

УДК 533.951+573.868

## ВАРИАЦИИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕЗОСФЕРЫ ПРИ НАГРЕВЕ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ РАДИОВОЛНАМИ

Ю. Ю. Куликов<sup>1</sup>, Г. И. Григорьев<sup>2</sup>, А. А. Красильников<sup>1</sup>, В. Л. Фролов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН;

<sup>2</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты микроволновых наблюдений излучения озона средней атмосферы во время модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами 27–28 марта 2011 года. Модификация проводилась на нагревном стенде «Сура» (НИРФИ) с использованием двух озонметров, ориентированных в разные участки неба. Подтверждён обнаруженный ранее эффект уменьшения интенсивности излучения в линии озона при нагреве ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением и получены новые данные, касающиеся его характеристик. Обсуждается возможная интерпретация этого явления.

### ВВЕДЕНИЕ

Мезосфера Земли, расположенная на высотах 50÷90 км, до сих пор остаётся наименее исследованной частью средней атмосферы. Её ионизация достаточно слаба и существует только в дневное время суток. Ионизация определяется космическими лучами галактического и солнечного происхождения, наиболее энергичной частью солнечного рентгеновского спектра, излучением интенсивной солнечной линии  $\text{Ly}_\alpha$  и др. (разные источники ионизации наиболее эффективны на разных высотах атмосферы) [1]. Слабоионизованная плазма в этой области отличается сложным ионным составом, включающим в себя положительные и отрицательные ионы, а также ионы-связки, образующиеся в результате сложных ионизационных, обменных и рекомбинационных процессов [1–3].

При существующей сложности физических процессов количество возможных методов исследования мезосферы ограничено. Для регулярных наблюдений обычно используют метод кросс-модуляции [4–6], метод частичных отражений [7–9], радарное зондирование мезосферы, стратосферы и тропосферы [10], а также эпизодические пуски геофизических ракет [11]. В последнее время стал применяться метод исследования мезосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей плазмы [12, 13]. Однако эти методы не используются в комплексе, а каждый из них сам по себе не даёт достаточного набора параметров, необходимых для определения существа процессов формирования и эволюции мезосферы. В частности, одной из важнейших нерешённых проблем является описание взаимодействия нижней ионосферы с озоновым слоем Земли на высотах мезосферы.

Исследования характеристик незаряженной составляющей мезосферы (малые примеси, температура нейтральных частиц и др.) успешно ведутся как методами контактных измерений с помощью баллонов и ракет, так наземными и бортовыми дистанционными методами [14–16]. Естественную динамическую структуру мезосферы можно также исследовать с помощью метода наземной микроволновой радиометрии (через измерение интенсивности излучения в линии озона), который имеет высокое пространственно-временное разрешение. Особенно хорошо микроволновый метод зарекомендовал себя в измерениях излучения средней атмосферы при наличии разного рода естественных возмущений. К таким возмущениям, в первую очередь, относятся

внезапные стратосферные потепления [17], солнечные затмения [18] и терминаторные волны, которые генерируются при восходе и заходе Солнца [19]. Все они влияют на вертикальный профиль концентрации озона.

В последние десятилетия наряду с изучением влияния естественных факторов на состояние мезосферы (нижней ионосферы) активно исследовались эффекты искусственного воздействия на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением, генерируемым специально построенными нагревными стендами. Это позволяет проводить измерения с повторяемыми и контролируруемыми свойствами создаваемых возмущений. Первые эксперименты по воздействию мощного коротковолнового радиоизлучения на нейтральную компоненту мезосферы (озон) были начаты на стенде «Сура» в 2008 году. В них было обнаружено уменьшение на 10 % интенсивности микроволнового излучения в линии атмосферного озона на частоте 110836,04 МГц во время модификации нижней ионосферы Земли (область высот 50–110 км) мощными короткими радиоволнами [20, 21]. На основе полученных экспериментальных данных в [21] было сделано предположение, что на содержание мезосферного озона могут влиять внутренние гравитационные волны, генерируемые в  $E$ -области ионосферы при её периодическом нагреве мощной радиоволной.

