

**ОСОБЕННОСТИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ
ВО ВРЕМЯ ЗАТМЕНИЙ СОЛНЦА И В ЗАХОДНО-ВОСХОДНЫЕ ЧАСЫ
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МЕТОДОМ ИПН ВБЛИЗИ НИЖНЕГО НОВГОРОДА
FEATURES OF EARTH'S LOWER IONOSPHERE DURING SOLAR ECLIPSE
AND SUNSET AND SUNRISE HOURS ACCORDING TO MEASUREMENTS
BY THE API METHOD NEAR NIZHNY NOVGOROD**

Н.В. Бахметьева

*Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru*

Г.И. Григорьев

*Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, grig19@list.ru*

И.Н. Жемьяков

*Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, ilia.zhem@yandex.ru*

Е.Е. Калинина

*Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, kalinina@nirfi.unn.ru*

А.А. Лисов

*Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, lisov@nirfi.unn.ru*

N.V. Bakhmetieva

*Radiophysical Research Institute
Lobachevsky State University,
Nizhny Novgorod, Russia, nv_bakhm@nirfi.unn.ru*

G.I. Grigoriev

*Radiophysical Research Institute
Lobachevsky State University,
Nizhny Novgorod, Russia, grig19@list.ru*

I.N. Zhemiyakov

*Radiophysical Research Institute
Lobachevsky State University,
Nizhny Novgorod, Russia, ilia.zhem@yandex.ru*

E.E. Kalinina

*Radiophysical Research Institute
Lobachevsky State University,
Nizhny Novgorod, Russia, kalinina@nirfi.unn.ru*

A.A. Lisov

*Radiophysical Research Institute
Lobachevsky State University,
Nizhny Novgorod, Russia, lisov@nirfi.unn.ru*

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований отклика нижней ионосферы Земли на частное солнечное затмение, которые проводились методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы. Неоднородности создавались в поле стоячей волны при отражении от ионосферы мощной радиоволны, создаваемой излучением в зенит передатчиками среднеширотного нагревного стенда СУРА. Во время локализации периодической структуры пробными радиоволнами при выполнении условия обратного рассеяния Вульфа—Брэгга принимался рассеянный сигнал, измерялись его амплитуда и фаза. После окончания воздействия на ионосферу ИПН постепенно исчезали (релаксировали). Исследованы вариации характеристик рассеянных сигналов. Во время затмения амплитуда рассеянного сигнала возрастала на 30–40 дБ, время релаксации — в 1.5–2.0 раза. В отдельных случаях наблюдалось расслоение амплитуды сигнала в D-области, обусловленное расслоением профиля электронной концентрации.

На основе анализа высотных профилей времени релаксации получены температура и плотность нейтральной компоненты, высота турбопаузы и тур-

Abstract. We present the results of experimental studies into the response of Earth's lower ionosphere to a partial solar eclipse. The studies have been carried out using the method of resonant scattering of radio waves by artificial periodic irregularities (APIs) in ionospheric plasma. The irregularities were created in the field of a standing wave when a powerful radio wave, generated by radiation to the zenith by transmitters of the mid-latitude SURA heating facility, was reflected from the ionosphere. During location of a periodic structure by probe radio waves when the Wolf—Bragg backscattering condition was met, a scattered signal was received and its amplitude and phase were measured. After the end of the impact on the ionosphere, the irregularities gradually disappeared (relaxed). We have examined variations in characteristics of scattered signals. During the eclipse, the scattered signal amplitude increased by 30–40 dB, and the relaxation time increased 1.5–2.0 times. In some cases, stratification of the signal amplitude in the D-region was observed due to stratification of the electron density profile. By analyzing altitude profiles of relaxation time, we obtained neutral component temperature and density, height of the turbopause, and turbulent velocity. The velocity of vertical regular motion of plasma at each height was measured from the

булентная скорость. Скорость вертикального регулярного движения плазмы на каждой высоте измерялась по временному изменению фазы рассеянного сигнала. По результатам измерения характеристик рассеянных сигналов во время четырех частных затмений получено уменьшение температуры нейтральной компоненты в среднем на 50–70 К. В вариациях температуры, вертикальной скорости плазмы, высоты турбопаузы наблюдались глубокие квазипериодические вариации с периодами от 15 мин до нескольких часов, характерными для распространения внутренних гравитационных волн. В высотных профилях температуры и скорости отмечались высотные изменения с масштабами от 5 до 30 км. Сравнение с результатами исследований нижней ионосферы в восходно-заходные часы показало идентичность ее реакции во время частного затмения и перехода к ночному режиму. По измерениям методом частичных отражений во время затмения 01.08.2008 наблюдалось уменьшение электронной концентрации в области D в 3–5 раз. Сделан вывод о значительном изменении во время затмения как ионизованной, так и нейтральной составляющих атмосферы на высотах нижней ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, плазма, нейтральная атмосфера, затмение Солнца, восход, заход, высокочастотный нагрев, искусственные периодические неоднородности, температура, вертикальная скорость, турбулентность, внутренние гравитационные волны, стенд СУРА.

time variation in the scattered signal phase. From the results of measurements of scattered signal characteristics during four partial eclipses, we have obtained that the neutral component temperature decreases, on average, by 50–70 K. Variations in the temperature, vertical plasma velocity, and turbopause level exhibited deep quasi-periodic variations with periods from 15 min to several hours, typical of internal gravity wave propagation. The vertical temperature and velocity profiles showed changes with altitude on scales ranging from 5 to 30 km. Comparison between the results of studies of the lower ionosphere during sunrise-sunset hours has revealed that its response during a partial eclipse and the transition to the night regime is identical. According to the measurements by the partial reflection method, during the August 01, 2008 eclipse there was a decrease in the electron density in the D-region 3–5 times. We have concluded that during the eclipse there was a significant change in both the ionized and neutral components of the atmosphere in the lower ionosphere.

Keywords: ionosphere, plasma, neutral atmosphere, solar eclipse, sunrise, sunset, high-frequency heating, artificial periodic irregularities, temperature, vertical velocity, turbulence, internal gravity waves, SURA facility.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечное затмение является одним из уникальных природных явлений, во время которого происходят комплексные изменения многих параметров атмосферы, ионосферы, плазмосферы, что позволяет исследовать разные процессы, происходящие в плазме и нейтральной атмосфере [Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Lei J. et al., 2018; Dang et al., 2018]. В период затмений изменяются свойства как нейтральной, так и ионизованной составляющих атмосферы. Во время затмения уменьшение потока солнечного излучения вызывает охлаждение атмосферы, уменьшение электронной концентрации N_e в D-, E- и F-областях и полного электронного содержания. Сотни работ посвящены исследованиям разных аспектов влияния солнечных затмений на околоземное космическое пространство. В работах [Rishbeth, 1968; Беликович и др., 2008; Huijun et al., 2009; Madhav, Manju, 2012; Ковалев и др., 2009; Черногор, 2013; Manju et al., 2012] приведена обширная библиография на эту тему. В работе [Ковалев и др., 2009] рассмотрено влияние солнечных затмений на ионосферную плазму по данным среднениротных станций вертикального зондирования за все время с начала ионосферных исследований в СССР и России. Обобщены результаты наблюдений ионосферы по данным Томской ионосферной станции во время 28 солнечных затмений с разными максимальными фазами с 1936 по 2007 г.

Получены количественные оценки изменения N_e в E- и F-областях во время солнечных затмений.

Традиционным методом вертикального зондирования на основе анализа ионограмм было обнаружено уменьшение N_e в F-слое ионосферы [Rishbeth, 1968]. Позднее были проведены измерения N_e на ракетах [Kane, 1969] с помощью радаров некогерентного рассеяния [Черногор, 2013; Panasenko et al., 2019], спутников DEMETER, TIMED-SABER, ICON [Wang et al., 2008; Barad et al., 2022], исследованы вариации поглощения КВ- и СДВ-радиоволн в нижней ионосфере радиоастрономическим методом на сети риометров [Bischoff, Taubenheim, 1967; Данилкин и др., 1961; Артемьева и др., 1962]. Уже первые ракетные измерения показали уменьшение N_e на порядок в D-области на высотах 70–90 км во время полного солнечного затмения [Kane, 1969]. Методом некогерентного рассеяния обнаружено уменьшение температуры электронов и изменение направления потока плазмы из плазмосферы [Черногор, 2013; Акимов и др., 2002; MacPherson et al., 2000; Salah et al., 1986].

Во время затмений в F-области происходил рост действующих высот отражений на 100 км и более с отставанием до получаса от времени наступления максимальной фазы затмения [Беликович и др., 2008; Chandra et al., 2007; Vamford, 2001]. Измерения N_e методом частичных отражений (ЧО) в период солнечного затмения 11.05.1975 с фазой 0.2 показали

уменьшение N_e на 15–30 % на высотах 75–80 км [Бенедиктов и др., 1978]. Также этим методом во время затмения обнаружено радиоэхо на мезосферных высотах — полярное мезосферное летнее эхо (polar mesospheric summer echo, PMSE) с временем жизни до 4 мин, которое авторы работы [Терещенко и др., 2001] связали с понижением температуры мезосферы. В ряде работ сообщается о внезапном усилении или появлении спорадического слоя E_s во время затмения [Sneva et al., 2013; Barad et al., 2022], появлении рассеянных отражений в F-области (явление F-spread), усилении рассеяния сигналов VHF- и HF-радаров [Chandra et al., 2007]. Во многих работах отмечаются изменения в геомагнитных вариациях (см., например, [Babakhanov et al., 2013; Ладынин и др., 2011]). Методом радиопросвечивания по результатам приема радиосигналов искусственных спутников Земли и глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС исследованы вариации полного электронного содержания [Afraimovich et al., 1998; Tsai, Liu, 1999; Cherniak, Zakharenkova, 2018]. В этих же исследованиях наблюдались внутренние гравитационные волны, генерируемые затмением подобно тому, как это происходит при прохождении терминатора (границы света и тени) через пункт наблюдения [Afraimovich et al., 2001; Акимов и др., 2002]. Методом ЛЧМ-зондирования на сети радиотрасс изучались вариации максимально наблюдаемых частот исследуемых радиолиний в периоды солнечных затмений, проводились модельные расчеты по исследованию отклика ионосферы на солнечное затмение [Урядов и др., 2000; Клименко и др., 2007; Иванов и др., 2012; Вертоградов и др., 2015].

Методы исследования ионосферы неуклонно совершенствуются, появляются новые, в том числе основанные на воздействии на ионосферу мощным высокочастотным радиоизлучением нагревных стендов. К ним относится, в частности, метод резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы, который зарекомендовал себя как эффективный метод исследований ионосферы и нейтральной атмосферы [Беликович и др., 1999а, б; Belikovich et al., 2002]. Первые результаты исследования D-области с помощью ИПН во время солнечного затмения 31.07.1981 с максимальной фазой 0.75 приведены в [Belikovich et al., 1986; Беликович, Гончаров, 1994]. Новые данные о реакции нижней ионосферы на солнечные затмения позволяют внести вклад в изучение ее аэрономии и динамики.

