1 августа 2008 г. можно считать спокойным. Это обстоятельство существенно облегчает выделение возмущений, связанных с затмением. Спокойным был и контрольный день 2 августа 2008 г.

## СРЕДСТВА ЗОНДИРОВАНИЯ

**Радар некогерентного рассеяния.** Радар расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36' с. ш., 36°18' в. д.) [4]. Основ-

ные параметры радара следующие: частота — 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны — 100 м, эффективная площадь антенны — около 3700 м<sup>2</sup>, коэффициент усиления антенны — около 10<sup>4</sup>, ширина основного лепестка диаграммы направленности около 1°, импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства достигают 3,6 МВт и 100 кВт соответственно, длительность импульса  $\tau_p \leq 800$  мкс, частота следования импульсов  $F = 24.4$  Гц. Полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет 5.5–9.5 кГц.

Погрешность получаемых параметров ионосферы обычно не превышает 5–10 % в дневное время и 15–30 % в ночное время.

**Ионозонд.** Ионозонд «БАЗИС» предназначен для общего контроля состояния ионосферы и калибровки мощности НР-сигналов. Ионозонд расположен рядом с радаром НР. Погрешность отсчета частоты на ионограммах не хуже 0.1 МГц, а критической частоты — 0.05 МГц.

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА

При наблюдениях ионосферы с помощью метода НР такие параметры плазмы как температуры заряженных частиц, относительное содержание ионов различных сортов и вертикальная составляющая скорости дрейфа плазмы получают в результате решения обратной радиофизической задачи.

Исходными данными являются измеренные автокорреляционные функции (АКФ) сигнала, некогерентно рассеянного ионосферной плазмой. В процессе измерений специализированный коррелятор [10] вычисляет оценки значений АКФ НР-сигнала для заданных величин временных задержек. Эти оценки накапливаются в течение сеансов измерений длительностью 1 мин и записываются с дискретностью 18.33 км вдоль всей развертки дальности.

**Коррекция методических ошибок.** Перед вычислением ионосферных параметров измеренные АКФ подвергаются коррекции с целью устранения систематических ошибок, вызываемых как спецификой инструмента исследования, так и неоднородностью по высоте параметров изучаемой среды.

Поскольку для исследований ионосферы используется радар с импульсным режимом излучения, АКФ сигнала на выходе приемного устройства радара представляет собой свертку АКФ НР-сигнала, АКФ огибающей зондирующего импульса и АКФ импульсной характеристики приемного устройства [15]. Так как количество измеряемых значений АКФ (18 шт.) мало для обеспечения высокой точности результатов операции обращения интеграла свертки, учет характеристик фильтра и зондирующего импульса проводится заранее при расчете библиотек теоретических АКФ. Для этого измеренные АКФ импульсной характеристики фильтра подвергаются операции свертки с АКФ огибающей зондирующего импульса и теоретической АКФ НР-сигнала, соответствующей задаваемым значениям параметров ионосферной плазмы.

Еще одним фактором, приводящим к искажению измеряемых АКФ, является уменьшение объемов плазмы, участвующих в образовании оценок значений АКФ, при росте величины задержки. Это связано с некоррелированностью сигналов, рассеянных объемами плазмы, отстоящими более чем на величину дебаевского радиуса экранирования [4]. В наиболее простом случае, когда характеристики плазмы могут считаться постоянными на интервале высот, соответствующем удвоенной длительности зондирующего импульса, коррекция сводится к делению измеренной АКФ на функцию  $1 - \tau / \tau_p$ , где  $\tau$  — величина задержки, соответствующая данному значению АКФ,  $\tau_p$  — длительность зондирующего импульса [13]. В более общем случае, когда параметры плазмы существенно изменяются вдоль импульсного объема, устранить смещение оценок измеряемых значений АКФ можно только с привлечением дополнительной информации о высотном распределении мощности НР-сигнала, либо измеренной со значительно лучшим пространственным разрешением, либо взятой из модели. Возможность такой коррекции предусмотрена на радаре НР Института ионосферы [11].

Для области высот ниже 300 км искажения АКФ возникают также за счет нестационарности коэффициента передачи антенного коммута-

тора. Устранение таких ошибок легко осуществляется при наличии измеренной зависимости коэффициента передачи антенного коммутатора от времени [11].