В данной работе в разделе 1 представлены результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы во время модификации ионосферы, которые проводились 27–28 марта 2011 года на нагревном стенде «Сура» (НИРФИ), расположенном около р/п Васильсурск в Нижегородской области. Их отличительной особенностью явилось использование в измерениях двух микроволновых озонметров, ориентированных под разными зенитными углами. В разделе 2 предложена теоретическая модель, объясняющая физические основы наблюдаемого явления.

## 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент был поставлен следующим образом. Стенд «Сура» излучал пучок мощных радиоволн необыкновенной поляризации на частоте 4,3 МГц под углом  $12^\circ$  от зенита к югу. Тепловое излучение средней атмосферы на частоте 110836,04 МГц принималось двумя идентичными мобильными микроволновыми озонometрами [22, 23]. Каждый из приборов состоит из гетеродинного приёмника, настроенного на частоту 110836,04 МГц, соответствующую вращательному переходу молекулы озона  $6_{0,6}-6_{1,5}$ , и многоканального анализатора спектра. На входе приёмника находится модуль, включающий в себя антенну (скалярный рупор) и переключающее устройство для калибровки уровня принимаемого из атмосферы излучения. Ширина диаграммы направленности рупорной антенны по уровню  $-3$  дБ составляет  $5,4^\circ$ . Однополосная шумовая температура приёмника составляет около 2500 К; спектрометр состоит из 32 фильтров с полосой пропускания от 1 до 10 МГц и полной полосой анализа 240 МГц.

Параметры прибора позволяют измерять спектр линии излучения озона в течение 15 минут с точностью примерно 2 %. По измеренному спектру с помощью специально разработанной методики [24] можно получить информацию о вертикальном распределении озона на высотах от 22 до 60 км. Измерения спектров теплового излучения атмосферы выполнялись методом калибровки по двум «чёрнотельным» эталонам, один из которых имел температуру кипения жидкого азота, другой — температуру окружающего воздуха. Диаграмма направленности антенны одного из озонметров была ориентирована вдоль направления излучения антенны стенда «Сура». Диаграмма второго озонметра была направлена под зенитным углом  $70^\circ$  к югу. Следует отметить, что при типичном уровне тропосферного поглощения  $0,30 \div 0,35$  Нп угол зондирования  $70^\circ$  является оптимальным с точки зрения максимального отношения сигнал/шум.

Нагрев нижней ионосферы проводился 27 марта 2011 года с 12:02 до 14:32 MSK и 28 марта 2011 года с 12:00 до 15:30 MSK в режиме 30 мин — излучение, 30 мин — пауза. Выбор режи-