Целью настоящей работы является обобщение результатов наблюдений в среднеширотном пункте вблизи нагревного стенда СУРА (56.1° N, 46.1° E) эффектов четырех частных солнечных затмений в нижней ионосфере на основе анализа характеристик сигналов, рассеянных ИПН ионосферной плазмы.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В течение многих лет для исследования нижней ионосферы применяются методы, использующие

воздействие на нее мощным высокочастотным радиоизлучением. Одним из них является метод измерения ключевых параметров ионосферы и нейтральной атмосферы при возмущении ее мощными радиоволнами с созданием ИПН ионосферной плазмы. Метод, основанный на рассеянии пробных радиоволн на ИПН, позволяет проводить мониторинг состояния нижней ионосферы. В работе приведены результаты исследований ионосферы во время четырех частных затмений Солнца с 1999 по 2022 г. методом, использующим воздействие на ионосферу Земли излучением мощного нагревного стенда СУРА с созданием ИПН. Метод исследования ионосферы на основе создания ИПН подробно описан в [Беликович и др., 1999б; Belikovich et al. 2002; Bakhmetieva, Grigoriev, 2022]. Он основан на воздействии на ионосферу Земли мощным высокочастотным радиоизлучением с созданием под воздействием неравномерного нагрева плазмы в поле мощной стоячей волны квазипериодической структуры температуры и концентрации электронов с пространственным периодом Λ , равным половине длины λ мощной радиоволны. Зондирование ИПН пробными радиоволнами при выполнении условия обратного рассеяния Брэгга—Вульфа и прием рассеянных сигналов с помощью специализированной аппаратуры с регистрацией амплитуды и фазы позволяют определять порядка десяти важнейших характеристик ионосферы и нейтральной атмосферы. Рассеяние пробных радиоволн на ИПН обладает резонансными свойствами, т. е. обратно рассеянный сигнал появляется только в том случае, когда волны, рассеянные отдельными неоднородностями, складываются синфазно. Найдено, что для используемых в настоящее время частот воздействия на ионосферу 4–6 МГц и эффективной излучаемой мощности стенда до 120 МВт относительное возмущение N_e в неоднородностях может составлять $\Delta N/N \approx 10^{-4} - 10^{-3}$ в E-слое и $\Delta N/N \approx 10^{-3} - 10^{-2}$ в D-области. Благодаря резонансному характеру рассеяния отношение сигнал/шум в нижней ионосфере в эксперименте составляло 10–100 [Беликович и др., 1999б; Belikovich et al., 2002]. В настоящее время используются два метода создания ИПН — непрерывный и квазинепрерывный нагрев. В первом случае нагревный стенд включается на несколько секунд для создания ИПН (нагрев), а затем переводится в импульсный режим с излучением коротких импульсов длительностью 30 мкс (пауза). В результате амплитуда и фаза рассеянного сигнала измеряются в период паузы в работе нагревного стенда. Во втором случае во время нагрева делаются короткие паузы в 30 мс, во время которых излучается короткий диагностический импульс длительностью 20–30 мкс. В результате появляется возможность исследовать ионосферу не только во время релаксации неоднородностей, но и во время их развития [Bakhmetieva, Grigoriev, 2022; Бахметьева и др., 2023].

На рис. 1, а схематично показано создание ИПН при работе нагревного стенда СУРА в квазинепрерывном режиме и диагностика ионосферы пробными импульсами. На панели б (слева) показана зависимость амплитуды рассеянного сигнала от высоты

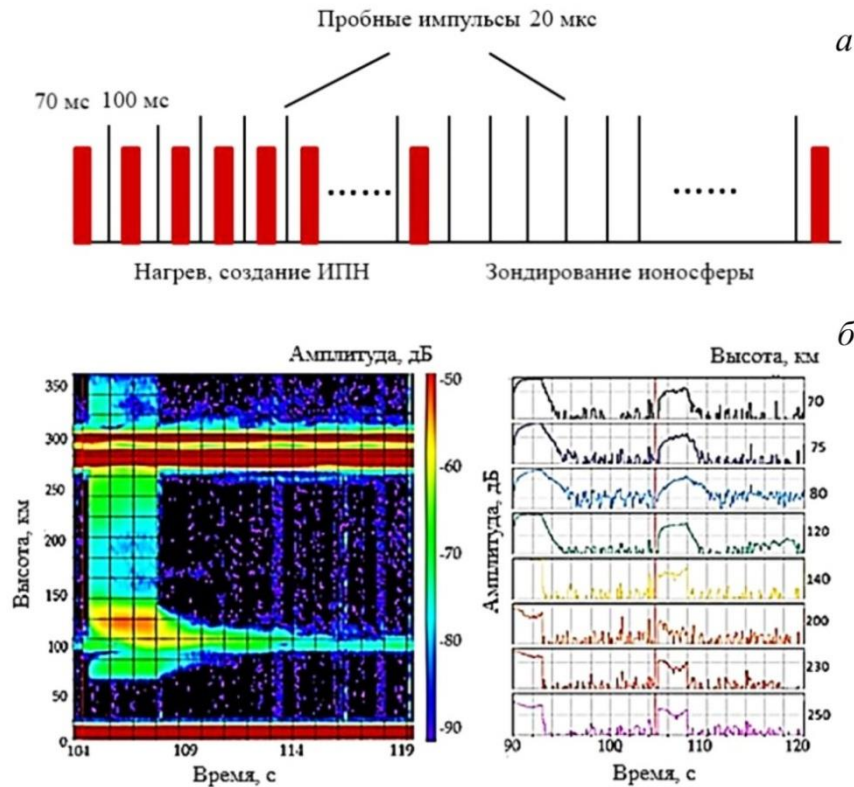


Рис. 1. Создание ИПН при работе нагревного стенда СУРА в квазинепрерывном режиме и диагностика ионосферы пробными импульсами (а); зависимость амплитуды рассеянного сигнала (б) от высоты и времени на стадии развития и релаксации неоднородностей в сеансе с началом в 16:03:12 25 октября 2022 г. продолжительностью 15 с (слева) и амплитуда сигнала на восьми высотах в D-области, E- и F-слоях (справа)

и времени во время развития и релаксации ИПН в сеансе 25 октября 2022 г. с началом в 16:03:12 LT продолжительностью 15 с. Амплитуда сигнала на восьми высотах в D-области, E- и F-слоях и межслоевой E–F-впадине показана справа. Подобная визуализация рассеянного сигнала в реальном времени на компьютере оператора позволяет в процессе эксперимента оперативно корректировать параметры излучения нагревного стенда и приемной установки.

Основными характеристиками сигналов, рассеянных неоднородностями, являются их амплитуда A , фаза φ принятого сигнала и время его релаксации τ по окончании воздействия на ионосферу, определяемое по уменьшению амплитуды в e раз. В монографиях [Беликович и др., 1999б; Belikovich et al., 2002] подробно описаны способы измерения ряда параметров ионосферы и нейтральной атмосферы и приведены примеры. Например, основой определения температуры и плотности нейтральной компоненты, уровня турбопаузы и скорости турбулентных движений является высотная зависимость времени релаксации рассеянного сигнала. Измерение его фазы позволяет непосредственно найти скорость регулярного вертикального движения плазмы, которая равна скорости нейтральной компоненты (скорости нейтрального ветра), так как на высотах нижней ионосферы плазма является пассивной примесью и движется вместе с нейтральной средой [Гершман, 1974].

В работе приведены и обсуждаются результаты исследования нижней ионосферы во время четырех частных затмений Солнца. Методика воздействия на ионосферу состояла в применении как непрерывного, так и квазинепрерывного нагрева. В разных экспериментах отличались частоты воздействия на ионосферу, излучаемая мощность, поляризация мощной радиоволны. Обработка полученных первичных данных проводилась по единому алгоритму. Соответствующие ссылки приводятся по тексту статьи.

Создание ИПН осуществлялось излучением передатчиками стенда СУРА (56.13° N; 46.10° E, п. Васильсурск) в зенит мощной радиоволны, как правило необыкновенной поляризации на частотах 4.30, 4.75 или 5.60 МГц. Приемный пункт был размещен на расстоянии 1 км от нагревного стенда. Общие характеристики четырех затмений даны в табл. 1. Все эти затмения с близкими значениями магнитуды максимальной фазы происходили в послеполуденные часы по московскому времени в периоды преимущественно низкой геомагнитной активности. Затмения 11.08.1999, 20.03.2015 и 25.10.2022 проходили на фазе роста солнечной активности, а затмение 01.08.2008 — в год ее минимума.

Указаны дата и время начала затмения T_1 , максимальной фазы T_2 , окончания T_3 , а также гелиогеофизические параметры в этот период: число солнечных пятен W , поток радиоизлучения $F10.7$, геомагнитные индексы K_p и A_p [<http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>].

Таблица 1

Дата	ЛТ			Фаза затмения	W	F10.7, с.е.п.	K _p	A _p , нТл
	T ₁	T ₂	T ₃					
11.08.1999	14:07	15:15	16:21	0.608	97.3	1708	1–2	4–7
01.08.2008	13:07	14:15	15:21	0.653	0.5	663	0–1	4
20.03.2015	12:22	13:34	14:36	0.618	64	1263	3	22
25.10.2022	12:30	13:44	14:57	0.757	59.2	1194	1	3

Часть приведенных результатов обсуждалась в работах [Бахметьева и др., 2016, 2017]. В период наблюдений всегда работали ионозонды «Базис» и SADI. На время регистрации ионограммы стенд СУРА выключался. Кроме того, дополнительно использовались данные ионозонда «Парус» (ИЗМИРАН), находящиеся в открытом доступе [<https://www.izmiran.ru/ionosphere/moscow/>].

2. ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ И НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ЗАТМЕНИЙ СОЛНЦА

Приведем основные результаты исследования нижней ионосферы, полученные методом ИПН, для каждого затмения. Особое внимание было уделено исследованию вариаций нейтральной компоненты.

Затмение 11.08.1999

Частное солнечное затмение в районе п. Васильсурск началось в 14:07 ЛТ, достигло максимальной фазы 0.608 в 15:15 ЛТ и завершилось в 16:21 ЛТ (ЛТ=УТ+4). Затмение проходило на фоне высокой солнечной активности, геомагнитное поле было слабо возмущенным, K_p=1–2. Эксперименты проводились с 10 по 12 августа 1999 г. с 9 до 17 ЛТ. Критические частоты F-слоя в эти дни изменялись от 6.6 до 7.7 МГц в начале измерений, уменьшаясь до 5.6–6.5 МГц к 17:00 ЛТ. В день затмения 11.08.1999 через 10 мин после его начала частоты f_oF2 стали падать, достигнув минимальных значений 6.0 МГц к моменту начала максимальной фазы, и в течение 20 мин оставались постоянными. После прохождения максимальной фазы затмения состояние F-области постепенно восстановилось. Соответствующее уменьшение N_e в максимуме F-слоя составило 26 %. В контрольные дни изменение f_oF2 соответствовало обычному дневному суточному ходу. Для E-слоя f_oE=3.6–3.8 МГц. Во время максимальной фазы f_oE, равная 3.7 МГц в часы до затмения, снизилась на 0.8–0.9 МГц. Слой E_s с f_oE_s=4–4.5 МГц, которая эпизодически возрастала до 6–8 МГц, наблюдался в эти дни практически постоянно.

При непрерывном нагреве каждый сеанс измерений продолжался 15–20 с. В течение первых 3 с осуществлялся нагрев ионосферы радиоволной необыкновенной поляризации на частоте f=5.75 МГц с эффективной мощностью 130 МВт 10.08.1999 и 60 МВт в последующие дни. За трехсекундным нагревом следовала пауза 12–17 с, во время которой излучались пробные импульсы той же частоты длительностью 20–50 мкс и частотой повторения 50–

100 Гц. Регистрировались квадратурные составляющие рассеянного сигнала, по которым определялись его амплитуда и фаза.