Приведенные выше корректирующие операции не решают, тем не менее, важной системной проблемы. А именно — оценки разных значений АКФ получены при разном соотношении сигнал/шум, что приводит к увеличению дисперсии оценок с увеличением задержки. Кроме того, в образовании оценок АКФ принимают участие неодинаковые пространственные области плазмы. Учет этих обстоятельств возможен при использовании так называемого трапециoidalного суммирования [11]. На больших высотах, где соотношение сигнал/шум мало, для уменьшения разброса данных параметр трапециoidalного суммирования приходится увеличивать, ухудшая тем самым разрешающую способность по высоте. Так, в период низкой солнечной активности, которая характеризуется низким уровнем НР-сигнала, разрешающая способность по высоте изменяется от 100 км на высоте 200 км до 290 км на высоте 700 км.

**Фильтрация экспериментальных данных.** Помимо высотного суммирования измеренных АКФ, для уменьшения статистической погрешности используется временное усреднение оценок, полученных в базовых 1-мин сеансах. На практике чаще всего усреднение осуществляется по 15-мин сеансам. Такой временной интервал обычно меньше характерных времен становления естественных процессов в ионосфере. Таким образом, можно считать, что временное разрешение в результате усреднения остается приемлемым.

Разработанное нами в 2008–2009 гг. программное обеспечение позволяет проводить скользящее сглаживание оценок значений измеренных АКФ. Погрешность определения параметров плазмы весьма чувствительна к погрешностям исходных данных. Тщательная первичная обработка измеренных АКФ производится опытным оператором. При этом вырезаются области с аномальными значениями АКФ (вызванными, например, попаданием в диаграмму направленности радара космического мусора). При сколь-

зущем сглаживании качество отбраковки исходных данных приобретает первостепенное значение, поскольку информация от единичного испорченного сеанса неизбежно будет перенесена на соседние. Поэтому после первичной ручной обработки перед скользящим усреднением дополнительно проводится автоматическая отбраковка данных по известному в математической статистике критерию «трех сигм».

Моделирование с использованием экспериментальных данных показало, что для вторичной отбраковки целесообразно использовать выборку из 20 1-мин оценок АКФ. Отметим, что такая фильтрация проводится как до высотного суммирования АКФ, так и после него. Это связано с тем, что выбросы, сопоставимые с уровнем НР-сигнала (и даже ниже его), могут проявиться после суммирования АКФ по высоте.

Третья фильтрация по критерию «трех сигм» производится после нормировки значений АКФ на мощность для получения коэффициента корреляции НР-сигнала. Необходимость такой фильтрации объясняется возможным возникновением выбросов на временном ходе значений оценок коэффициента корреляции. Причина появления таких выбросов — деление значений АКФ на мощность, величина которой может оказаться близкой к нулю. Вероятность подобных аномалий возрастает для больших высот ( $z > 700-800$  км), где соотношение сигнал/шум по мощности не превышает нескольких сотых и измеряемая мощность полезного сигнала флуктуирует около нуля.

**Особенности определения ионосферных параметров.** После коррекции и усреднения измеренных АКФ, полученные для заданных промежутков времени и высот коэффициенты корреляции используются для определения температур заряженных частиц, относительного содержания ионов разных сортов и вертикального компонента скорости дрейфа плазмы.

Решение обратной радиофизической задачи применительно к методу НР состоит в сравнении измеренного откорректированного коэффициента корреляции с коэффициентами корреляции, заранее рассчитанными для заданных аппаратурных характеристик и значений иско-

мых параметров. При этом возникает ряд особенностей, затрудняющих возможности однозначного определения значений ионосферных параметров по экспериментальным данным.

Одна из проблем связана с выбором шага по температурам и ионному составу при расчете библиотек коэффициентов корреляции, с которыми сравниваются экспериментальные данные. Очевидно, шаг по искомым параметрам должен быть существенно меньше статистической погрешности их определения. С другой стороны, неоправданное уменьшение этого шага приводит к недопустимо большой продолжительности расчетов.