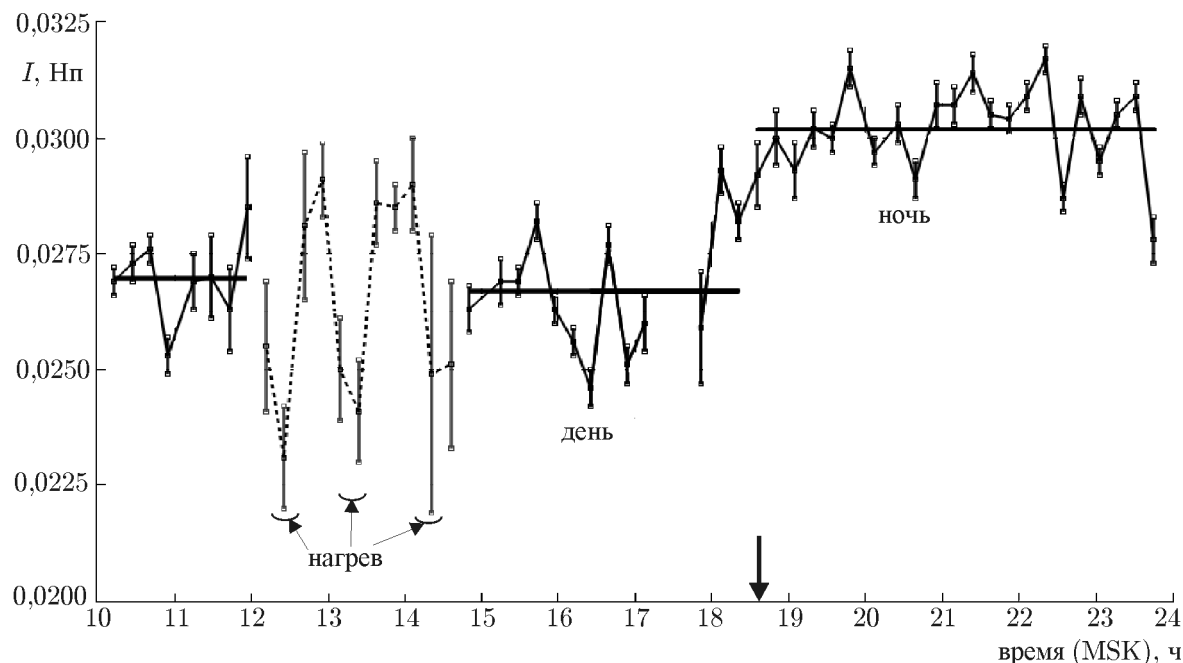


Рис. 1. Временные вариации интенсивности линии озона на резонансной частоте 110,836 ГГц при наблюдениях под зенитным углом  $70^\circ$  27 марта 2011 года. Микроволновые измерения выполнялись при воздействии на ионосферу мощной радиоволны необыкновенной поляризации на частоте  $f_{\text{ВН}} = 4,3$  МГц с мощностью накачки  $P_{\text{эфф}} = 40$  МВт

ма работы стенда был обусловлен временным разрешением микроволнового озонметра, чтобы за время нагрева или паузы можно было получить по два спектра атмосферной линии озона, что давало возможность при необходимости в последующем усреднить результаты измерений с целью уменьшить их статистическую погрешность. Измерения выполнялись круглосуточно, что позволило отследить также и суточные вариации микроволнового излучения, которые хорошо известны и могут быть использованы в качестве подтверждения работоспособности озонметров во время проведения активных экспериментов.

27 марта 2011 года работали два модуля стенда из трёх, измерения проводились при мощности волны накачки  $P_{\text{эфф}} = 40$  МВт. В них во время нагрева ионосферы мощными радиоволнами интенсивность теплового излучения атмосферы в линии озона уменьшалась в среднем на 9 %, что было зафиксировано приёмником, антенна которого была ориентирована под зенитным углом  $70^\circ$  к югу. На рис. 1 показано изменение интенсивности излучения в линии озона за всё время наблюдений 27 марта 2011 года. Каждой точке графика соответствует интенсивность спектральной линии, накопленная за 15 минут, на графике также указан стандарт отклонения для каждого измерения. Толстыми чёрными линиями показаны средние значения интенсивности по измерениям в дневное время до и после серии нагревов, а также среднее значение интенсивности по измерениям после захода Солнца за линию горизонта в 18:35 MSK (это время отмечено стрелкой). Пунктирными линиями обозначены вариации интенсивности микроволнового излучения во время цикла нагревного эксперимента, для которого скобками на графике обозначены периоды излучения волны накачки.

