УДК 550.388.2

РЕАКЦИЯ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА ЧАСТНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЗАТМЕНИЯ 1 АВГУСТА 2008 ГОДА И 20 МАРТА 2015 ГОДА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Н. В. Бахметьева*, В. Н. Бубукина, В. Д. Вяхирев, Е. Е. Калинина, Г. П. Комраков

Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты наблюдений ионосферных откликов на частные солнечные затмения 1 августа 2008 года и 20 марта 2015 года. Наблюдения проводились методом частичных отражений при рассеянии радиоволн на естественных неоднородностях области D и методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. Наблюдения методом частичных отражений показали уменьшение электронной концентрации в области D в 3÷5 раз. На высотах выше 88 км отклик ионосферы запаздывает на 20÷25 мин по отношению к моменту максимальной фазы затмения, в то время как в нижней части области запаздывание составляет несколько минут. Исследованы вариации характеристик сигналов, рассеянных искусственными периодическими неоднородностями, а также скорости вертикального движения плазмы в нижней ионосфере во время солнечного затмения. Зарегистрировано увеличение амплитуд рассеянных сигналов во время затмения в области E на 30÷40 дБ, расслоение области D и появление сигналов, рассеянных на высотах мезопаузы.

ВВЕДЕНИЕ

Затмение Солнца представляет собой уникальное природное явление и влияет на околоземное космическое пространство, изменяя свойства как нейтральной атмосферы, так и её ионизованной составляющей — ионосферы. Исследованиям ионосферы в период солнечных затмений посвящено огромное количество работ, и в рамках статьи невозможно привести их полный перечень. Обпирная библиография на эту тему дана в работах [1–7]. Первым методом изучения ионосферы во время затмений Солнца являлся анализ ионограмм вертикального зондирования. С течением времени появились новые методы исследований и были выявлены разнообразные ионосферные проявления солнечных затмений. Отметим некоторые из них. С помощью вертикального зондирования было обнаружено уменьшение электронной концентрации в E- и F-слоях ионосферы до 40%, в D-области — до 30% [1–4]. Измерения высотного распределения электронной концентрации с помощью ракет показали её уменьшение на порядок на высотах 70÷90 км во время полного солнечного затмения [8]. Наблюдался рост действующих высот отражений: в F-слое до 100 км и более с отставанием до получаса от времени наступления максимальной фазы затмения [1, 9, 10].

С развитием методов исследований были обнаружены новые ионосферные эффекты солнечных затмений. Радиоастрономическим методом на сети риометров, а также методами вертикального и наклонного зондирования в коротковолновом и сверхдлинноволновом диапазонах длин волн было обнаружено уменьшение поглощения радиоизлучения в *D*-области на величину от 0,35 до 23 дБ на разных частотах [11–13]. Измерения методом частичных отражений в период солнечного затмения 11 мая 1975 года с фазой 0,2 показали уменьшение электронной концентрации на 15÷30 % на высотах 75÷80 км [14]. Также методом частичных отражений во время

^{*} nv_bakhm@nirfi.sci-nnov.ru

Н. В. Бахметьева, В. Н. Бубукина, В. Д. Вяхирев и др.

затмения было зарегистрировано появление летнего полярного мезосферного эха в высоких широтах с временем жизни до четырёх минут, которое авторы работы [15] связали с понижением температуры мезосферы. Анализ ионограмм вертикального зондирования, а также измерения полного электронного содержания ионосферы по данным приёма радиосигналов искусственных спутников Земли и глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС показали, что во время затмения генерируются внутренние гравитационные волны, подобно тому, как это происходит при прохождении терминатора (т. е. границы света и тени) через пункт наблюдения [16, 17]. Методом некогерентного рассеяния установлено уменьшение температуры электронов и изменение направления потока плазмы из плазмосферы; в этом случае режим ионосферы начинает приближается к ночному [2, 17–19]. Отмечается внезапное усиление или возникновение спорадического слоя $E_{\rm s}$ во время затмения [20], появление рассеянных отражений в *F*-слое (*F*-рассеяния), усиление рассеяния сигналов высокочастотных радаров [9]. Во многих работах отмечаются изменения в геомагнитных вариациях (см., например, [21, 22]). Методом зондирования с линейной частотной модуляцией на сети радиотрасс изучались вариации максимальных наблюдаемых частот исследуемых радиолиний в периоды солнечных затмений; модельные расчёты по исследованию отклика ионосферы на солнечное затмение приведены в работах [23, 24]. Указанные примеры не исчерпывают всего многообразия ионосферных эффектов во время затмений Солнца.