Структура новых библиотек, построенных и используемых в Институте ионосферы в 2008–2009 гг., такова. Для заданных длительности зондирующего импульса и фильтра приемного устройства рассчитаны соответствующие библиотеки. Каждая библиотека получена при заданном отношении концентраций ионов различных сортов и содержит коэффициенты корреляции, рассчитанные для температур ионов и электронов, принимающих любые попарно взятые значения в диапазоне 500–4000 К с шагом 30 К. Шаг по ионному составу равен 2 % в диапазоне отношения концентраций ионов 0–12 % и 4 % при относительном содержании больше 12 %. Относительное содержание ионов атомарного водорода может изменяться от 0 до 100 %, гелия — от 0 до 44%. Это дает в итоге общее число библиотек, равное 363.

При поиске параметров используется критерий наименьшего среднего квадратичного отклонения измеренного коэффициента корреляции от полученного теоретически. Полное сравнение со всеми библиотечными функциями занимает недопустимо много времени (вплоть до нескольких суток). Применение обычных методов ускорения процесса поиска, таких как метод последовательных приближений, затруднено из-за шумоподобного характера полезного сигнала и наличия аддитивного шума. В такой ситуации важно правильно выбрать шаги по искомым параметрам при поиске первого (грубого) и последующих (уточненных) минимумов среднего квадратичного отклонения.



Не менее важно правильно выбрать границы области поиска при уточнении грубого минимума. Такая задача была решена с помощью статистического моделирования. При этом использовались данные, полученные для наиболее неблагоприятных с точки зрения погрешностей условий (ночь, большие высоты, минимум солнечной активности). Ставилась задача найти оптимальные шаг по температурам при поиске грубого минимума и область поиска при его уточнении с шагом 30 К. Под оптимальностью подразумевалось отсутствие расхождений между результатами, полученными методом полного перебора библиотечных функций и методом последовательных приближений при минимальном времени расчетов по последнему алгоритму. В соответствии с этими требованиями был определен шаг при грубом поиске, равный 120 К, и область поиска около грубого минимума, равная  $\pm 240$  К. При этом быстродействие обработки возросло на порядок по сравнению с полным перебором.

**Преимущества используемых методик.** Благодаря существенному увеличению скорости определения ионосферных параметров стал возможным анализ экспериментальных данных для большего количества высот. А главное, появилась возможность получать суточные вариации ионосферных параметров с шагом по времени 1 мин. Наличие такой большой выборки полученных результатов в значительной мере позволяет преодолеть проблему неоднозначности, которая всегда существует при решении обратной задачи для нелинейной многопараметрической функции (особенно при большом разбросе исходных данных). Так, например, одновременное рассмотрение вариаций ионной температуры и относительного содержания ионов гелия в большинстве случаев дает возможность уверенно сделать заключение о наличии или отсутствии последнего в действительности (это легко установить по относительной частоте появления ненулевых значений относительного содержания ионов гелия и по четкой временной корреляции больших выбросов этого параметра с аномальными провалами на временном ходе температуры ионов). Дополнительный конт-

роль осуществляется при сравнении результатов, полученных на соседних высотах.

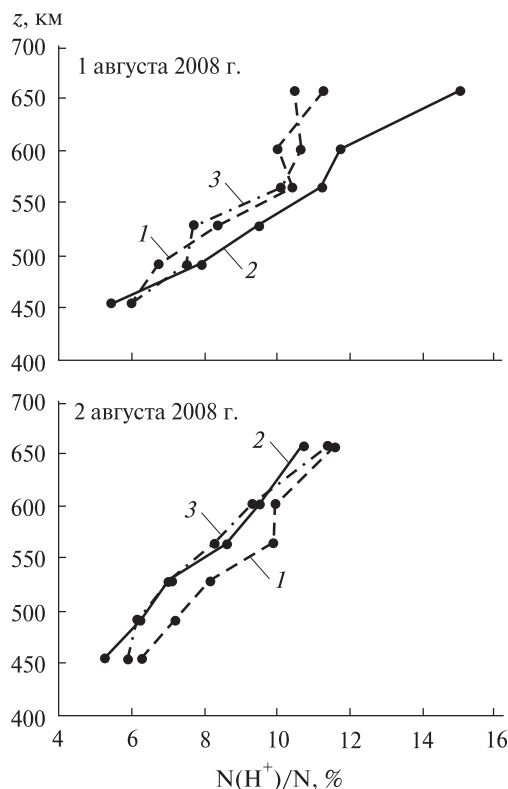
Модельные исследования показали, что используемый анализ экспериментальных данных позволяет получать надежные результаты в диапазоне высот, где уровень соотношения сигнал/шум по мощности больше нескольких сотых.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Высотные вариации относительного содержания ионов водорода.** На рис. 1 представлены высотные зависимости относительного содержания ионов водорода  $N(\text{H}^+)/N$  ( $N$  — концентрация электронов) для трех моментов времени в день СЗ: до начала затмения, вблизи его максимальной фазы, а также после окончания затмения. Видно, что во время главной фазы СЗ наблюдалось увеличение относительного содержания ионов водорода на всех высотах выше 450 км, причем эффект увеличения отношения  $N(\text{H}^+)/N$  усиливался с ростом высоты (от 18 % на высоте 491 км до 33 % на высоте 656 км). После окончания затмения выше 450 км происходило уменьшение относительного содержания ионов водорода. В целом высотный профиль  $N(\text{H}^+)/N$  имел тенденцию принять вид профиля до затмения.