Из приведённого графика видно, что каждый раз включение мощной радиоволны приводило к уменьшению интенсивности принимаемого излучения в линии озона и к увеличению стандарта отклонений. Здесь уменьшение интенсивности излучения на 9 % отсчитывается относительно интенсивности линии озона, которая была измерена в периоды, когда передатчик стенда не ра-

Таблица 1

Время сеансов измерений 27.03.2011, MSK	Концентрация О <sub>3</sub> на высоте 60 км, см <sup>-3</sup>	Условия
12:02–12:32, 13:02–13:32, 14:02–14:32	$(4,81 \pm 0,24) \cdot 10^9$	Нагрев
09:20–12:00; 15:05–18:10	$(5,86 \pm 0,29) \cdot 10^9$	День
22:00–02:00	$(9,78 \pm 0,49) \cdot 10^9$	Ночь

ботал. Следует отметить, что по непонятным нам причинам интенсивность излучения в паузы между нагревами была в среднем выше на 4 %, чем средний дневной уровень. С учётом сказанного, среднее уменьшение интенсивности излучения при нагреве относительно уровня дневной интенсивности составило 5 %.

Увеличение стандарта отклонения во время измерений интенсивности излучения при работе стенда «Сура» и во время паузы между циклами нагрева может рассматриваться как свидетельство достаточно длительного последствия влияния излучения стенда на состояние мезосферы. В пользу временного запаздывания вариаций излучения при наклонном воздействии на ионосферу можно привести тот факт, что при вертикальном воздействии [21] возрастание интенсивности микроволнового излучения во время пауз между сеансами нагрева не обнаружено. Эксперимент проводился в течение 14–17 марта 2009 года, при этом антенна мобильного микроволнового озонметра была ориентирована в направлении излучения мощных радиоволн.

Все перечисленные выше факты свидетельствуют о сложности физических процессов в модифицированной области ионосферы и указывают на распространение возмущений на расстояние более 150 км от центра диаграммы направленности излучающей антенны стенда «Сура».

Анализ формы спектра линии озона показал, что нагрев ионосферы приводит к заметному понижению интенсивности излучения в линии озона на отстройках  $|\Delta f| \leq 40$  МГц относительно центральной частоты линии и чем меньше величина отстройки, тем сильнее понижается интенсивность. Отметим, что именно мезосферный озон на высотах 50–90 км (на высотах *D*-области модифицированной ионосферы) даёт наибольший вклад в эту часть спектральной линии.

По измеренным спектрам была проведена оценка вертикального профиля концентрации озона по методике, описанной в [24]. Она показала, что, если все изменения содержания озона в мезосфере привести к его изменению на высоте 60 км, то среднее уменьшение интенсивности излучения при нагреве нижней ионосферы может быть соотнесено с уменьшением на данной высоте содержания мезосферного озона в среднем на 18 % по сравнению со средним значением в дневное время суток. На основании выполненных оценок в табл. 1 приведены результаты рассчитанной концентрации озона на высоте 60 км по всем выполненным сеансам измерений 27 марта 2011 года во время нагрева, а также в дневных и ночных условиях без нагрева, с помощью приёмника, антенна которого была ориентирована на зенитный угол 70° к югу.

27 марта 2011 года приёмник, антенна которого была ориентирована под зенитным углом 12° к югу, измерил уменьшение интенсивности излучения порядка 4 % относительно среднего дневного уровня микроволновой интенсивности. Видно, что его величина близка к значению, полученному в измерениях с зенитным углом 70°, при той же мощности нагрева.

28 марта 2011 года на нагрев работали все три модуля стенда, при этом эффективная мощность волны накачки составляла 80 МВт. Измерения теплового излучения атмосферы в этот день осуществлялись только при помощи озонметра, направленного в модифицированную область атмосферы (второй прибор в это время по техническим причинам не работал). При мощности волны накачки 80 МВт и прочих равных условиях проведения эксперимента наблюдалось уменьшение интенсивности излучения в линии озона примерно на 8 % по трём сеансам нагрева. Из этого

следует, что в диапазоне мощностей волны накачки  $P_{\text{эфф}} = 40 \div 80$  МВт амплитуда уменьшения интенсивности излучения возрастает приблизительно пропорционально  $P_{\text{эфф}}$ .