Методы исследования ионосферы продолжают развиваться. К настоящему времени метод резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы зарекомендовал себя как эффективный метод изучения нижней ионосферы, включая наиболее трудную для исследования область D [25]. Первые результаты исследования D-области ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей во время солнечного затмения 31 июля 1981 года приведены в работе [26]. В работе [26] установлено, что время релаксации искусственных неоднородностей на частоте 5,75 МГц в период максимальной фазы затмения, составившей $\varphi = 0,75$, увеличилось в 1,6 раза на высоте 65 км, а поглощение радиоволн уменьшилось на 8,8 дБ.

В данной работе мы обсуждаем ионосферные отклики на два солнечных затмения 1 августа 2008 года и 20 марта 2015 года. Новые данные о реакции нижней ионосферы на солнечное затмение позволяют более полно изучать её аэрономию и динамику.

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЯ ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА

Для изучения реакции нижней ионосферы на солнечные затмения использовался метод частичных отражений, который основан на измерении амплитуд магнитоионных компонент сигналов, рассеянных естественными неоднородностями электронной концентрации *D*-области ионосферы [1], и метод резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы [25]. Для анализа состояния ионосферы использовались данные её вертикального зондирования ионозондами DPS-4 в г. Троицке (ИЗМИРАН), а также «Базис» и CADI в п. Васильсурск Нижегородской области (НИРФИ).

1.1. Метод частичных отражений

Метод частичных отражений представляет собой радиолокационное зондирование нижней ионосферы в декаметровом диапазоне длин волн. Он основан на обратном рассеянии радиоволн естественными неоднородностями плазмы, созданными атмосферной турбулентностью. При относительной простоте реализации этот метод позволяет получать сведения об электронной концен-

трации и параметрах неоднородностей на высотах 60÷90 км. В настоящее время теория метода частичных отражений хорошо разработана. Наибольшее распространение получил метод дифференциального поглощения, согласно которому электронная концентрация определяется по отношению амплитуд обыкновенной и необыкновенной компонент рассеянного сигнала [1, 27]. Метод частичных отражений не требует использования мощных передатчиков и обеспечивает сравнительно высокое временное разрешение (менее минуты), что позволяет анализировать быстрые вариации ионосферных параметров. В настоящее время в стране действуют лишь две установки частичных отражений — среднеширотная в НИРФИ (п. Васильсурск, Нижегородская область) и высокоширотная в ПГИ (п. Туманный, Мурманская область).

Измерения характеристик рассеянных сигналов проводились на установке НИРФИ. Она состоит из передатчика, излучающего импульсы с длительностью 25 мкс с импульсной мощностью 50 кВт на частоте 2,95 МГц, приёмопередающей антенны, имеющей по 12 диполей для каждой из двух линейных поляризаций, и приёмного устройства с полосой 70 кГц. Зондирование ионосферы проводилось с тактовой частотой 25 или 50 Гц, для регистрации использовался 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), данные снимались с шагом по высоте 1,4 км. Методика их обработки подробно рассмотрена в работах [1, 14].

1.2. Метод, основанный на создании искусственных периодических неоднородностей ионосферной плазмы

Искусственные периодические неоднородности впервые были обнаружены в 1975 году в экспериментах по изучению влияния мощного радиоизлучения на пробные радиоволны, отражённые от F-области ионосферы [28]. В последствии было доказано, что искусственные неоднородности формируются в поле мощной стоячей радиоволны, возникающей вследствие интерференции падающей на ионосферу и отражённой от неё радиоволн, в диапазоне высот от начала D-области (около 60 км) до высоты отражения мощной радиоволны от ионосферы. В области D неоднородности образуются вследствие температурной зависимости коэффициента прилипания электронов к молекулам кислорода при тройных соударениях [25]. В Е-слое в пучностях стоячей волны происходит нагрев электронного газа, в результате чего образуется периодическая структура температуры, и как следствие концентрации плазмы, с пространственным периодом, равным половине длины мощной радиоволны. Синфазное сложение волн, рассеянных всеми неоднородностями в структуре, обеспечивает резонансный характер рассеяния. Исследование периодической структуры проводится с помощью локации пробной радиоволной. В случае, когда нагревный стенд и локационная установка расположены в одном пункте, синфазное сложение волн обеспечивается выполнением равенства длин нагревной и пробной (зондирующей) радиоволн [25]. В настоящее время опубликовано большое количество работ, в которых приведены результаты экспериментальных исследований характеристик нейтральной и плазменной составляющих ионосферы [25, 29 - 33].

В последние годы для создания и локации периодических неоднородностей используется нагревный стенд «Сура», передатчики которого работают на частотах 4,7 и 5,6 МГц, а для регистрации рассеянного сигнала используется приёмная часть установки частичных отражений. Каждый цикл измерений составляет 15 с, из которых в течение 3 с происходит воздействие на ионосферу с созданием периодических неоднородностей, а в последующие 12 с стенд переключается в режим импульсного локатора, излучая пробные радиоволны с той же частотой и поляризацией. Регистрация сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями на стадии их релаксации, осуществляется путём локации возмущённой области импульсами с длительностью 30 мкс и с частотой повторения 50 Гц. Искусственные неоднородности создаются

Н. В. Бахметьева, В. Н. Бубукина, В. Д. Вяхирев и др.