Характеристики рассеянного сигнала

В период частного затмения Солнца 11.08.1999 наблюдалась сложная неоднородная структура рассеянных сигналов. На рис. 2 показаны примеры высоотно-временных вариаций амплитуды рассеянного сигнала в день затмения 11.08.1999 (а) и на следующий день 12.08.1999 (б). Показан характерный вид рассеянных сигналов в D-области на высотах 57–85 км и в E-слое на высотах 90–140 км. Видно, что во время затмения в E-слое появляется ярко выраженная турбулизация рассеянного сигнала. Это выражается в том, что на высоотно-временных регистрациях амплитуды рассеянного сигнала, подобных приведенным на рис. 2, появляются расслоения на высотах E-слоя и верхней части D-области, связанные, как отмечается в монографиях [Беликович и др., 19996; Belikovich et al., 2002], с расслоениями в высоотно-профиле N_e(h). Эти расслоения могут быть природными, что неоднократно наблюдалось нами в экспериментах по исследованию ионосферы методами ЧО и ИПН. Кроме расслоений профиля N_e(h), такой вид сигналов может быть связан с интерференцией сигналов, рассеянных ИПН, спорадическими слоями и крупномасштабными неоднородностями естественного происхождения. В результате фаза принимаемого сигнала может быть заметно искажена, что затрудняет, а иногда делает невозможным измерение скорости вертикального движения плазмы и соответственно нейтральной компоненты [Беликович и др., 19996; Belikovich et al., 2002]. Амплитуда рассеянного сигнала в D- и E-областях во время затмения выросла на 15–20 дБ по сравнению с предыдущим днем. На рис. 2, б показан также пример развития слоя E_s на высотах 134–137 км в сеансе 16:06:14 и на высотах 112–123 км в сеансе 14:10:13 в день после затмения 12.08.1999. Отметим, что метод, основанный на резонансном рассеянии пробных радиоволн на ИПН, позволяет регистрировать самые слабые спорадические слои, недоступные ионозондам [Kagan et al., 2005; Бахметьева и др., 2010].

В период затмения часто наблюдалась и естественная крупномасштабная турбулентность в мезосфере, и интенсивные отражения в интервале действующих высот 125–140 км от полупрозрачного слоя E_s толщиной 5–15 км. Выше максимума E-слоя на высотах 130–140 км иногда наблюдались отражения, представляющие собой рассеянный сигнал от слабого полупрозрачного слоя E_s (см. рис. 2, б для 12.08.1999, время начала сеанса 16:06:14).

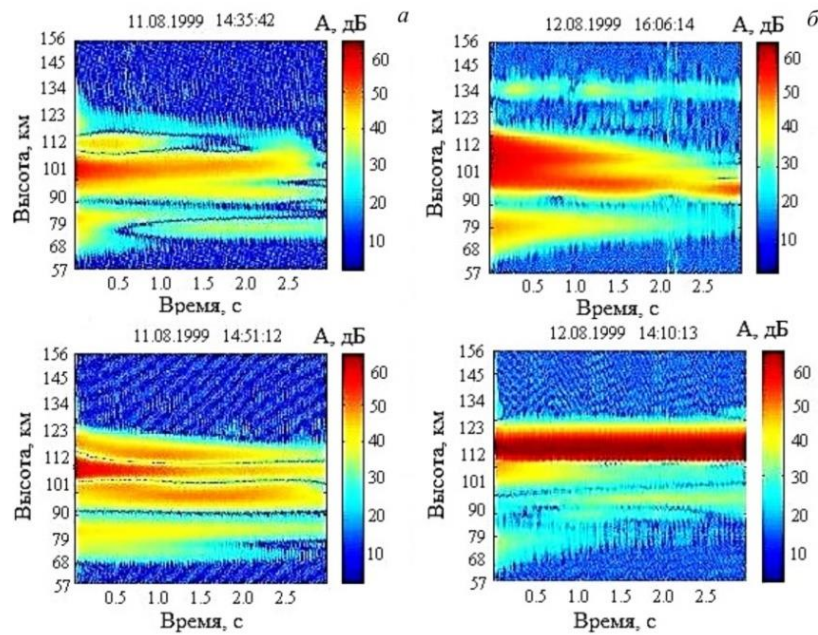


Рис. 2. Высотно-временные вариации амплитуды рассеянного сигнала в день затмения 11.08.1999 (а) и на следующий день 12.08.1999 (б). Показана турбулизация нижней ионосферы во время затмения 11.08.1999 и развитие слоя E_s на высотах 134–137 км и 112–123 км 12.08.1999

Температура нейтральной атмосферы

Во время затмения должно происходить охлаждение атмосферы и температура термосферы должна понижаться. Температура нейтральной компоненты определялась по высотной зависимости времени релаксации в соответствии с алгоритмом [Tolmacheva, Belikovich, 2004]. На рис. 3 показаны вариации температуры в день затмения 11.08.1999 с 13:30 до 16:30 LT на высотах 101–103 км. Каждое значение температуры получено усреднением за 10 мин и отнесено к началу временного интервала. Во время затмения температура на этих высотах, относящихся к нижней термосфере, понизилась в среднем на 50–70 К. В день затмения понижение температуры нейтральной компоненты маскировалось интенсивной волновой активностью. Это обстоятельство приходится принимать во внимание при анализе влияния затмения на температурный режим термосферы. В этот день наблюдались сильные вариации температуры с периодами 120, 60 и 20 мин, обусловленные распространением внутренних гравитационных волн (ВГВ) [Tolmacheva, Belikovich, 2004]. Однако результаты измерений методом ИПН в контрольные дни 10.08.1999 и 12.10.1999 показали, что ВГВ тех же периодов наблюдались в течение всего трехдневного цикла измерений. Отметим, что нерегулярные явления в ионосфере затрудняют определение температуры нейтральной атмосферы методом ИПН. Положительным моментом является уменьшение во время затмения поглощения как мощной волны, создающей неоднородности, так и пробной (зондирующей), что обеспечивает рост амплитуды рассеянного сигнала и уменьшает погрешность измерения температуры, которая в обычных условиях не превышает 10–15 % [Беликович и др.,

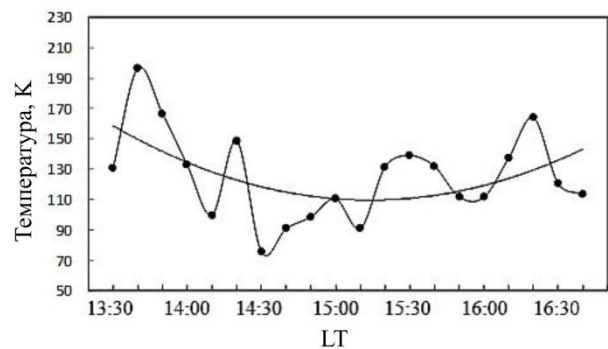


Рис. 3. Вариации температуры в день затмения 11.08.1999 с 13:30 до 16:30 LT на высоте 101–103 км. Каждая точка получена усреднением за 10 мин и отнесена к началу временного интервала. Нанесена также линия полиномиального тренда 2 порядка. Во время затмения температура понизилась в среднем на 50–70 К

1999; Belikovich et al., 2002; Tolmacheva, Belikovich, 2004]. В работе [Tolmacheva, Belikovich, 2004] приведены результаты определения плотности атмосферы на высотах 106 и 108 км с 10 до 17 LT за 10–12 августа 1999 г. Показано, что в день затмения и в последующие дни наблюдались вариации плотности с периодами 60 мин и относительными вариациями параметров 17–25 %. Генерация атмосферных волн во время затмения хорошо известна и неоднократно наблюдалась разными методами [Черногор, 2013; Dang et al., 2018; Panasenkov et al., 2019; Бахметьева и др., 2021].

В этот же период 11.08.1999 во Франции, где солнечное затмение было полным, были проведены измерения вариаций атмосферного давления на земле и N_e в ионосфере. Получены данные станций микробарографов и сети ионозондов. Измерения показали

волнообразные вариации давления, которые авторы связали с генерацией ВГВ предполагаемым источником в нижних слоях атмосферы и в термосфере. В нижней атмосфере период волн составил 12 мин, а на высотах термосферы — ~60 мин [Farges et al., 2003].

Высотные профили и временные изменения вертикальной скорости плазмы обнаруживали глубокие и быстрые вариации от сеанса к сеансу длительностью 20 с. На высотах E-слоя скорость изменялась от -10 до +8 м/с (отрицательные значения соответствуют движению вверх). Наибольшие колебания мгновенных значений скорости наблюдались на высотах 90–110 км, там же во многих сеансах происходила смена знака скорости, т. е. направления движения плазмы с возможностью образования слоя E_s [Гершман, 1974; Whitehead, 1989; Mathews, 1998]. В [Бахметьева и др., 2001] приведены значения высотного градиента вертикальной скорости от 10⁻⁴ до 8·10⁻³ с⁻¹, достаточные для «сгонки» плазмы и образования слоя E_s за счет перераспределения ионизации под действием ветра [Гершман и др., 1976].

Затмение 01.08.2008

Частное солнечное затмение в районе п. Васильсурск началось в 13:07 LT, имело максимальную магнитуду 0.653 в 14:15 и закончилось в 15:21. Исследования состояния ионосферы проводились с 30 июля по 2 августа 2008 г. одновременно двумя методами: методом ЧО с регистрацией характеристик сигналов, рассеянных естественными неоднородностями D-области, и методом создания ИПН с измерением амплитуды и фазы рассеянных ими сигналов [Бахметьева и др., 2016]. В эти дни геомагнитных возмущений не отмечалось, K_p ≤ 1. По данным ионозонда f₀E = 2.8 ÷ 3.3 МГц, f₀F1 = 3.4 ÷ 4 МГц и f₀F2 = 4.5 ÷ 4.9 МГц на фоне минимума солнечной активности. Наблюдался слой E_s с частотой экранирования 2.8 МГц и предельной частотой отражений до 3.5 МГц.

Уникальность этого эксперимента состояла в том, что ежеминутно в течение 10 с проводилась регистрация сигналов, рассеянных ИПН, а в последующие 50 с регистрировались сигналы частичных отражений от естественных неоднородностей области D. Передатчик установки частичных отражений работал на частоте 2.95 МГц, принимались обе магнитоионные компоненты рассеянного сигнала от неоднородностей D-области. ИПН создавались излучением передатчиками стенда СУРА радиоволн необыкновенной поляризации на частоте 4.7 МГц с эффективной мощностью 80 МВт. В результате методом ЧО получены высотные профили N_e в D-области ионосферы на высотах 70–85 км, методика измерений подробно изложена в [Беликович и др., 2003a, 2008]. Методом ИПН получены высотно-временные зависимости амплитуды, времени релаксации и фазы рассеянного сигнала, скорости вертикального движения плазмы на высотах 60–120 км. Комбинация методов ЧО и ИПН позволила охватить практически весь высотный интервал нижней ионосферы. Анализировались высотно-временные вариации сигналов, рассеянных естественными неоднородностями, их

изменения, коррелирующие с прохождением лунной тени по диску Солнца. Некоторые результаты этих измерений приведены в [Бахметьева и др., 2017].

Нижняя ионосфера во время затмения 01.08.2008

Визуализация измерений дает наглядное представление об изменении состояния ионосферы во время затмения. На рис. 4, взятом из [Бахметьева и др., 2017], показаны высотно-временные зависимости амплитуды сигналов обыкновенной (верхняя панель) и необыкновенной (средняя панель) пробных радиоволн с частотой 2.95 МГц, рассеянных естественными неоднородностями N_e D-области и зеркально отраженных сигналов от ионосферных слоев. На нижней панели показаны вариации амплитуды радиоволн необыкновенной поляризации с частотой 4.7 МГц, рассеянных ИПН. Стрелками отмечены времена начала, максимальной фазы и окончания затмения. На верхней и средней панелях видны рассеянные сигналы частичных отражений в области D в интервале высот 70–95 км. Обыкновенная волна вначале отражалась на высотах от 100 км до 150 км, при этом имели место кратные отражения от E- и F-слоев. В течение всего периода измерений наблюдался слой E_s. Во время затмения приблизительно на 20 км увеличилась действующая высота отражения необыкновенной волны в слое E, а обыкновенная радиоволна постепенно стала отражаться в F-слое на высотах ≥ 250 км.