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДАЕМОГО ЯВЛЕНИЯ

На основе результатов рассмотренных выше экспериментов можно заключить, что в них обнаруживается влияние нагрева ионосферы мощной радиоволной на нейтральную составляющую мезосферы (в нашем случае на озон). Поскольку степень ионизации на высотах мезосферы крайне мала, передачей энергии через ионизованную компоненту (через разогрев электронов в поле мощной радиоволны) можно пренебречь. В [21] было сделано предположение, что наблюдаемый эффект может являться результатом влияния внутренней гравитационной волны, возбуждаемой при периодическом нагреве динамо-области ионосферы на высотах порядка 110 км.

Важно отметить, что в результате исследований [25, 26] при циклической работе мощных коротковолновых радиопередатчиков в ионосфере было зарегистрировано появление крупномасштабных возмущений нейтральной составляющей атмосферного газа (перемещающихся ионосферных возмущений) с параметрами, характерными для внутренних гравитационных волн. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые при работе стенда «Сура», в последнее время регулярно регистрировались на удалении порядка 800 км в районе г. Харьков [27–29], где они были идентифицированы как внутренние гравитационные волны. Следует также отметить, что при циклической работе нагревного стенда «HIPAS» (Аляска) на частоте 2,85 МГц с эффективной мощностью 80 МВт в тропосфере Земли были зарегистрированы колебания атмосферного давления с периодом 10 мин [30].

В литературе обсуждались механизмы возбуждения акустико-гравитационных волн, и оценивалась эффективность этих механизмов при работе мощных радиопередатчиков [31, 32]. Основываясь на работах [31, 32], проведём сравнение теоретических результатов с данными наблюдений.

Вначале приведём кратко основные пространственные характеристики внутренних гравитационных волн от гармонических источников в изотермической атмосфере [33]. Известно, что возмущения скорости среды нарастают в области пространства над источниками, в то время как возмущения давления и плотности растут в области ниже источника. Темп этого нарастания для указанных величин одинаков и зависит от высоты  $z$  как  $\exp[(z - z_0)/(2H)]$ , где  $z_0$  — высота источника,  $H$  — высота однородной атмосферы. Поэтому если ставить целью обнаружить эффекты, связанные с вариациями плотности  $\Delta\rho$  или давления  $\Delta p$ , то следует проводить измерения в областях пространства, расположенных ниже источника, в то время как проявление эффекта Доплера, связанного с движением среды, следует детектировать на больших, чем источник, высотах. Очевидно также, что для изотермической модели атмосферного газа, давление и плотность которого меняются по барометрическому закону, и в которой невозмущённая плотность  $\rho_0(z)$  увеличивается с уменьшением высоты быстрее, чем отклонение  $\Delta\rho(z)$ , амплитуда отношения  $\Delta\rho/\rho_0$  в волновых возмущениях убывает с уменьшением высоты  $z$ .

В рамках принятой модели атмосферы естественно предположить, что аналогичные зависимости от высоты  $z$  сохраняются и для характеристик малых примесей  $\Delta\rho_{\text{П}}(z)$  и  $\Delta\rho_{\text{П}}(z)/\rho_{0\text{П}}(z)$ . Однако следует отметить, что это справедливо только в том случае, когда высотное распределение примесей  $\rho_{0\text{П}}(z)$  соответствует профилю распределения основного состава  $\rho_0(z)$ . Однако по данным различных авторов (см., например, [34]) высотное распределение невозмущённой концентрации озона сильно отличается от барометрического закона и может быть представлено в виде отдельных слоёв. В такой ситуации высотная зависимость относительного изменения интенсивности микроволнового излучения  $\Delta I/I_0$  может заметно отличаться от поведения величины  $\Delta\rho/\rho_0$  в гравитационной волне. При этом, если вариации интенсивности озона  $\Delta I \propto \Delta\rho_{\text{П}}$  нарастают

с уменьшением высоты в области ниже источника, а  $\rho_{0П}$  убывает, то относительная величина  $\Delta I/I_0$  может не убывать, а сохраняться неизменной или даже расти в указанном направлении.