волной с необыкновенной поляризацией, при приёме рассеянного сигнала выделяется волна с той же поляризацией. Принятые сигналы усиливаются приёмником с полосой пропускания 70 кГц, оцифровываются 12-разрядным АЩП и в виде квадратурных компонент регистрируются в интервале действующих высот 0.750 км с шагом по высоте 1,4 км. В результате по уменьшению амплитуды рассеянного сигнала в e раз определяется время релаксации искусственных неоднородностей после окончания нагрева, а изменение его фазы определяет скорость вертикального движения плазмы [25].

Комбинация двух обсуждаемых методов была впервые реализована в экспериментах летом 2008 года, в том числе при наблюдении солнечного затмения 1 августа 2008 года. Практически одновременное исследование нижней ионосферы обоими методами позволяет получать взаимодополняющие сведения о параметрах и динамике ионосферы (в том числе области D) в разных ионосферных условиях.

2. ПАРАМЕТРЫ ЗАТМЕНИЙ СОЛНЦА 1 АВГУСТА 2008 ГОДА И 20 МАРТА 2015 ГОДА. РЕАКЦИЯ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА ЗАТМЕНИЯ

Наблюдение двух частных затмений с близкими фазами в п. Васильсурск происходило при существенно различающихся ионосферных условиях: в период близкой к минимальным значениям солнечной активности в 2008 году и высокой солнечной активности в 2015 году.

2.1. Характеристики затмения 1 августа 2008 года

Частное солнечное затмение в районе п. Васильсурск (56,1° с. ш.; 46,1° в. д.) по данным астрономического ежегодника началось в 09:06 UT, имело максимальную фазу $\varphi = 0,653$ в 10:15 UT и окончание в 11:20 (московское летнее время опережает мировое на 4 часа). Наблюдения проводились с 30 июля по 2 августа 2008 года. Наблюдательный пункт находился на расстоянии 1 км от нагревного стенда «Сура». В день затмения заметных геомагнитных возмущений не отмечалось, трёхчасовой геомагнитный $K_{\rm p}$ -индекс в данный период имел значение 2÷3. По данным ионозонда «Базис» (56,1° с. ш.; 46,1° в. д.) критические частоты ионосферных слоёв E, F_1, F_2 в период с 31 июля по 3 августа 2008 года были невысоки и составили $f_{0E} = 2,8\div3,3$ МГц, $f_{0F_1} = 3,4\div4,0$ МГц и $f_{0F_2} = 4,5\div4,9$ МГц соответственно на фоне низкой солнечной активности (поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см составил $F_{10,7} = 65\div77$ с.е.п.). Наблюдался спорадический слой $E_{\rm s}$ с частотой экранирования 2,8 МГц и предельной частотой отражений до 3,5 МГц.

2.2. Методика измерений и результаты исследования ионосферы в период частного затмения 1 августа 2008 года

Измерения проводились с 30 июля по 2 августа 2008 года одновременно методом частичных отражений на частоте 2,95 МГЦ (измерения электронной концентрации в области *D*) и методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях на частоте 4,7 МГц (измерения характеристик рассеянных сигналов). При этом ежеминутно в течение 10 с регистрировались сигналы, рассеянные искусственными неоднородностями, а в последующие 50 с регистрировались сигналы частичных отражений. Искусственные неоднородности создавались радиоволной с необыкновенной поляризацией, излучаемой передатчиками стенда «Сура» с эффективной мощностью 80 МВт. Обоими методами регистрировались квадратурные компо-



Рис. 1. Амплитуды сигналов с обыкновенной (*a*) и необыкновенной (*б*) поляризациями, рассеянных естественными неоднородностями электронной концентрации в области *D* и отражённых от ионосферных слоёв и сигналов с необыкновенной поляризацией, рассеянных искусственными периодическими ноднородностями (*в*). Стрелками показаны времена начала, максимальной фазы и окончания затмения, h — действующая высота

ненты обеих поляризаций рассеянного сигнала, на основе которых рассчитывались его амплитуда и фаза.

В результате методом частичных отражений получено высотно-временное распределение электронной концентрации в *D*-области ионосферы на высотах 70÷85 км. Ниже 70 км наблюдались очень слабые частичные отражения, по которым электронную концентрацию достоверно определить было нельзя. На основе регистрации сигналов, рассеянных искусственными неоднородностями, получены высотно-временные зависимости амплитуды и фазы сигнала, их времени релаксации, скорости вертикального движения плазмы на высотах 60÷120 км. Очевидно, что комбинация указанных методов позволяет охватить практически весь высотный интервал нижней ионосферы и получить взаимодополняющие друг друга данные для определения ионосферных и атмосферных параметров.