На рис. 1 также приведены аналогичные зависимости для тех же моментов времени для контрольного дня 2 августа 2008 г. Поведение высотных профилей  $N(\text{H}^+)/N$  для контрольного дня характерно для спокойных условий. Видно, что на рассматриваемом интервале времени происходило уменьшение относительного содержания ионов водорода практически на всех высотах, а максимальное значение  $N(\text{H}^+)/N$  было меньшим 12 %, тогда как во время главной фазы СЗ оно достигало 15 %.

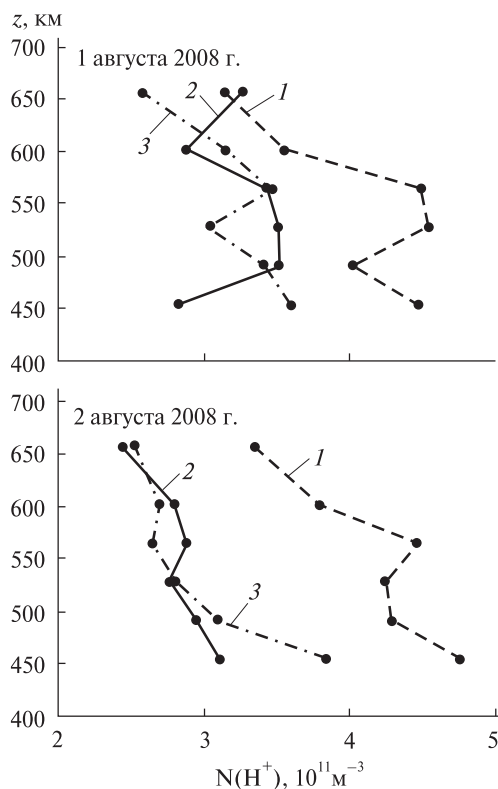
**Высотные вариации концентрации ионов водорода.** На рис. 2 представлены высотные зависимости концентрации ионов водорода  $N(\text{H}^+)$  в рассматриваемые моменты времени для дня затмения и для контрольного дня. Видно, что в отличие от времени до и после затмения, во время главной фазы СЗ для высот, меньших 491 км, наблюдалось уменьшение концентрации ионов водорода. Для высот, больших 564 км, уменьшение величины  $N(\text{H}^+)$  не обнаруживалось.



**Рис. 1.** Высотные профили относительного содержания ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. и контрольный день 2 августа 2008 г. для моментов времени: 1 — 8:10 UT, 2 — 10:10 UT (главная фаза СЗ), 3 — 12:10 UT

В отличие от дня затмения, 2 августа 2008 г. формы профилей  $N(H^+)$  качественно схожи между собой.