В D-области N_e определялась методом дифференциального поглощения [Беликович и др., 2003a]. В результате получено, что во время затмения N_e в D-области уменьшилась в 3–5 раз. Показано также, что N_e в нижней части D-области достигает минимальных значений практически в момент максимальной фазы затмения, а выше 85–90 км запаздывает на 22–25 мин, что может быть обусловлено [Беликович и др., 2003a] разными законами рекомбинации в нижней и верхней частях D-области. Наряду с этим наблюдались волнообразные изменения N_e с ярко выраженным периодом 45 мин, а на ионограммах вертикального зондирования были видны следы перемещающихся возмущений. Отметим, что результаты измерений методом ЧО во время затмения 01.08.2008 в целом хорошо согласуются с результатами одновременных наблюдений методом ЧО частного солнечного затмения 29.03.2006 с максимальной фазой 0.696 в средних (п. Васильсурск) и высоких (п. Лопарская) широтах [Беликович и др., 2003a, 2008].

Методом ИПН интенсивные рассеянные сигналы регистрировались начиная с 70 км в D-, E- и F-областях. С развитием затмения амплитуда сигнала, рассеянного неоднородностями, постепенно уменьшалась и образование ИПН прекратилось через 45 мин после начала затмения еще до наступления его максимальной фазы (см. рис. 4). Это объясняется тем, что необыкновенная компонента мощной волны частотой 4.7 МГц, излучение которой создавало неоднородности, перестала отражаться от ионосферы в результате общего уменьшения N_e и, как следствие, уменьшения f₀F2 до 3.0–3.2 МГц. В результате исследовать вариации амплитуды и времени релаксации сигнала, рассеянного неоднородностями, а также

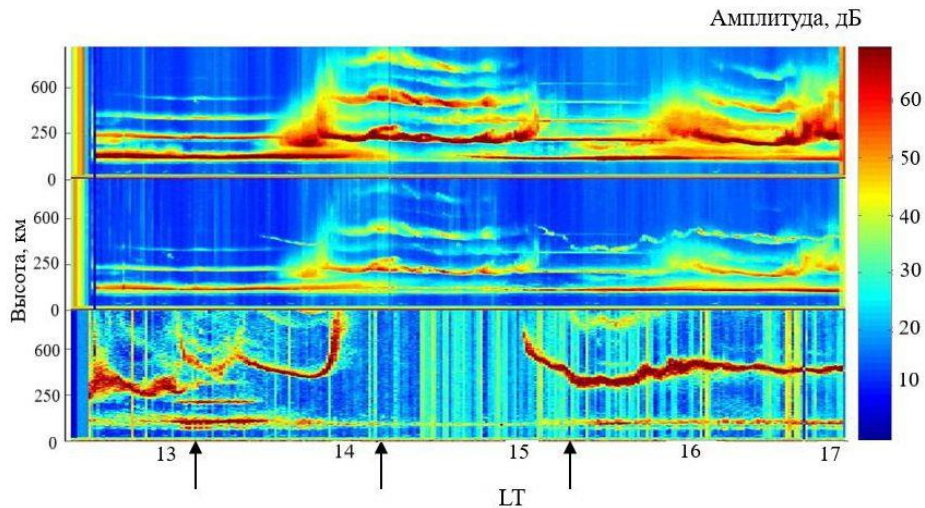


Рис. 4. Реакция ионосферы на частное затмение Солнца 01.08.2008 при комплексной регистрации рассеянных сигналов методом частичных отражений и методом резонансного рассеяния на ИПН. Верхняя и средняя панели — рассеянный сигнал от D-области на частоте 2.95 МГц для обыкновенной и необыкновенной мод соответственно; нижняя панель — рассеянный сигнал от ИПН на частоте 4.7 МГц

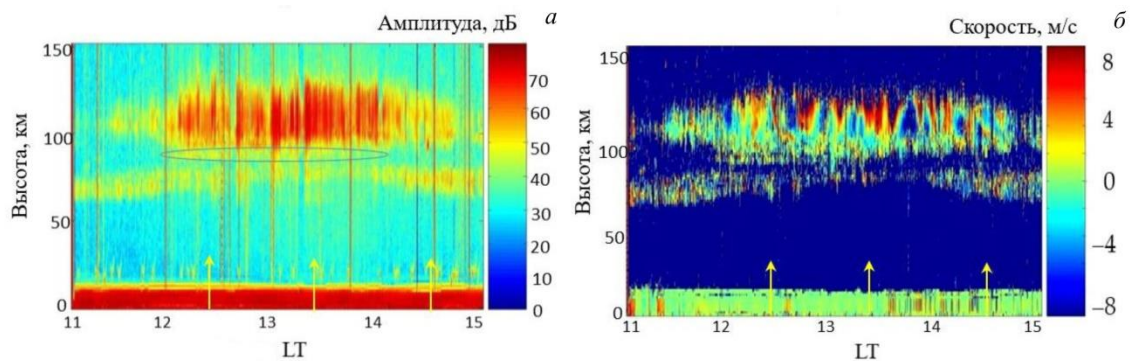


Рис. 5. Высотно-временная зависимость амплитуды рассеянного сигнала (а) и скорости вертикального движения плазмы (б), в D- и E-областях ионосферы во время частного затмения Солнца 20.03.2015

определить температуру атмосферы и скорость плазмы во время затмения не удалось вследствие влияния природных факторов. За 20 мин до окончания затмения появились отражения от слоя F2, а еще через 7 мин — сигналы, рассеянные ИПН в D- и E-областях.

Измерения фазы рассеянного сигнала показали, что до и после затмения наблюдались вариации вертикальной скорости плазмы до 10 м/с с периодами, характерными для ВГВ.

Затмение 20.03.2015

Частное солнечное затмение 20.03.2015 происходило с 12:22 до 14:36 с максимальной фазой 0.618 в 13:34 по московскому зимнему времени (LT=UT+3). Исследования ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН проводились с 16 по 21 марта с 10 до 16 LT. В это время наблюдался рост геомагнитной активности с развитием к полудню 17.03.2015 магнитной бури планетарного масштаба с K_p до 8 единиц. Магнитной буре предшествовала вспышка на Солнце 15.03.2015, сопровождавшаяся большим выбросом корональной массы. Магнитная буря продолжалась более суток, а 19.03.2015 магнитная активность вернулась к состо-

янию, предшествовавшему буре, с $K_p=1\div3$. В день затмения повышались f_oF2 до 9 МГц, f_oF1 до 4.7 МГц и f_oE до 3.5 МГц. На высоте ~100 км регистрировался слой E_s с предельной частотой отражения до 3.5–4.0 МГц. В период измерений на ионограммах вертикального зондирования были зарегистрированы множественные перемещающиеся возмущения.

На рис. 5, а, б показана высотно-временная зависимость амплитуды сигнала, рассеянного неоднородностями, и скорости вертикального движения плазмы на высотах нижней ионосферы. Показаны рассеянные сигналы от ИПН в области D на высотах 65–86 км, в области E (90–130 км), сигналы от слоя E_s (100–115 км). Приблизительно за час до затмения появились рассеянные сигналы на высотах 84–88 км, которые до этого не наблюдались. Хорошо видно расширение высотного интервала рассеянных сигналов (интервала образования ИПН) в E-слое и подъем начальной высоты регистрации сигнала в D-области.

Особенности высотно-временных вариаций амплитуды и времени релаксации рассеянных сигналов

С течением времени во время затмения амплитуда рассеянного сигнала выросла в E-слое на 30–40 дБ.

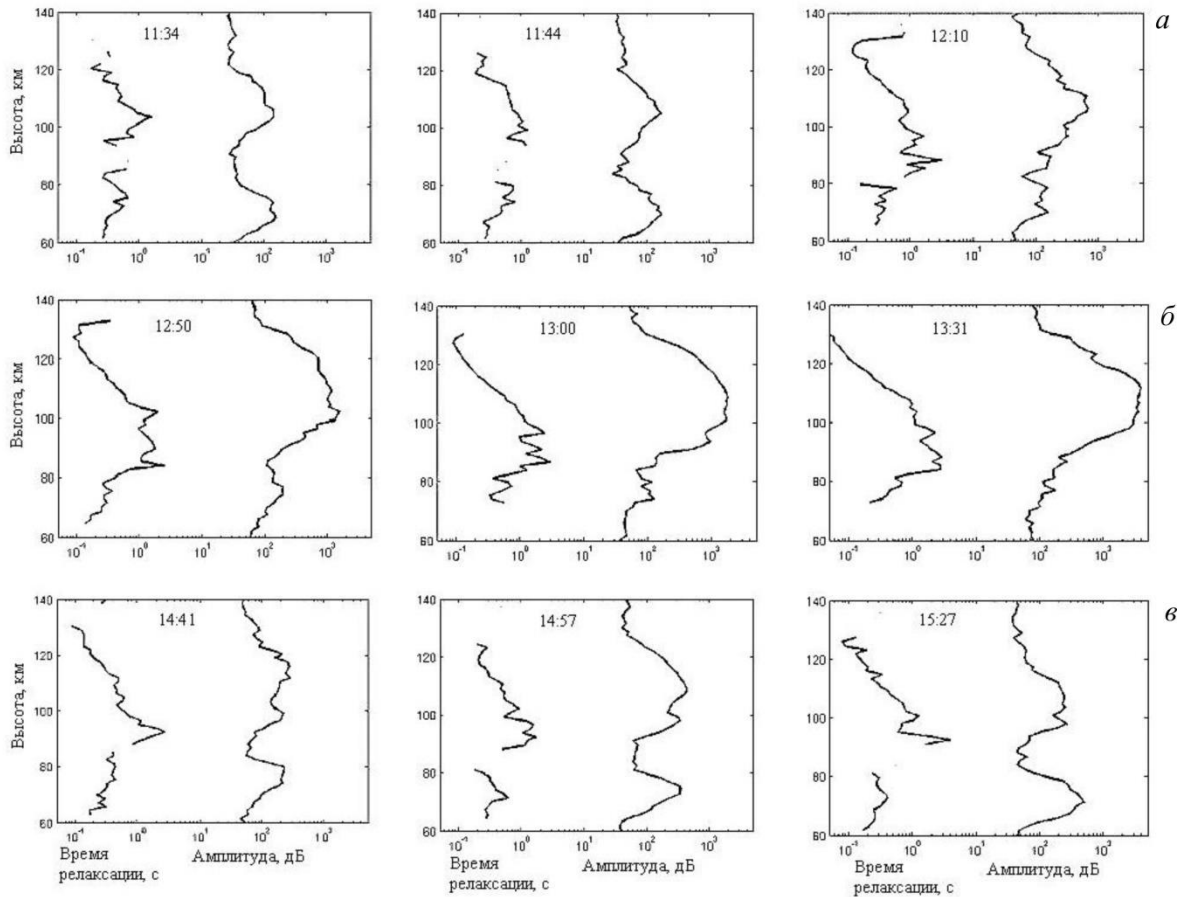


Рис. 6. Высотные профили амплитуды (правые кривые на панелях) и времени релаксации (левые кривые) рассеянного сигнала в день затмения 20.03.2015: до начала затмения (а); около максимальной фазы (б) и после окончания затмения (в), полученные усреднением по 5-минутному интервалу. Во время затмения отмечался рост амплитуды рассеянного сигнала в E-слое и времени релаксации в D-области

Рост амплитуды, начавшийся примерно за час до затмения, значительно усилился во время него. Наиболее вероятной причиной этого является уменьшение поглощения из-за общего понижения N_e при уменьшении ионизирующего излучения Солнца. Постепенно сигналы, рассеянные ИПН в E-слое, стали занимать все больший диапазон высот. Этот же эффект виден на рис. 6, на котором показано изменение со временем усредненных высотных профилей амплитуды и времени релаксации сигнала, рассеянного ИПН, для девяти пятиминутных сеансов измерений в день затмения 20.03.2015. Профили получены усреднением данных по 5-минутному интервалу. Отмечается рост амплитуды рассеянного сигнала в E-слое и рост времени релаксации в D-области. Такое изменение во времени амплитуд рассеянных сигналов в D-области соответствует постепенному переходу к ночному режиму ионосферы аналогично заходно-восходным явлениям [Беликович, Бенедиктов, 1986, 2002; Беликович и др., 2000; Бахметьева и др., 2005]. Отметим также, что рассеянные сигналы в D-области в начале наблюдений и после окончания затмения часто имели амплитуду, большую, чем сигналы, рассеянные неоднородностями E-слоя, хотя, как правило, в D-области рассеянные сигналы имеют амплитуду на 20–30 дБ меньше. Кроме

того, нижняя граница образования ИПН в области D во время затмения повышалась, что соответствует изменению высотного профиля N_e [Беликович и др., 19996; Belikovitch et al., 2002]. На профилях средней панели рис. 6 виден подъем нижней границы D-области и появление рассеянного сигнала на высотах 84–88 км. В течение часа вблизи максимальной фазы затмения наблюдалось «расслоение» амплитуды рассеянного сигнала в D-области. Подобный эффект наблюдался в предзаходные часы 15.06.2001 и был связан с расслоением профиля N_e [Беликович и др., 19996; Belikovitch et al., 2002; Беликович, Бенедиктов, 2002].