На рис. 1 в координатах «действующая высота—время» приведены амплитуды сигналов с обыкновенной и необыкновенной поляризациями, рассеянных естественными неоднородностями электронной концентрации в области D и отражённых от ионосферных слоёв, и сигналов с необыкновенной поляризацией, рассеянных искусственными периодическими неоднородностями. Стрелками показаны времена начала, максимальной фазы и окончания затмения. На рис. 1*a*, *б* видны рассеянные сигналы в области D в интервале высот 70÷95 км, отражения пробной волны с необыкновенной поляризацией на высоте чуть ниже 100 км и волны с необыкновенной поляризацией на высоте чуть ниже 100 км. На высоте около 95 км регистрировались отражения от спорадического слоя $E_{\rm s}$, который наблюдался в течение всего

Н. В. Бахметьева, В. Н. Бубукина, В. Д. Вяхирев и др.



Рис. 2. Вариации электронной концентрации в области D, приведённые в величинах натурального логарифма (a) и рассчитанные и усреднённые за каждые 15 мин высотные профили электронной концентрации в области D за период времени с 12:45 до 16:56 MSK (δ). Кружками отмечен профиль, соответствующий времени максимальной фазы затмения

Н. В. Бахметьева, В. Н. Бубукина, В. Д. Вяхирев и др.

периода измерений. Во время затмения приблизительно на 20 км увеличилась действующая высота для необыкновенной компоненты зеркально отражённого от области *E* сигнала, а радиоволна с обыкновенной поляризацией стала отражаться в области *F* на высоте порядка и больше 250 км.

На рис. 2*a* показаны вариации электронной концентрации в области *D*. Как и при наблюдениях затмения 29 марта 2006 года, результаты которых приведены в работе [1], электронная концентрация упала в 3÷5 раз. При этом установлено, что на высотах 75÷77 км достижение минимума электронной концентрации запаздывало по отношению к максимальной фазе затмения на Земле на 3÷4 мин, в то время как на высоте 88÷90 км это запаздывание составило 22÷25 мин. Кроме того, наблюдались волнообразные изменения электронной концентрации с ярко выраженным периодом 45 мин. На ионограммах в дни наблюдений были видны следы от перемещающихся возмущений. По данным работы [1] во время затмения 29 марта 2006 года запаздывание отклика ионосферы составило 20÷24 мин.

На рис. 26 приведены рассчитанные и усреднённые за каждые 15 мин высотные профили электронной концентрации в области D за период времени с 12:45 по 16:56 MSK. Кружками отмечен профиль, соответствующий времени максимальной фазы затмения. Видно уменьшение электронной концентрации практически на всех высотах, наиболее существенно оно в интервале $85\div88$ км.

Из рис. 16 видно, что наблюдались довольно интенсивные сигналы, рассеянные искусственными периодическими неоднородностями в D- и E-слоях. Эти сигналы с развитием затмения постепенно уменьшались и окончательно пропали через 45 мин после начала затмения, т. е. ещё до начала его максимальной фазы. Это обусловлено тем, что необыкновенная компонента мощной волны с частотой 4,7 МГц, излучение которой создавало неоднородности, перестала отражаться от ионосферы. Поскольку по неустановленной причине ионозонд «Базис» в п. Васильсурск 1 августа 2008 года вышел из строя, точно сказать, на какую величину уменьшилась критическая частота F-области в период затмения, невозможно. Однако, если судить по ионограммам за контрольные дни 30–31 июля и 2 августа 2008 года, она должна была уменьшиться не менее, чем на 1÷2 МГц. Из рис. 16 следует также, что уменьшение частоты f_{0F_2} произошло за время порядка 45 мин после начала затмения. В период наблюдений стабильно регистрировались отражения от спорадического слоя E_s на высоте 100÷120 км. За 20 мин до окончания затмения появились отражения от слоя F_2 , а ещё через 7 мин — сигналы, рассеянные искусственными неоднородностями в D- и E-слоях.

На рис. 3 в качестве примера характерных высотных изменений приведены высотные профили амплитуд необыкновенной (штриховая линия) и обыкновенной (сплошная линия) компонент сигналов частичных отражений, ромбами маркирован профиль электронной концентрации N(h), рассчитанный по этим данным, а кружками показан высотный профиль амплитуды сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями, за контрольный день 2 августа 2008 года. В данном случае, согласно методике обработки данных измерений методом частичных отражений, профиль электронной концентрации можно считать достоверным в интервале высот 72÷90 км. Электронная концентрация в контрольные дни плавно возрастает с высотой и имеет величину $N \approx 10^2$ см⁻³ $\div 5 \cdot 10^3$ см⁻³. Исключением является интервал высот 82÷84 км (область мезопаузы), где у многих профилей наблюдается локальный минимум, и вариации электронной концентрации в течение одного часа находятся в пределах от $2 \cdot 10^2$ см⁻³ до $6 \cdot 10^2$ см⁻³. В целом полученные методом частичных отражений величины электронной концентрации соответствуют типичным значениям для области D. В работе [33] приводятся результаты одновременного радиозондирования среднеширотной мезосферы в средневолновом (CB) и коротковолновом (КВ) диапазонах в п. Васильсурск. Отмечается, что на высотах указанного минимума электронной концентрации (как правило, это высоты менее 80 км) при зондировании на частоте