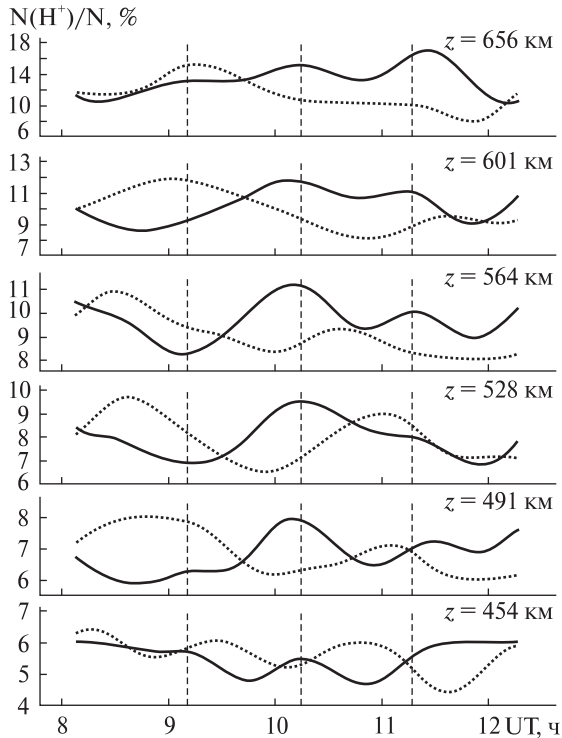
**Временные вариации относительного содержания ионов водорода.** На рис. 3 представлены временные вариации отношения  $N(H^+)/N$  на различных высотах для дня затмения и контрольного дня. Сравнение результатов показывает, что для всех высот, больших 454 км, в период главной фазы СЗ отношение  $N(H^+)/N$  для дня затмения больше, чем для контрольного дня. Степень расхождения увеличивалась с ростом высоты и составляла 33 и 50% на высотах 491 и 656 км соответственно. Кроме этого, в отличие от контрольного дня в день затмения на рассматриваемых высотах наблюдалось возрастание относительного содержания ионов водорода вблизи начала главной фазы СЗ.



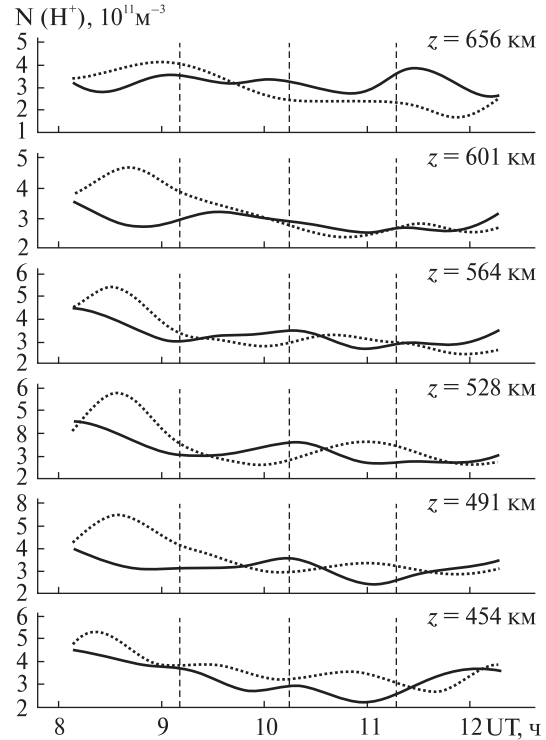
**Рис. 2.** Высотные профили концентрации ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. и контрольный день 2 августа 2008 г. для моментов времени: 1 — 8:10 UT, 2 — 10:10 UT (главная фаза СЗ), 3 — 12:10 UT

Следует отметить, что на больших высотах рост отношения  $N(H^+)/N$  начинался на несколько десятков минут раньше начала затмения, а на малых высотах — запаздывал по отношению к началу затмения на то же время. Обратная картина наблюдается при уменьшении отношения  $N(H^+)/N$ , т. е. продолжительность фазы повышенных значений относительного содержания ионов водорода была большей на больших высотах.

**Временные вариации концентрации ионов водорода.** На рис. 4 представлены временные вариации концентрации ионов водорода  $N(H^+)$  на различных высотах для дня затмения и контрольного дня. Временные вариации величины  $N(H^+)$  не имеют общих для рассматриваемых высот тенденций, как это происходит с относительным содержанием  $N(H^+)/N$ . На всех рассматриваемых



**Рис. 3.** Временные вариации относительного содержания ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. (сплошная линия) и контрольный день 2 августа 2008 г. (точки) для различных высот. Результат двукратного скользящего усреднения на интервалах 31 мин со сдвигом 1 мин



**Рис. 4.** Временные вариации концентрации ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. (сплошная линия) и контрольный день 2 августа 2008 г. (точки) для различных высот. Результат двукратного скользящего усреднения на интервалах 31 мин со сдвигом 1 мин

высотах в день затмения и контрольный день ионы гелия не были обнаружены.