Во время затмения возрастали амплитуда и время релаксации рассеянного сигнала. На рис. 7 показаны зависимости от времени амплитуды (сплошная линия) и времени релаксации (штриховая) рассеянного сигнала для высот 88 км (а) и 100 км (б). Виден значительный рост амплитуды рассеянного сигнала во время затмения (30–40 дБ в E-слое и до 20 дБ в области D). Наибольший рост амплитуды отмечался вблизи максимальной фазы. Время релаксации рассеянного сигнала увеличилось приблизительно в 1.5–2 раза.

Важным ионосферным эффектом во время затмения было появление за час до него рассеянного сигнала

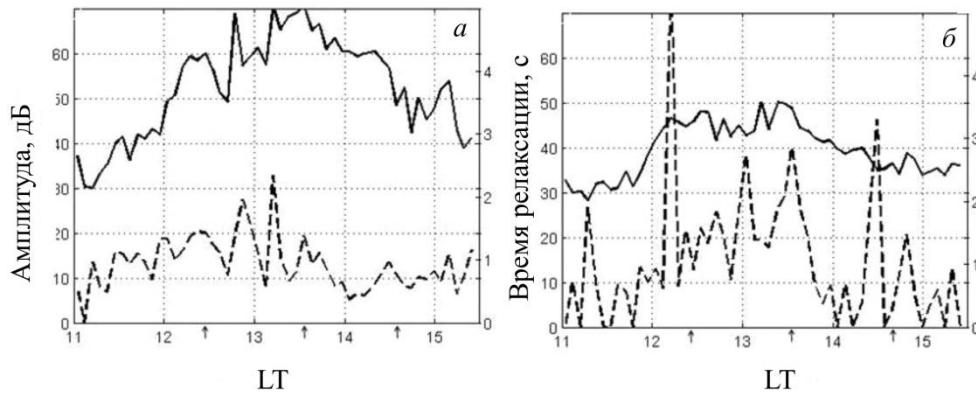


Рис. 7. Зависимости от времени амплитуды (сплошная линия) и времени релаксации (штриховая) рассеянного сигнала для действующих высот 88 км (а) и 100 км (б) во время частного затмения Солнца 20.03.2015. Фазы затмения указаны стрелками. Виден значительный рост амплитуды рассеянного сигнала во время затмения, который в Е-области составил 30–40 дБ от уровня начала наблюдений и 20–30 дБ непосредственно во время затмения

на высотах 84–88 км, что хорошо видно на рис. 5, 6. Появившийся на этих высотах рассеянный сигнал сравнительно медленно релаксировал — время релаксации в отдельных реализациях превышало 4–5 с против обычных 1–2 с, характерных для D-области [Беликович и др., 1999б; Belikovich et al., 2002]. Можно предположительно назвать несколько причин появления этого редко наблюдавшегося сигнала. Одной из них может быть появление летнего мезосферного эха вследствие понижения температуры нейтральной атмосферы (см. ниже). Летние мезосферные эха в средних широтах возникают гораздо реже, чем в полярных регионах. Можно отметить работы [Thomas et al., 1992; Karashtin et al., 1997 и ссылки в них]. В [Беликович и др., 2003б] сообщается о первых одновременных наблюдениях летней мезосферы 13.08.1999, т. е. через день после частного затмения Солнца при двухчастотном зондировании на частотах 2.95 МГц и 9.9 МГц с высотным разрешением порядка 3 км. В этих экспериментах были зарегистрированы мезосферные радиоэха с высот 75–85 км.

Другая возможная причина связана с ослаблением влияния атомарного кислорода на образование ИПН выше 80 км. Согласно теории образования ИПН, отсутствия рассеянного сигнала в верхней части D-области, что, как правило, имеет место в экспериментах, связанных с созданием ИПН, обусловлено прекращением действия механизма их образования вследствие роста концентрации атомарного кислорода. Показано [Беликович и др., 1999а, б; Belikovich et al., 2002], что в D-области квазипериодические неоднородности образуются вследствие зависимости коэффициента прилипания электронов к молекулам кислорода от температуры электронов. При росте последней коэффициент прилипания растет, что приводит к понижению N_c в пучностях стоячей волны и росту концентрации отрицательных ионов. Во время затмения структура D-области может значительно меняться, так как изменяются скорости процессов отлипания электронов от ионов. Рост времени релаксации рассеянного сигнала в 1.5–2 раза во время затмения можно объяснить соответствующим умень-

шением скорости отлипания электронов от ионов молекулярного кислорода [Беликович и др., 1999б; Belikovich et al., 2002]. Моделирование этого процесса для периодов захода и восхода Солнца проведено в [Беликович и др., 2000; Беликович, Бенедиктов, 2002]. Аналогичный процесс происходит во время затмения. В работе [Bakhmetieva et al., 2020] зависимость времени релаксации рассеянного сигнала от высоты была использована для нахождения нижней границы появления атомарного кислорода. Для 20.03.2015 эта высота изменялась от 80 до 84 км до и после затмения. Во время затмения ИПН наблюдались практически во всей D-области.

Вариации температуры нейтральной атмосферы и скорости плазмы

Разработанный на основе создания ИПН способ определения температуры и плотности нейтральной компоненты позволяет получать данные об этих параметрах на высотах нижней термосферы 90–130 км, а скорость измеряется начиная с высот 60 км [Беликович и др., 1999б; Tolmacheva, Belikovich, 2004; Бахметьева, Жемаков, 2022]. На рис. 8, а показаны зависимости от времени температуры и плотности на высоте 100 км во время частного затмения Солнца 20.03.2015. Видны глубокие вариации температуры и ее уменьшение во время затмения, когда она снизилась в среднем на 100 К и восстановилась до прежних значений к моменту окончания затмения, испытывая при этом глубокие квазипериодические вариации. Отметим также высокую корреляцию изменений температуры и плотности нейтральной компоненты.

В отличие от рис. 5, на котором скорость вертикального движения показана в координатах высота — время, на рис. 8, б вариации скорости показаны на высотах 100, 110 и 115 км. Вертикальная скорость постоянно изменялась по величине и направлению. Характерны глубокие вариации скорости от –3 до +3 м/с (положительные значения скорости соответствуют движению вниз). Видно, что колебания скорости нарастают и достигают наибольшего размаха вблизи максимальной фазы затмения. Особенно

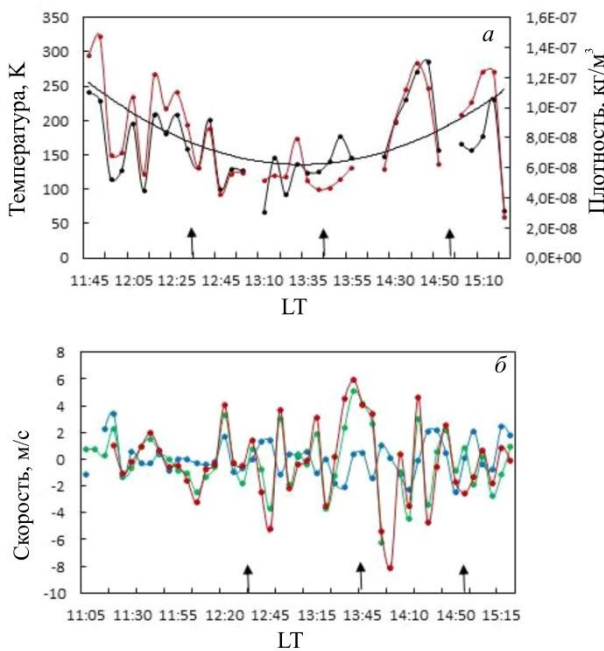


Рис. 8. Вариации температуры (красные точки), плотности нейтральной атмосферы (черные) на высоте 100 км и полиномиальный тренд 2-го порядка, позволяющий судить о средних изменениях температуры (а); скорость вертикального движения плазмы (б) на высоте 100 (красные точки), 110 (синие), 115 км (зеленые точки) во время частного затмения Солнца 20.03.2015 [Bakhmetieva et al., 2020]

глубокие вариации скорости от -8 до $+6$ м/с с периодами 15–60 мин наблюдались на высотах 100 и 110 км. На высоте 100 км значения скорости возрастали и меняли направление, что могло обеспечить сгонку плазмы и образование слоя E_s за счет перераспределения ионов в геомагнитном поле с учетом неоднородного ветра [Гершман, 1974; Whitehead, 1989; Mathews, 1998]. Эти особенности отражены также на рис. 5. Таким образом, во время затмения в вариациях характеристик рассеянных сигналов — скорости вертикального движения плазмы, температуры и плотности нейтральной компоненты — проявлялись волновые движения с периодами, характерными для ВГВ.

Затмение 25.10.2022

Частное солнечное затмение 25.10.2022 произошло с 12:30 до 14:57 LT с максимальной фазой 0.757 в 13:44 по московскому времени (LT=UT+3) в условиях высокой солнечной активности и спокойной геомагнитной обстановки. Исследования ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН проводились с 24 по 26 октября с 10 до 17 LT. По данным ионозонда $f_oE=2.2\div 3.0$, $f_oF1=8.0\div 9.0$ и $f_oF2=9.0\div 10.8$ МГц на фоне высокой солнечной активности. Наблюдались слои E_s типов h и с предельной частотой отражения до 3.5 МГц. Во время затмения f_oF2 понизилась на 3 МГц с 10.8 до 7.8 МГц. Уменьшение f_oE составило не более 1 МГц. Накануне затмения 24.10.2022 в течение нескольких часов методом ИПН и на ионограммах регистрировался слой E_s с f_oE_s до 7 МГц, временами полностью экра-

нировавший F-слой. Ионограммы снимались ионозондом SADI с периодичностью 5 мин. В этот день отмечался высокий уровень помех. В отличие от предыдущих лет для создания ИПН использовался режим квазинепрерывного нагрева ионосферы и рассеянный сигнал принимался не только во время релаксации неоднородностей, но и во время их развития (см. рис. 1).

На рис. 9 показана высотно-временная зависимость амплитуды рассеянного сигнала в день затмения 25.10.2022. Охвачен диапазон высот от D-области до F-слоя включительно. Зеркально отраженные от F-слоя пробные волны обыкновенной и необыкновенной компонент видны на высотах 220–260 км. Сигналы, рассеянные ИПН, в области D наблюдались на 65–85 км, в E-слое — на 90–140 км. Со 100–110 км почти весь день принимался рассеянный сигнал от ИПН в слое E_s . При измерениях ошибочно был выбран уровень усиления приемной аппаратуры, обеспечивший высокий уровень приемного сигнала от F-слоя, но недостаточный для хорошей регистрации рассеянных сигналов в нижней ионосфере. В результате в таком представлении на рис. 9 отчетливо видны особенности вариаций сигналов преимущественно в F-слое. Отметим необычную динамику действующей высоты отражения пробной радиоволны в F-слое. Сравнительно быстрые приблизительно пятиминутные и глубокие вариации высоты во время затмения сменились на медленные, более характерные для спокойной ионосферы.