Рис. 3. Примеры высотных профилей амплитуд необыкновенной (штриховая линия) и обыкновенной (сплошная линия) компонент сигналов частичных отражений, профиля электронной концентрации N(h), рассчитанного по этим данным (ромбы), и высотного профиля амплитуды сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями (кружки), за контрольный день 2 августа 2008 года

8,9 МГц часто наблюдалось усиление отражения зондирующих радиоволн, которое авторы работы [33] связывали с рассеянием на плазменной турбулентности.

Профиль амплитуды сигнала, рассеянного периодическими неоднородностями, также имеет вид, характерный для рассеяния искусственными неоднородностями в области *D* с уменьшением амплитуды до уровня шума на высотах 80÷ ÷83 км, что обусловлено ростом скорости отлипания электронов от отрицательных ионов вследствие возрастания концентрации атомарного кислорода. Это приводит к почти полному прекращения образования искусственных неоднородностей за счёт прилипания электронов [25].

В скорости вертикального движения плазмы, которая на высотах 60÷120 км совпадает по величине и направлению со скоростью нейтральной компоненты [34], нами не отмечалось каких-либо ярко выраженных вариаций, которые могли бы быть обусловлены изменением динамики нижней

ионосферы в период затмения. Наблюдались типичные вариации скорости до 10 м/с с периодами, характерными для распространения внутренних гравитационных волн. Таким образом, одновременные наблюдения реакции нижней ионосферы на солнечное затмение позволяют выяснить динамику уменьшения электронной концентрации в области D и оценить условия образования искусственных неоднородностей. Поскольку во время затмения рассеянные неоднородностями сигналы пропали, то нам не удалось выяснить, как изменилось время релаксации рассеянного сигнала (согласно наблюдениям [26], оно должно возрастать в нижней части области D).

Отметим, что результаты эксперимента 2008 года в целом хорошо согласуются с результатами одновременных наблюдений методом частичных отражений частного солнечного затмения 29 марта 2006 года с максимальной фазой 0,696 в средних (п. Васильсурск) и высоких (п. Лопарская) широтах [1].

В работе [1] сделаны оценки изменения электронной концентрации и отклика ионосферы по отношению к моменту максимальной фазы затмения по измерениям на установке частичных отражений НИРФИ во время частного солнечного затмения 29 марта 2006 года. Они показывают, что разное запаздывание отклика ионосферы на высотах нижней и верхней части *D*-области хорошо объясняется предположением о линейном законе для эффективного коэффициента рекомбинации в нижней части *D*-области и квадратичного в её верхней части. Результаты, полученные методом частичных отражений при наблюдении затмения 1 августа 2008 года, соответствуют приведённой гипотезе.

2.3. Характеристики затмения 20 марта 2015 года

Частное солнечное затмение 20 марта 2015 года по данным сайта http://www.astronet.ru/ в п. Васильсурск продолжалось с 09:29 UT до 11:36 UT и имело максимальную фазу $\varphi = 0,586$ в 10:34 UT (московское время опережает мировое на три часа).

2016

Наблюдения методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы проводились с 16 по 21 марта с 10:00 до 16:00 MSK. Эти дни характеризовались повышением геомагнитной активности с развитием к полудню 17 марта магнитной бури планетарного масштаба с геомагнитным индексом К_р до 8 единиц. Буря продолжалась более суток, а 19 марта и в последующие дни магнитная активность вернулась к состоянию до бури с $K_{\rm p} = 1 \div 3$. Развитию магнитной бури предшествовала вспышка на Солнце, которая произошла 15 марта около 05:00 MSK и сопровождалась большим выбросом корональной массы. В результате возросшего во время вспышки поглощения радиоволн КВ диапазона качественные данные о критических частотах ионосферы, полученные ионозондом CADI (56,1° с. ш.; 46,1° в. д.), стали доступны только по окончании затмения. Поэтому для оценки ионосферной обстановки использовались также данные ионозонда DPS-4 (ИЗМИРАН, 55,47 с. ш.; 37,3 в. д.), имеющиеся в открытом доступе [35]. В день затмения максимальные критические частоты ионосферы составляли 9 МГц для слоя F_2 , 4,7 МГц для слоя F_1 и 3,5 МГц для слоя E. На высоте около 100 км регистрировался спорадический слой E_s с предельной частотой отражения до 3,5 МГц. В дни 16–17 марта на ионограммах вертикального зондирования ионозондом CADI были зарегистрированы множественные перемещающиеся возмущения, в последующие дни они также регистрировались, но в меньшем масштабе.