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Вариации относительного содержания ионов водорода.** Очевидно, увеличение отношения  $N(H^+)/N$  на рассматриваемых высотах во время затмения было обусловлено притоком ионов из плазмосферы подобно тому, как это происходит ночью. Аналогичное поведение отношения  $N(H^+)/N$  отмечалось и для других наблюдавшихся в обсерватории Института ионосферы затмений (11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г.) [1–3, 5–9, 12].

Поведение отношения  $N(H^+)/N$  во времени (несовпадение моментов начала роста и уменьшения относительного содержания для разных высот, не выраженное столь отчетливо для дру-

гих упомянутых СЗ) может быть объяснено не только тем, что в верхней части ионосферы СЗ начинается раньше, чем на малых высотах, а заканчивается — позже (при этом охлаждение плазмы и приток ионов водорода из плазмосферы фиксируется сначала на больших высотах). 1 августа 2008 г. отмеченный эффект, возможно, усиливался благодаря тому, что лунная тень приближалась к пункту наблюдения с севера. В этом случае для северного полушария имеет место следующая картина. Основания трубок геомагнитного поля, проходящих над пунктом наблюдения на небольших высотах, еще не находятся в области затмения. В то же время лунная тень уже покрывает основания трубок геомагнитного поля, берущих начало севернее, и, как следствие, проходящих над пунктом наблюдения на больших высотах. В результате плазма

в этих трубках начинает охлаждаться еще до начала СЗ непосредственно над пунктом наблюдения. Это приводит к уменьшению давления плазмы в магнитной трубке и появлению нисходящего потока (вдоль силовых линий геомагнитного поля) ионов водорода из плазмосферы. Вследствие этого, вероятно, и возникает опережение роста отношения  $N(H^+)/N$  на больших высотах по сравнению с меньшими и даже по отношению ко времени начала затмения.

**Вариации концентрации ионов водорода**, получаемой как результат умножения концентрации электронов  $N$  на величину относительного содержания  $N(H^+)/N$ , могут быть объяснены при рассмотрении поведения каждого из этих параметров. Так, в главную фазу СЗ ниже 491 км сравнительно большое уменьшение значений  $N$  происходило при практически неизменном отношении  $N(H^+)/N$ . Как результат, для этих высот произошло отмеченное выше уменьшение концентрации ионов водорода. На больших высотах, напротив, при более существенном увеличении значений отношения  $N(H^+)/N$  концентрация электронов уменьшалась не так сильно. Вследствие этого снижение концентрации ионов водорода для высот, больших 564 км, не отмечалось.

Таким образом, реакция ионного состава во внешней ионосфере на СЗ 1 августа 2008 г. была качественно подобна реакциям, наблюдавшимся во время затмений 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г. [1–3, 5–9, 12]. Количественные отличия объясняются тем, что эти СЗ имели место в разных гелиогеофизических условиях.

Отметим, что небольшие системные изменения величин  $N(H^+)/N$  и  $N(H^+)$  на столь малых высотах (начиная с 450 км) удалось обнаружить благодаря применению нового программного обеспечения, в котором используются библиотеки с шагом по ионному составу 2 % при  $N(H^+)/N < 16$  %.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что сравнительно слабое затмение Солнца 1 августа 2008 г. (максимальная затененная площадь диска составляла около 31 %), тем не менее, привело к качественным и количественным

изменениям вариаций ионного состава во внешней ионосфере.

2. Выявлено, что во время главной фазы СЗ относительное содержание ионов водорода увеличивалось по сравнению с контрольным днем в области высот 450–650 км. Различие в профилях  $N(H^+)/N$  увеличивалось с ростом высоты и составляло 33 и 50 % на высотах 491 и 656 км соответственно.

3. Отмечено, что временная динамика высотных профилей относительного содержания ионов водорода в день СЗ существенно отличалась от контрольного дня. Такое поведение отношения  $N(H^+)/N$  объясняется появлением в течение затмения нисходящих потоков плазмы из протоносферы.

4. Предложена гипотеза, позволяющая объяснить выраженное опережение начала увеличения отношения  $N(H^+)/N$  на больших высотах по сравнению с меньшими и по отношению к началу затмения. Предполагается, что такой эффект усиливался из-за того, что 1 августа 2008 г. лунная тень приближалась к пункту наблюдения с севера.

5. Указано, что причиной качественных отличий профиля концентрации ионов водорода в момент главной фазы СЗ является противоположный характер количественных изменений концентрации электронов и отношения  $N(H^+)/N$  с увеличением высоты.