Температура нейтральной компоненты, вертикальная скорость, характеристики турбулентности

Вариации температуры в день затмения показаны на рис. 10, а, где даны все значения температуры без разделения по высотам. Облако точек дает представление о пределах изменения температуры и ее разбросе за день. Оказалось, что наибольшая плотность облака соответствует 97–107 км, при этом температура изменялась от ~ 100 до 300 К. В среднем это согласуется с результатами наших измерений методом ИПН [Беликович и др., 1999б; Belikovich et al., 2002; Бахметьева и др., 2023] и другими методами [Жеребцов и др., 2020]. На панели б показаны вариации температуры на 99.7, 102.7 и 107.3 км, для первых двух высот на график нанесены полиномиальные тренды 2-го порядка. Несмотря на сравнительно большие вариации температуры, видно, что ее уменьшение коррелирует с затмением. В среднем на 99.7 км температура понизилась на 50–70 К, на 102.7 км — на 20 К. При общей тенденции к снижению на 107.3 км данных недостаточно, чтобы сделать подобные оценки.

Отметим, что температура нижней термосферы зависит от многих природных факторов, в том числе от атмосферной турбулентности. В [Бахметьева и др., 2021] приведены сведения об изменении уровня турбопаузы, полученные по измерениям характеристик рассеянных сигналов в разных ионосферных условиях. Показано, что уровень турбопаузы значительно варьирует по высоте от 90 до 110–115 км. На рис. 11 показан пример изменений уровня турбопаузы. Турбулентность затрудняет определение тем-

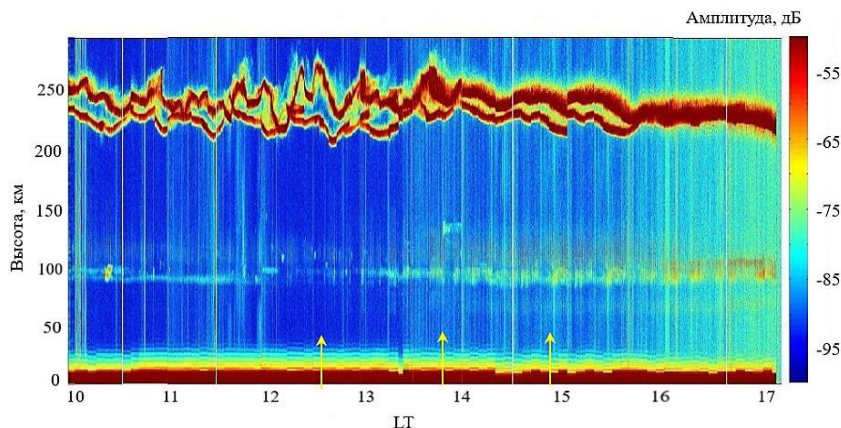


Рис. 9. Высотно-временная зависимость амплитуды рассеянного сигнала в день затмения 25.10.2022 во время развития и релаксации неоднородностей. Показаны сигналы, рассеянные ИПН, в области D на высотах 70–85 км, в E-слое на высотах 90–140 км. Зеркально отраженные от F-слоя пробные волны обыкновенной и необыкновенной компонент видны в диапазоне высот 220–260 км

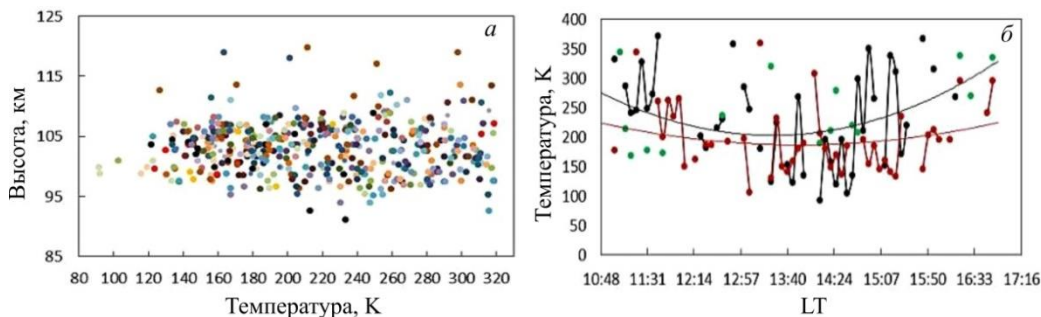


Рис. 10. Температура нейтральной компоненты по измерениям с 10:00 до 17:00 в день затмения 25.10.2022 на высотах 90–120 км (а); б — температура на высоте 99.7 (черные точки), на 102.7 (красные) и 107.3 км (зеленые). Сплошные линии — полиномиальные тренды 2-го порядка для первых двух высот

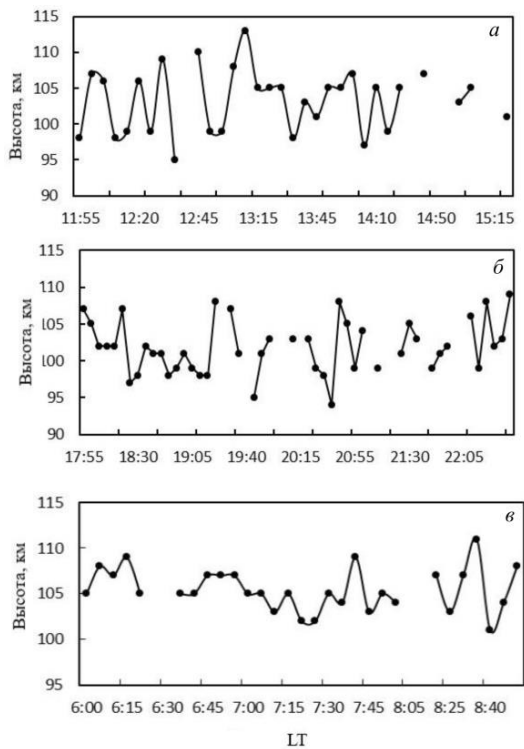


Рис. 11. Уровень турбопаузы во время затмения 20.03.2015 (а), на заходе и восходе Солнца 12.08.2015–13.08.2015 (б, в)

пературы, уменьшая время релаксации неоднородностей по сравнению с диффузионным временем их релаксации в нижней термосфере и увеличивая погрешность измерения. Как правило, такие сеансы исключаются из обработки, но полностью исключить влияние турбулентности вряд ли возможно. Отметим также, что турбулентная скорость в возмущенных условиях может возрастать от 2–3 до 5–7 м/с и сопоставима по величине со скоростью регулярного вертикального движения [Бахметьева и др., 2021; Бахметьева и др., 2023].

Особенности динамической перестройки нижней ионосферы в день затмения отражены в высотных профилях скорости вертикального движения плазмы, типичные примеры которых показаны на рис. 12. Наиболее сильные изменения величины и направления скорости с высотой отмечались в часы перед затмением в E-слое на 90–110 км и в D-области ниже 80 км. Изменение скорости по высоте характеризуется постоянной сменой ее величины и направления. На панели а дан пример профиля с направлением скорости только вниз (все значения скорости положительны) и ее волнообразными изменениями с высотой — как мелкомасштабными с масштабом по высоте 3–5 км, так и более крупными ~25–30 км. Панели б, в показывают переменное направление скорости со сменой восходящего движения ниже 90 (100) км на нисходящее и квазиволновой вид профиля

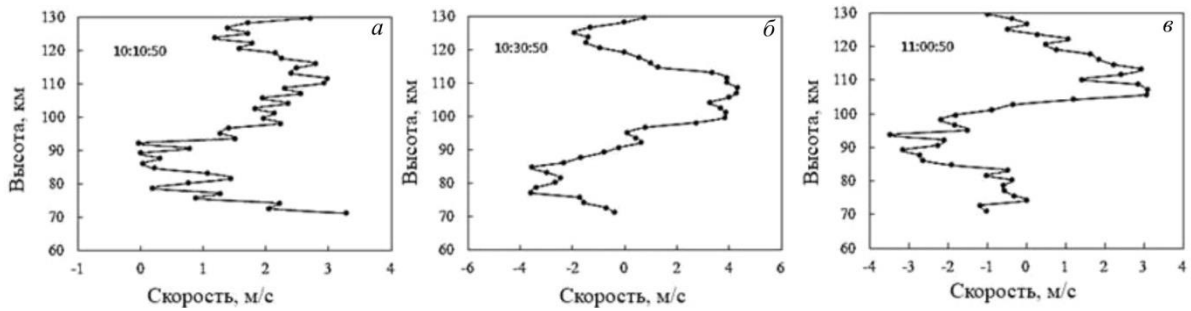


Рис. 12. Высотные профили скорости вертикального движения плазмы для трех сеансов в день затмения 25.10.2022. Каждая точка получена 5-минутным усреднением исходных данных

Таблица 2

Дата	W	$F10.7$	K_p	A_p
16.08.2000–17.08.2000	167–174	1631	3.4	8
15.06.2001–16.06.2001	122–95	1673	1+; 2–	7
12.08.2015–13.08.2015	40–48	65	3+; 4+	10, 12; 32
28.06.2023–29.06.2023	97–82	1501	2+; 3+; 3	7; 9; 15
04.10.2023–05.10.2023	105–94	1544	2+	8

с масштабом ~25–30 км. В таких условиях на этих высотах, согласно теории ветрового сдвига, велика вероятность образования слоя E_s [Гершман, 1974; Whitehead, 1989; Mathews, 1998]. На этих же высотах слой E_s регистрировались на высотном-временной записи амплитуды рассеянного сигнала и ионограмме вертикального зондирования.

3. НИЖНЯЯ ИОНОСФЕРА НА ЗАХОДЕ И ВОСХОДЕ СОЛНЦА

Исследования нижней ионосферы методом ИПН во время затмений Солнца и в заходно-восходные часы, некоторые результаты которых приведены в работах [Бахметьева и др., 2001, 2005; Беликович и др., 19996; Belikovich et al., 2002; Bakhmetieva, Grigoriev, 2022] показали подобие ионосферных процессов, происходящих в эти периоды времени. Кратко остановимся на особенностях заходно-восходной перестройки ионосферы. В табл. 2 приведены сведения о выполненных экспериментах, указаны даты и гелиогеофизические параметры в этот период: число солнечных пятен W , поток радиоизлучения $F10.7$, геомагнитные индексы K_p и A_p [<http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>].

За исключением августа 2015 г. все остальные эксперименты выполнялись в годы высокой солнечной активности. В августе 2000 г. и августе 2015 г. происходили небольшие геомагнитные возмущения со средним за день $K_p=3\div 4$.

На рис. 13, а, б показаны высотно-временные зависимости амплитуды сигнала, рассеянного ИПН, полученные в заходно-восходные часы 15–16 июня 2001 г. и 12–13 августа 2015 г. В обоих случаях ночью работа стенда СУРА на некоторое время прекращалась, когда f_oF2 уменьшалась и становилась ниже рабочей частоты.

Видно практически полное подобие зависимостей амплитуды сигнала от высоты и времени в июне 2001 и августе 2015 г.: рассеянные сигналы в D-области,

E-слое и спускающиеся слои E_s , промодулированные атмосферными волнами. Наблюдалось расслоение амплитуд рассеянных сигналов в D-области, подобно показанным на рис. 2 и 5.