2.4. Методика измерений и результаты исследования ионосферы в период затмения 20 марта 2015 года

Наблюдения проведены методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. Методика регистрации рассеянных сигналов была такой же, как описанная в разделе 1.2. Анализировались временные вариации сигнала, рассеянного неоднородностями, и их изменения, коррелирующие с прохождением лунной тени по диску Солнца. Первые результаты этих наблюдений были приведены в работе [15].

На рис. 4 приведены записи амплитуды сигнала, рассеянного неоднородностями на высотах нижней ионосферы, его времени релаксации τ и скорости вертикального движения плазмы V. Стрелками отмечены времена начала, максимальной фазы и окончания затмения. Хорошо видны рассеянные сигналы от искусственных неоднородностей в области D на высотах 65÷86 км, в области E (90÷130 км) и сигналы от спорадического слоя $E_{\rm s}$ (100÷115 км), который регистрировался также и на ионограммах. Кроме того, через некоторое время после начала наблюдений появились рассеянные на высотах 84÷88 км сигналы, которые до этого не наблюдались. Отметим основные особенности сигналов, рассеянных искусственными периодическими неоднородностями, по наблюдения во время затмения Солнца.

С течением времени рост амплитуды рассеянного сигнала, начавшийся до затмения, значительно усилился во время него, особенно в области E (на $30\div40$ дБ). Наиболее вероятной причиной этого является уменьшение поглощения из-за общего понижения электронной концентрации при уменьшении ионизирующего излучения Солнца. Постепенно сигналы, рассеянные искусственными периодическими неоднородностями, перед началом затмения и во время него стали занимать всё больший диапазон высот в области E. Отметим также, что сигналы рассеянные в D-области в начале наблюдений и после окончания затмения, были более интенсивными, чем сигналы, рассеянные неоднородностями E-слоя. Это не совсем обычное явление, как правило сигналы, рассеянные в D-области, имеют амплитуду на $20\div30$ дБ меньше, чем в E-слое. На рис. 4aхорошо видно, что в области D происходило такое изменение интервала высот образования искусственных периодических неоднородностей, которое соответствует переходу к ночному режиму ионосферы [29, 30]. Отметим, что из-за изменения со временем высоты, с которой приходил рас-





Рис. 4. Записи амплитуды A(a), времени релаксации $\tau(b)$ для сигнала, рассеянного неоднородностями на высотах нижней ионосферы, а также скорости вертикального движения плазмы V(b)

сеянный сигнал, нельзя сравнить амплитуды и времена релаксации на конкретных высотах. В работе [30], посвящённой изучению заходно-восходных явлений в ионосфере методом рассеяния на искусственных неоднородностях, показана высотно-временная динамика амплитуды рассеянного сигнала при переходе от дневных к ночным условиям наблюдений и обратно, подобная наблюдавшейся во время затмения Солнца.

В течение часа вблизи максимальной фазы затмения наблюдалось расслоение области D. Ранее подобное расслоение обнаруживалось, как правило, в осенних и весенних экспериментах по диагностике ионосферы методом рассеяния на искусственных неоднородностях, и оно квалифицировалось авторами как сезонная особенность области D [25, 30]. Однако позднее подобное расслоение области D наблюдалось нами и в летних экспериментах, в том числе в предзаходные часы [29].

Одним из наиболее интересных результатов наблюдений искусственных периодических неоднородностей во время солнечного затмения может служить появление за час до затмения сигнала, рассеянного на высотах $84\div88$ км, как будто от дополнительного «слоя», что хорошо видно на рис. 4*a*. Время релаксации рассеянного от этого слоя сигнала в отдельных реализациях превышало $4\div5$ с (см. рис. 4*b*), хотя, как правило, время релаксации составляет $1\div2$ с. Природа этого рассеяния пока не ясна. Это могло быть как проявление летнего мезосферного эха, так и рассеяние пробных радиоволн низко лежащим спорадическим слоем $E_{\rm s}$, который на этих высотах в средних широтах наблюдается крайне редко [35–37].

Скорость вертикального движения, определённая по изменению фазы рассеянного сигнала,

изменялась по величине и направлению. Положительные значения скорости соответствуют движению вниз. Зависимость скорости от высоты и времени представлена на рис. 4*6*. Усреднённые за 15 мин значения скорости изменялись в интервале от -5 до +5 м/с. На высотах ниже 80 км скорость преимущественно была направлена вниз, в интервале высот от 80 до 100 км она была, в среднем, близка к нулю. Выше 100 км средние значения скорости возрастали со сменой направления, что могло обеспечить «сгонку» плазмы и образование спорадического слоя E_s за счёт перераспределения ионов в геомагнитном поле с учётом неоднородного ветра на высоте порядка 110 км [36, 37]. Во временны́х вариациях характеристик рассеянных сигналов и, особенно, в вариациях скорости вертикального движения плазмы зарегистрированы волновые движения с периодами, характерными для внутренних гравитационных волн.