6. Установлено, что реакция ионного состава во внешней ионосфере на СЗ 1 августа 2008 г. была качественно подобна реакциям, наблюдавшимся во время затмений 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г. Количественные отличия, очевидно, объясняются тем, что эти СЗ происходили при разных гелиогеофизических условиях.

7. Отмечено, что с помощью нового программного обеспечения удалось наблюдать небольшие системные изменения величин  $N(H^+)/N$  и  $N(H^+)$  на высотах начиная с 450 км. Ранее изучение таких «тонких» эффектов было недоступным.

*Авторы благодарят Л. Я. Емельянова, А. Ф. Кононенко, И. Б. Склярова и Ю. В. Черняка за проведение измерений на харьковском радаре некогерентного рассеяния.*



1. Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И. и др. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэронаука. — 2005. — **45**, № 4. — С. 526–551.
2. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 2002. — № 2. — С. 25–63.
3. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове // Успехи современной радиоэлектроники. — 2005. — № 3. — С. 55–70.
4. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 527 с.
5. Бурмака В. П., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я. и др. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи современной радиоэлектроники. — 2007. — № 3. — С. 38–53.
6. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. — 2007. — **13**, № 6. — С. 74–86.
7. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере в период весеннего равноденствия 2006 г. // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 4. — С. 82–91.
8. Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэронаука. — 2008. — **48**, № 3. — С. 350–364.
9. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокомической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія. — 2004. — **10**, № 1. — С. 12–25.
10. Лысенко В. Н. Программируемый коррелятор для измерения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния // Вестник Харьков. гос. политех. ун-та. — Вып. 1, № 1. — С. 96–99.
11. Лысенко В. Н. Измерение параметров ионосферы средствами корреляционной обработки некогерентно рассеянного сигнала // Радиофизика и электроника. — 2002. — **7**, № 1. — С. 82–88.
12. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Результаты расчетов и обсуждение // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 1. — С. 57–64.
13. Рогожкин Е. В. Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния // Ионосферные исследования. — 1979. — № 27. — С. 46–59.
14. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронаука. — 2001. — **41**, № 5. — С. 659–666.
15. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. — 1969. — **57**, № 4. — С. 139–175.
16. Baron M. J. Incoherent scatter radar observations of the auroral zone ionosphere during the total eclipse of July 10, 1972 // J. Geophys. Res. — 1973. — **78**, N 31. — P. 7451–7460.
17. Evans J. V. An F region eclipse // J. Geophys. Res. — 1965. — **70**, N 1. — P. 131–142.
18. Evans J. V. On the behavior of  $f_0F_2$  during solar eclipses // J. Geophys. Res. — 1965. — **70**, N 3. — P. 733–738.
19. MacPherson B., Gonzalez S. A., Silzer M. P., et al. Measurements of the topside ionosphere over Arecibo during total solar eclipse of February 26, 1998 // J. Geophys. Res. — 1998. — **105**, N A10. — P. 23.055–23.068.
20. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., et al. Observations of the May 30, 1984, annual solar eclipse at Millstone Hill // J. Geophys. Res. — 1986. — **91**, N A2. — P. 1651–1660.
21. Sterling D. L., Hanson W. B., Woodman R. F. Synthesis of data obtained at Jicamarca, Peru, during the September 11, 1969, eclipse // Radio Sci. — 1972. — **7**, N 2. — P. 279–289.

Надійшла до редакції 30.04.09

D. V. Kotov, V. A. Pulyayev, L. F. Chernogor

#### TIME VARIATIONS OF ION COMPOSITION IN THE TOPSIDE IONOSPHERE DURING THE 1 AUGUST 2008 SOLAR ECLIPSE

The results of observations of ion composition behaviour in the topside ionosphere during the 1 August 2008 partial (phase is 0.42) solar eclipse are presented. The measurements were carried out using the Kharkiv incoherent scatter radar. It is shown that during the main phase of the solar eclipse, in the 450–650 km altitude range, fractional content of protons increased to 50 % as compared with the control day. The start of fractional content increasing was different at the different altitudes and increasing above 560 km was advancing the solar eclipse start above the observatory. We suggest that this effect can be interpreted by the lunar shadow approaching to the observatory from north.