Хорошо известно, что область D сильно меняется во время восхода и захода Солнца [Veinonen et al., 2006; Baumann, 2022]. На рис. 13, а видно, что в D-области вечернее уменьшение амплитуды сигнала происходит при изменении зенитного угла Солнца от 90° до 105° . Утренний рост амплитуды происходит при уменьшении зенитного угла Солнца с 97° до 90° . Это сопровождается явной асимметрией нижней ионосферы на восходе и заходе, которая проявляется в том, что в вечерние часы рассеянные сигналы имеют большую амплитуду и занимают больший интервал высот, чем на восходе. В вечерние часы слабые сигналы из верхней части области D существовали около часа после захода на этих высотах. Хорошо виден более широкий и глубокий минимум амплитуды, образовавшийся между слоями D и E во время восхода. Эти процессы хорошо описываются моделью, включающей одну разновидность отрицательных ионов O_2^- , которая была рассмотрена в [Беликович и др., 2000; Беликович, Бенедиктов, 2002], где показано, что на основе такой модели можно оценить концентрации атомарного кислорода и возбужденных молекул кислорода в состоянии $1\Delta_g$. Кроме того, показано значительное увеличение концентрации атомарного кислорода на восходе [Беликович и др., 19996; Беликович, Бенедиктов, 2002; Belikovich et al., 2002]. Аналогичные вариации амплитуды сигнала в августе 2015 г. в значительной степени маскировались высоким уровнем помех в заходно-восходные часы.

На рис. 13, в показаны высотно-временные вариации вертикальной скорости с 5-минутным усреднением в вечерние часы 12.08.2015 и утренние часы 13.08.2015. Скорость показана в виде цветовой шкалы. Во всех случаях скорость изменялась в от -8 до $+8$ м/с.

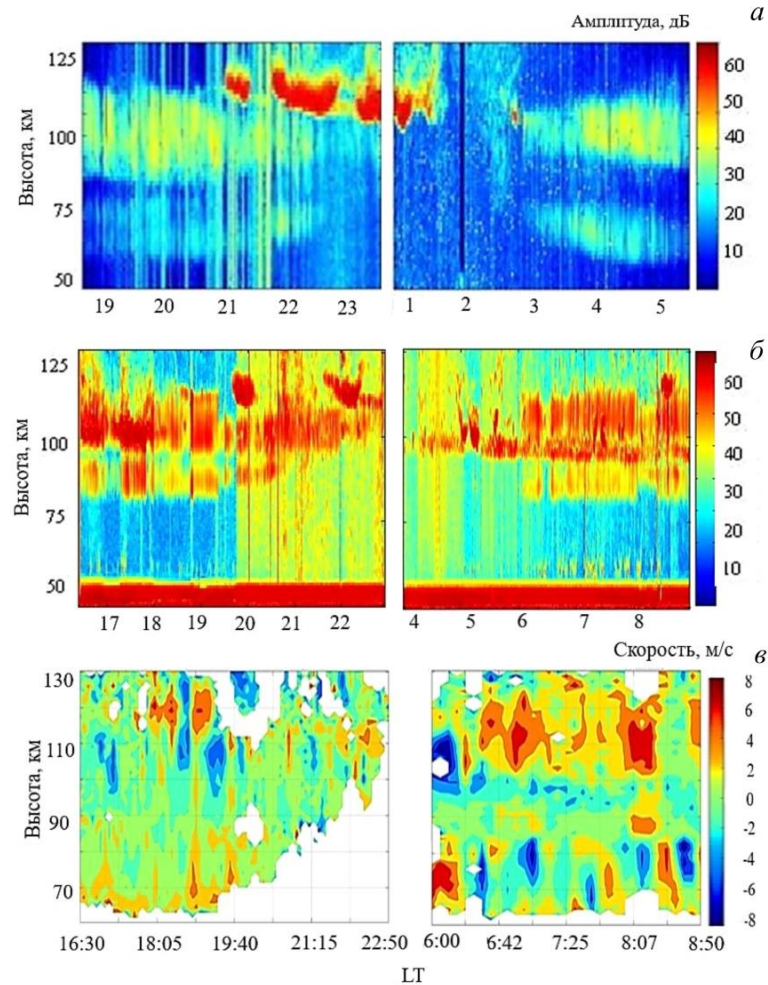


Рис. 13. Высотно-временные вариации амплитуды рассеянного сигнала в заходно-восходные часы 15–16 июня 2001 г. (а) и 12–13 августа 2015 г. (б); высотно-временные вариации вертикальной скорости в заходно-восходные часы 12–13 августа 2015 г. (в)

В утренние часы 13.08.2015 наблюдались глубокие и быстрые вариации скорости. Для вечерних часов 12.08.2015 были характерны преимущественно положительные скорости в D-области (движение вниз) со сменой направления вблизи 90 км. Хорошо видна периодическая смена направления и величины вертикальной скорости с волновыми вариациями периодов 15–20, 40–45, 60, 120, 150 и 180 мин. Эти периоды характерны для ВГВ, распространяющихся в атмосфере Земли.

В [Tolmacheva, Belikovich, 2004] рассмотрены вертикальные профили температуры и плотности на высотах между 90 и 110 км для вечерних часов 31.07.2002 и утренних часов 01.08.2002, измеренные методом создания ИПН. На профиле температуры наблюдался минимум в интервале высот 95–112 км. В утренние часы плотность атмосферы была в 2.7 раза выше, чем в вечерние, а профиль температуры был сдвинут вверх на несколько километров. Высота минимума температуры вечером и утром составляла 100 и 103 км соответственно. Температура вблизи этой высоты была практически одинаковой (120–125 К). Сравнение с данными осени 1990 г. [Tolmacheva, Belikovich, 2004; Беликович и др., 1996], когда вол-

новая активность атмосферы была низкой, показывает, что минимум температуры осенью 1990 г. был выше, чем летом 2002 г. и составил ~140 К.

Таким образом, проведенные методом ИПН исследования нижней ионосферы показали во многом подобие вариаций амплитуды, времени релаксации рассеянного сигнала и вертикальной скорости во время затмения и в заходно-восходные часы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты исследований реакции нижней ионосферы Земли на частные солнечные затмения и во время захода и восхода Солнца по наблюдениям в лаборатории «Васильсурск» (56.13° N, 46.10° E) вблизи Нижнего Новгорода.

Исследования уникальных природных явлений в период затмения Солнца и в контрольные дни проводились методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН ионосферной плазмы, создаваемых мощным КВ-радиоизлучением и методом частичных отражений, основанным на рассеянии радиоволн естественными неоднородностями области D. ИПН создавались излучением передатчиками стенда СУРА в зенит мощной радиоволны необыкновенной

либо обыкновенной поляризации на частотах 4.3, 4.7 или 5.6 МГц. Передатчик установки частичных отражений работал на частоте 2.95 МГц, принимались обе магнитоионные компоненты. Измерялись амплитуды и фазы сигналов, рассеянных естественными и искусственными неоднородностями. На основе измерений характеристик рассеянных сигналов определялись температура и плотность нейтральной атмосферы, высота турбопаузы, турбулентная скорость и скорость регулярного вертикального движения плазмы. Сделаны следующие выводы.

Наглядно показано, что состояние нижней ионосферы во время частных затмений Солнца подобно ее состоянию в заходно-восходные часы и обусловлено тем, что фактическое уменьшение солнечной радиации во время затмения аналогично переходу ионосферы в состояние сумерек. Во время развития затмений и на заходе Солнца наблюдался характерный для перехода к ночному режиму ионосферы рост высот рассеянных сигналов в области D и расщепления их амплитуд. В E-слое наблюдались рост на 30–40 дБ амплитуд сигналов, рассеянных неоднородностями, что обусловлено уменьшением поглощения мощной и пробной волн, и расширение диапазона высот приема рассеянных сигналов, т. е. высот образования ИПН.

Методом ИПН определена температура нейтральной атмосферы на высотах 90–130 км. Получено, что во время затмений температура уменьшалась в среднем на 50–70 К. При этом амплитуда рассеянного сигнала возрастала на 30–40 дБ, время релаксации — в 1.5–2.0 раза. В отдельных случаях наблюдалось расслоение амплитуды сигнала в D-области, обусловленное расслоением профиля N_e . Возрастала турбулизация нижней ионосферы, связанная с распространением атмосферных волн.

Измеренная методом ЧО в D-области N_e во время затмения 01.08.2008 уменьшилась в 3–5 раз. Выше 88 км отклик ионосферы запаздывал на 20–25 мин по отношению к моменту максимальной фазы затмения, в то время как в нижней части области D это запаздывание отклика составляло не более нескольких минут.

Во время затмений наблюдались рассеянные сигналы с большой амплитудой и сравнительно длительной релаксацией после окончания воздействия на ионосферу с высот мезопаузы (84–88 км). Рассеянные сигналы на этих высотах обычно отсутствуют из-за роста концентрации атомарного кислорода, препятствующего образованию ИПН за счет прилипания электронов к молекулам кислорода при тройных соударениях. На этом основании можно предполагать уменьшение концентрации атомарного кислорода во время затмения на этих высотах.

В вариациях скорости вертикального движения плазмы наблюдались интенсивные волновые движения с периодами, характерными для ВГВ. Основные особенности высотно-временных вариаций вертикальной скорости в нижней ионосфере в период наблюдений солнечного затмения и в заходно-восходные часы подобны.

Сопоставление этих вариаций с временными изменениями скорости вертикального движения, а также

с измерениями высотного профиля N_e позволяет сделать вывод о значительном изменении во время затмения как ионизованной, так и нейтральной составляющих атмосферы на высотах нижней ионосферы.

Работа выполнена по проекту № FSWR-2023-0038 по базовой части государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации. Эксперименты по созданию ИПН на стенде СУРА в 2022–2023 гг. проводились в рамках гранта РНФ № 21-72-10131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 г. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2002. № 2. С. 25–63.

Артемьева Г.М., Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. и др. Измерения поглощения космического радиоизлучения во время солнечного затмения 15.02.1961 г. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1962. Т. 2, № 1. С. 58–60.

Бахметьева Н.В., Жемяков И.Н. Вертикальные движения плазмы в динамике мезосферы и нижней термосферы Земли. *Химическая физика*. 2022. Т. 41, № 10. С. 65–83. DOI: [10.31857/S0207401X2210003X](https://doi.org/10.31857/S0207401X2210003X).

Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В. Исследование неоднородной структуры нижней ионосферы с помощью рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2001. Т. 44, № 12. С. 1003–1014.

Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Каган Л.М., Понятов А.А. Заходно-восходные характеристики спорадических слоёв ионизации в нижней ионосфере, наблюдаемые методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. *Известия вузов. Радиофизика*. 2005. Т. 48, № 1. С. 16–32.

Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Егерова М.Н., Толмачева А.В. Искусственные периодические неоднородности в нижней ионосфере, волновые явления и спорадический слой E. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 2. С. 77–90.

Бахметьева Н.В., Бубукина В.Н., Вяхирев В.Д. и др. Реакция нижней ионосферы на частные солнечные затмения 1 августа 2008 г. и 20 марта 2015 г. по наблюдениям рассеяния радиоволн естественными и искусственными неоднородностями ионосферной плазмы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2016. Т. 59, № 10. С. 873–886.

Бахметьева Н.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Комраков Г.П. Нижняя ионосфера Земли во время частных солнечных затмений по наблюдениям вблизи Нижнего Новгорода. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2017. Т. 57, № 1. С. 64–78.

Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Виноградов Г.Р. и др. Параметры атмосферной турбулентности и динамика нижней ионосферы в исследованиях на стенде СУРА. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2021. Т. 61, № 6. С. 777–793. DOI: [10.31857/S0016794021060031](https://doi.org/10.31857/S0016794021060031).

Бахметьева Н.В., Жемяков И.Н., Григорьев Г.И., Калинина Е.Е. Влияние природных факторов на температуру нижней термосферы. *Химическая физика*. 2023. Т. 42, № 10. С. 50–63.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Исследование нижней части D-области ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1986. Т. 29, № 11. С. 1283–1296.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Исследование сумеречной D-области ионосферы с помощью искусственных

периодических неоднородностей. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2002. Т. 45, № 6. С. 502–508.