На рис. 5 показана динамика высотных профилей амплитуды и времени релаксации рассеянного сигнала для получасовых сеансов измерений. Кривые соответствуют усреднённым за 30 мин значениям характеристик сигналов. Приведённое на каждой панели время отвечает середине интервала усреднения. Панели (a) и (b) на рис. 5 соответствуют времени до начала затмения, (e) и (г) — затмению, включая и время максимальной фазы, (d) и (e) — времени после окончания затмения. Отметим основные особенности высотных профилей амплитуды и времени релаксации. Наименьший разброс времён релаксации наблюдается, как обычно, в области E в интервале высот 100÷110 км. Значительный разброс значений времени релаксации имеет место в турбулентной области ниже 100 км и в области D. В профилях амплитуды отчётливо видно усиление рассеянного сигнала на $30\div40$ дБ в области E во время затмения и его появление на высотах мезопаузы. Хорошо видно также расслоение области D вблизи высоты 70 км (рис. 56, г). Дальнейшим этапом исследования влияния солнечного затмения на нижнюю ионосферу должно быть определение характеристик нейтральной атмосферы (температуры и плотности) по результатам измерений времени релаксации рассеянного сигнала на высотах E-слоя и моделирование временны́х зависимостей амплитуды и времени релаксации в D-области ионосферы.

выводы

Проведённые исследования нижней ионосферы во время двух солнечных затмений методами частичных отражений и рассеяния радиоволн искусственными периодическими неоднородностями электронной концентрации дают, на наш взгляд, полезную информацию для дальнейшего изучения влияния солнечных затмений на ионосферу. Отметим, что основные особенности изменения ионосферы, полученные по характеристикам сигналов, рассеянных естественными неоднородностями ионосферной плазмы, качественно соответствуют ранее проведённым исследованиям. В том числе, зарегистрировано уменьшение электронной концентрации в $3\div5$ раз в области D, обнаружено, что максимальное уменьшение электронной концентрации в нижней части этой области наступает практически в момент максимальной фазы затмения, а на высотах выше 85 км запаздывает на $22\div25$ мин, что обусловлено, вероятно, разными законами рекомбинации в нижней и верхней частях области D. Методом создания искусственных периодических неоднородностей наблюдалось расслоение области D вблизи момента максимальной фазы затмения. Характер вариаций амплитуды сигнала в области D соответствует переходу к состоянию ночной ионосферы.

Причина появления сигналов, рассеянных искусственными периодическими неоднородностями на высотах $84 \div 88$ км, пока достоверно не выяснена. Скорости вертикального движения плазмы изменялись в интервале от -5 до +5 м/с, направление менялось выше 100 км. Во временны́х вариациях характеристик рассеянных сигналов присутствуют волновые движения с периодами, присущими внутренним гравитационным волнам. Детальная обработка данных наблюдений



Рис. 5. Динамика высотных профилей амплитуды (точки) и времени релаксации (крестики) рассеянного сигнала для получасовых сеансов измерений. Кривые соответствуют усреднённым за 30 мин значениям характеристик сигналов. Приведённое на каждой панели время отвечает середине интервала усреднения. Панели (*a*) и (*б*) соответствуют времени до начала затмения, (*b*) и (*c*) — затмению, включая и время его максимальной фазы, (*d*) и (*e*) — времени после окончания затмения

позволит получить новые сведения о динамике нижней ионосферы во время таких природных явлений.