Беликович В.В., Гончаров Н.П. Исследование D-области ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1994. Т. 34, № 6. С. 84–95.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Бубукина В.Н., Вяхирев В.Д. Искусственные периодические неоднородности и модель нижней части области D. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1999а. Т. 42, № 5. С. 431–437.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. *Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей*. Нижний Новгород, ИПФ РАН. 1999б. 155 с.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Трунов Д.В. Высотные профили амплитуды и времени релаксации ИПН в области D. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2000. Т. 40, № 6. С. 55–64.

Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е. и др. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений на средних широтах и в авроральной зоне. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2003а. Т. 46, № 3. С. 181–191.

Беликович В.В., Караштин А.Н., Комраков Г.П., Шлюгаев Ю.В. Одновременное радиозондирование среднеширотной мезосферы в СВ- и КВ-диапазонах. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2003б. Т. 43, № 1. С. 1–6.

Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е. и др. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Нижнем Новгороде и Мурманске. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. Т. 48, № 1. С. 103–108.

Бенедиктов Е.А., Вяхирев В.Д., Гончаров Н.П. и др. Вариации электронной концентрации в D-области ионосферы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1978. Т. 21, № 3. С. 348–351.

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988. 528 с.

Вертоградов Г.Г., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П. Отклик ионосферы на солнечное затмение 29 марта 2006 г. по данным наклонного ЛЧМ зондирования. *Гелиогеофизические исследования*. 2015. Вып. 11. С. 53–57.

Гершман Б.Н. *Динамика ионосферной плазмы*. М.: Наука, 1974. 256 с.

Гершман Б.Н., Игнатьев Ю.А., Каменецкая Г.Х. *Механизмы образования ионосферного спорадического слоя на различных широтах*. М.: Наука, 1976. 108 с.

Данилкин Н.П., Коченова Н.А., Свечников А.М. Состояние ионосферы над Ростовом-на-Дону в период солнечного затмения 15 февраля 1961 г. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1961. Т. 1, № 4. С. 612–615.

Жеребцов Г.А., Перевалова Н.П., Шпынев Б.Г. и др. *Волновые процессы в атмосфере Земли и их влияние на ионосферу*. М. ГЕОС, 2020. 198 с.

Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В., Рябова М.И. Исследование особенностей распространения высокочастотных сигналов на наклонных и NVIS радиопутьях в периоды солнечных затмений. *Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского*. 2012. № 2 (1). С. 59–65.

Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н. Численное моделирование эффектов солнечного затмения 11 августа 1999 года во внешней ионосфере. *Космические исследования*. 2007. Т. 45, № 2. С. 114–121.

Ковалев А.А., Колесник А.Г., Колесник С.А. и др. Ионосферные эффекты солнечных затмений на средних широтах. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2009. Т. 49, № 4. С. 500–506.

Ладынин А.В., Семаков Н.Н., Хомутов С.Ю. Изменение суточного хода геомагнитного поля во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52, № 3. С. 439–449.

Терещенко В.Д., Васильев Е.Б., Якимов М.В. и др. Радиолокационные наблюдения за нижней полярной ионосферой во время неполного солнечного затмения 11 августа 1999 г. Радиолокационное исследование природных сред. *Труды XVI-XIX Всероссийских симпозиумов*. С.-Петербург: изд-во ВИКА им. А. Ф. Можайского. 2001. Вып. 2. С. 347–352.

Урядов В.П., Леонов А.М., Понятов А.А. и др. О вариациях характеристик КВ-сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2000. Т. 43, № 8. С. 682–686.

Черногор Л.Ф. *Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе*. Харьков: изд-во Харьковского национального ун-та им. В.Н. Каразина, 2013. 480 с.

Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., et al. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25, iss. 4. P. 465–469.

Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Lesyuta O.S., et al. Geomagnetic control of the spectrum of traveling ionospheric disturbances based on data from a global GPS network. *Ann. Geophys.* 2001. Vol. 19, no 7. P.723–731.

Babakhanov I.Y., Belinskaya A.Y., Bizin M.A., et al. The geophysical disturbance during the total eclipse of the 1 August 2008 in Novosibirsk, Russia. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. Vol. 92. P. 1–6.

Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I. Study of the Mesosphere and Lower Thermosphere by the Method of Creating Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. 1346. DOI: [10.3390/atmos13091346](https://doi.org/10.3390/atmos13091346).

Bakhmetieva N.V., Kulikov Y.Y., Zhemayakov I.N. Mesosphere ozone and the lower ionosphere under plasma disturbance by powerful high-frequency radio emission. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, iss. 11. P. 1154.

Bamford R.A. The effect of the 1999 total solar eclipse on the ionosphere. *Phys. Chem. Earth (C)*. 2001. Vol. 26, no. 5. P. 373–377. DOI: [10.1016/S1464-1917\(01\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(01)00016-2).

Barad R.K., Sripathi S., England S.L. Multi-instrument observations of the ionospheric response to the 26 December 2019 solar eclipse over Indian and Southeast Asian longitudes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. Vol. 127. e2022JA030330. DOI: [10.1029/2022JA030330](https://doi.org/10.1029/2022JA030330).

Baumann C., Kero A., Raizada S., et al. Arecibo measurements of D-region electron densities during sunset and sunrise: implications for atmospheric composition. *Ann. Geophys.* 2022. Vol. 40. P. 519–530. DOI: [10.5194/angeo-40-519-2022](https://doi.org/10.5194/angeo-40-519-2022).

Belikovich V.V., Benediktov E.A., Terina G.I. Diagnostics of the lower ionosphere by the method of resonance scattering of radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1986. Vol. 48, no. 11–12. P. 1247–1253.

Belikovich V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V., Bakhmet'eva N.V. *Ionospheric Research by Means of Artificial Periodic Irregularities*. Copernicus GmbH, Katlenburg-Lindau, Germany. 2002, 160 p.

Bischoff K., Taubenheim J. A study of ionospheric pulse absorption (A1) on the 4 Mc/s during the solar eclipse of May 20, 1966. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1967. Vol. 29, no. 9. P. 1063–1069. DOI: [10.1016/0021-9169\(67\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(67)90140-7).

Chandra H., Sharma Som, Lele P.D., et al. Ionospheric measurements during the total solar eclipse of 11 August 1999. *Earth Planets Space*. 2007. Vol. 59. P. 59–64. DOI: [10.1186/BF03352023](https://doi.org/10.1186/BF03352023).

Cherniak I., Zakharenkova I. Ionospheric total electron content response to the great American solar eclipse of 21 August 2017. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45, no. 3. P. 1199–1208. DOI: [10.1002/2017GL075989](https://doi.org/10.1002/2017GL075989).

- Dang T., Lei J., Wang W., et al. Global responses of the coupled thermosphere and ionosphere system to the August 2017 Great American Solar Eclipse. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123, no 5. P. 7040–7050. DOI: [10.1029/2018JA025566](https://doi.org/10.1029/2018JA025566).
- Farges T., Le Pichon A., Blanc E., et al. Response of the lower atmosphere and the ionosphere to the eclipse of August 11, 1999. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2003. Vol. 65, no 6. P. 717–726. DOI: [10.1016/S1364-6826\(03\)00078-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(03)00078-6).
- Huijun Le, Libo Liu, Xinan Yue, Weixing Wan, Baiqi Ning. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipses. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2009. Vol. 114, iss. A7. DOI: [10.1029/2009JA014072](https://doi.org/10.1029/2009JA014072).
- Kagan L.M., Nicolls M.J., Kelley M.C., et al. Observation of radio-wave-induced red hydroxyl emission at low altitude in the ionosphere. *Phys. Rev. Lett.* 2005. Vol. 94, 095004.
- Kane J.A. D-region electron density measurements during the solar eclipse of May 20, 1966. *Planet. Space Sci.* 1969. Vol. 17, no. 4. P. 609–616. DOI: [10.1016/0032-0633\(69\)90183-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(69)90183-4).
- Karashtin A.N., Shlyugaev Y.V., Abramov V.I., et al. First HF radar measurements of summer mesopause echoes at SURA. *Ann. Geophys.* 1997. Vol. 15, no. 7. P. 935–941.
- Lei J., Dang T., Wang W., et al. Long-lasting response of the global thermosphere and ionosphere to the 21 August 2017 solar eclipse. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123, no. 5. P. 4309–4316. DOI: [10.1029/2018JA025460](https://doi.org/10.1029/2018JA025460).
- MacPherson B., Gonzales S.A., Sulzer M.P., et al. Measurements of the topside ionosphere over Arecibo during the total solar eclipse of February 26, 1998. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, no. 10. P. 23055–23067. DOI: [10.1029/2000JA000145](https://doi.org/10.1029/2000JA000145).
- Madhav Haridas M.K., Manju G. On the response of the ionospheric F region over Indian low-latitude station Gadanki to the annular solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. A01302. DOI: [10.1029/2011JA016695](https://doi.org/10.1029/2011JA016695).
- Manju G., Sridharan R., Ravindran Sudha, et al. Rocket born in-situ electron density and neutral wind measurements in the equatorial ionosphere – Results from the January 2010 annual solar campaign from India. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2012. Vol. 86. P. 56–64. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.06.009).
- Mathews J.D. Sporadic E: current views and recent progress. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1998. Vol. 60, no. 4. P. 413–435.
- Panasenko S.V., Yuichi Otsuka, Max van de Kamp, et al. Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. Vol. 191. 105051. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.05.015](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.015).
- Rishbeth H. Solar eclipses and ionospheric theory. *Space Sci. Rev.* 1968. Vol. 8, no. 4. P. 543–544.
- Salah J.F., Oliver W.L., Foster J.C., et al. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91, no. A2. P. 1651–1660. DOI: [10.1029/JA091iA02p01651](https://doi.org/10.1029/JA091iA02p01651).
- Sneva Y., Rupesh M.D., Dabas R.S., Gwal A.K. The response of sporadic E-layer to the total solar eclipse of July 22, 2009 over the equatorial ionization anomaly region of the Indian zone. *Adv. Space Res.* 2013. Vol. 51. P. 2043–2047.
- Thomas L., Astin I., Prichard T. The characteristics of VHF echoes from the summer mesopause region at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. Vol. 54. P. 969–977.
- Tolmacheva A.V., Belikov V.V. Measurements of the temperature and density of the upper atmosphere using artificial periodic irregularities during the summer seasons of 1999–2002. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2004. Vol. 5. G11008. DOI: [10.1029/2004G1000061](https://doi.org/10.1029/2004G1000061).
- Tsai H.F., Liu J.Y. Ionospheric total electron contents response to solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, no. 6. P. 12657–12668.
- Verronen P.T., Ulich Th., Turunen E., Rodger C.J. Sunset transition of negative charge in the D-region ionosphere during high-ionization conditions. *Ann. Geophys.* 2006. Vol. 24. P. 187–202. DOI: [10.5194/angeo-24-187-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-187-2006).
- Wang X., Berthelier J.J., Lebreton J.P. DEMETER observations during the March 29, 2006 solar eclipse. *Geophysical Research Abstracts*. 2008. Vol. 10. EGU2008-A-06988.
- Whitehead J.D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1989. Vol. 51, no. 5. P. 401–424. DOI: [10.1134/S1990793123050160](https://doi.org/10.1134/S1990793123050160).
- URL: <http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html> (дата обращения 22 марта 2024 г.).
- URL: <https://www.izmiran.ru/ionosphere/moscow/> (дата обращения 22 марта 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А. Особенности нижней ионосферы Земли во время затмений Солнца и в заходно-восходные часы по измерениям методом ИПН вблизи Нижнего Новгорода. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 3. С. 129–145. DOI: [10.12737/szf-103202414](https://doi.org/10.12737/szf-103202414).