Н. В. Бахметьева, В. Н. Бубукина, В. Д. Вяхирев и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 13-05-00511, 15-15-0043, и 13-02-12074).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 1. С. 103.
- 2. Черногор Л. Ф. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе. Харьков: Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, 2013. 480 с.
- 3. Manju G., Sridharan R., Sudha Ravindran, et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 86. P. 56.
- 4. Rishbeth H. // Space Sci. Rev. 1968. V. 8. No. 4. P. 543.
- Huijun L., Libo L., Xinan Y., Weixing W. // J. Geophys. Res. 2008. V.113, No. A8. Art. no. A08309.
- 6. Madhav Haridas M.K., Manju G. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, No. A01. Art. no. A01302.
- Huijun L., Libo L., Xinan Y., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2009. V. 114, No. A07. Art. no. A07308.
- 8. Kane J. A. // Planet. Space Sci. 1969. V. 17, No. 4. P. 609.
- 9. Chandra H., Sharma S., Lele P. D., et al. // Earth Planets Space. 2007. V. 59, No. 1. P. 59.
- 10. Bamford R. A. // Phys. Chem. Earth (C). 2001. V. 26, No. 5. P. 373.
- Артемьева Г. М., Беликович В. В., Бенедиктов Е. А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1962. Т. 2, № 1. С. 58.
- 12. Bischoff K., Taubenheim J. // J. Atmos. Terr. Phys. 1967. V. 29, No. 9. P. 1063.
- Данилкин Н. П., Коченова Н. А., Свечников А. М. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1961. Т. 1, № 4. С. 612.
- Бенедиктов Е. А., Вяхирев В. Д., Гончаров Н. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 3. С. 348.
- Терещенко В. Д., Васильев Е. Б., Якимов М. В. и др. // Труды XVI-XIX Всерос. симпозиумов. Радиолокационное исследование природных сред. Вып. 2. С.-Петербург: ВИККА им. А. Ф. Можайского. 2001. С. 347.
- 16. Cohen E. A. // Radio Sci. 1984. V. 19, No. 3. P. 769.
- 17. Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., Lesyuta O. S., et al. // Ann. Geophys. 2001. V. 19, No. 7. P. 723.
- MacPherson B., Gonzalez S. A., Silzer M. P., et al. // J. Geophys. Res. 1998. V. 105, No. A10. P. 23 055.
- 19. Salan J. F., Oliver W. L., Foster J. C., et al. // J. Geophys. Res. 1986. V. 91, No. A2. P. 1651.
- 20. Sneva Y., Rupesh M. D., Dabas R. S., Gwal A. K. // Adv. Space Res. 2013. V. 51, No. 11. P. 2043.
- Babakhanov I. Y., Belinskaya A. Y., Bizin M. A., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 92. P. 1.
- 22. Ладынин А.В., Семаков Н.Н., Хомутов С.Ю. // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 3. С. 439.
- 23. Иванов В. А., Иванов Д. В., Рябова Н. В., Рябова М. И. // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. № 2 (1). С. 59.
- 24. Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г., Урядов В. П. // Гелиогеофизические исследования. 2015. Вып. 11. С. 53.
- 25. Беликович В. В., Гончаров Н. П. // Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т. 34, № 6. С. 84.
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачёва А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Нижний Новгород.: ИПФ РАН, 1999. 155 с.

- 27. Belrose J.S., Burke M.J., Coyne T.N.R., Rees J.E. // J. Geophys. Res. 1972. V.77, No. 25. P.4829.
- 28. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 22, вып. 10. С. 497.
- 29. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Каган Л. М., Понятов А. А.// Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 1. С. 16.
- 30. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 6. С. 502.
- 31. Бахметьева Н. В., Вяхирев В. Д., Калинина Е. Е., Комраков Г. П. // Труды XIX Научной конф. по радиофизике, Нижний Новгород, 11–15 мая 2015. С. 74.
- 32. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Егерев М. Н., Толмачёва А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9. С. 77.
- 33. Беликович В. В., Караштин А. Н., Комраков Г. П., Шлюгаев Ю. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43, № 1. С. 103.
- 34. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 256 с.
- Huuskonen A., Nygren T., Jalonen L., et.al., // J. Geophys. Res. Space Phys. 1988. V. 93, No. A12. P. 14603.
- 36. Whitehead J. D. // J. Atmos. Terr. Phys. 1989. V. 51, No. 5. P. 401.
- 37. Mathews J. D. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60, No. 4. P. 413.

Поступила в редакцию 14 июля 2015 г.; принята в печать 26 октября 2015 г.

RESPONSE OF THE LOWER IONOSPHERE TO THE PARTIAL SOLAR ECLIPSES OF AUGUST 1, 2008 AND MARCH 20, 2015 ACCORDING TO OBSERVATIONS OF THE RADIO-WAVE SCATTERING BY NATURAL AND ARTIFICIAL IRREGULARITIES OF THE IONOSPHERIC PLASMA

N. V. Bakhmetieva, V. N. Bubukina, V. D. Vyakhirev, E. E. Kalinina, and G. P. Komrakov

We present the results of observations of ionospheric responses to the partial solar eclipses on August 1, 2008 and March 20, 2015. The observations were performed by the method of partial reflections in the scattering of radio waves by natural irregularities in the D region and by the method of resonant scattering of radio waves by artificial periodic irregularities of the ionospheric plasma. Observations by the partial reflections method showed a three to fourfold decrease in the electron density in the D region. The ionospheric response at altitudes above 88 km is 20 to 25 min delayed with respect to the time of the maximum eclipse phase, while in the bottom D region the time delay is a few minutes. Variations in the characteristics of the signals scattered by artificial periodic irregularities, as well as velocities of the vertical motion of the plasma in the lower ionosphere during the solar eclipse were studied. A 30 to 40-dB increase in the scattered-signal amplitude during the eclipse in the E region, stratification of the D region, and the appearance of signals scattered at the mesopause altitudes were recorded.