Второй фактор, который следует иметь в виду, это резонансный характер излучения гармонических источников в изотермической атмосфере. Так (см., например, [32]) излучаемые пульсирующим с частотой  $\omega$  источником внутренние гравитационные волны распространяются в области углов  $\theta_0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ . Здесь  $\theta$  и  $\varphi$  — соответственно полярный и азимутальный углы в сферической системе координат, угол  $\theta$  отсчитывается от вертикали  $z$ ,  $\theta_0 = \arccos(\omega/\omega_g)$ ,  $\omega_g$  — частота Брента—Вяйсяля. При этом усиление возмущений в резонансном направлении  $\theta_0$  по сравнению с направлением  $\theta = 90^\circ$  может достигать величины  $\Delta\rho(\theta = \theta_0)/\Delta\rho(\theta = 90^\circ) = 10$ .

В условиях наших экспериментов интенсивность принимаемого на Земле микроволнового излучения в линии озона является интегральной характеристикой  $I \propto \int_{z_1}^{z_2} N(z) dz$ , где  $N$  — концентрация излучающих частиц,  $z_2 - z_1$  — интервал высот, с которых принимается излучение. В равновесных условиях  $I_0 \propto \int N_0 dz$ , в то время как при наличии возмущений  $I_1 \propto \int N_1 dz$  (индексом 1 здесь помечены малые отклонения величин от их равновесных значений под действием внутренней гравитационной волны). Легко оценить относительные изменения  $\delta I = I_1/I_0$  для вертикального распределения концентрации озона  $N(z)$  с двумя максимумами: одно из распределений задано в виде параболы (высота максимума 25 км), а другое в виде гауссова слоя с характерной шириной  $L$  и высотой максимума  $z_m \approx 85$  км. Не вдаваясь в детали вычислений, приведём результаты оценок возможных изменений  $\delta I$  при следующих значениях параметров:  $L = H = 10$  км,  $\omega = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $z_0 - z_m = 60$  км,  $V_0 = 3$  м/с. Здесь  $H$  — высота однородной атмосферы,  $\omega$  — частота гравитационной волны,  $V_0$  — амплитуда скорости внутренней гравитационной волны на уровне источника  $z_0$ .

Оказалось, что для двух принятых моделей слоёв относительные изменения интенсивности излучения озона могут составлять от одного до нескольких процентов. Это полностью соответствует результатам измерений, которые были получены в [21] и в обсуждаемых в настоящей работе экспериментах, подтверждая вывод о том, что возможной причиной изменения интенсивности микроволнового излучения в линии озона могут быть внутренние гравитационные волны, генерируемые при периодическом нагреве динамо-области ионосферы мощными радиоволнами. Это также объясняет наблюдаемые вариации интенсивности излучения на расстояниях более 150 км от стенда «Сура».

Понятно, что сделанные оценки носят приближённый характер. Их можно уточнить, если задать более точно форму и пространственное положение излучающих слоёв, а также определить действительное местоположение токовой струи. Однако такое рассмотрение выходит за рамки настоящей работы и будет выполнено в отдельной публикации с учётом результатов намеченных ниже экспериментов. Кроме того, недостатком вышеприведённых рассуждений является то, что наблюдаемые нами эффекты возникают в ближней зоне антенного поля стенда «Сура». Поэтому действие наводимой стендом «Сура» пондеромоторной силы может отличаться от случая рассмотренной в работе [32] гармонической волны уже за пределами ближнего поля антенны.

Если справедлива предложенная выше модель, то, поскольку естественный фон внутренних гравитационных волн всегда присутствует на стратосферных и мезосферных высотах, он должен проявляться и в измерениях интенсивности микроволнового излучения в линии озона в отсутствие модификации ионосферы мощными радиоволнами. Действительно, в [19, 35] при прохождении солнечного терминатора, когда возбуждаются интенсивные внутренние гравитационные волны, было обнаружено изменение содержания озона на стратосферных и мезосферных высотах: на высотах стратосферы эти изменения достигали 100 % и были значительно меньше (до 10 %) на мезосферных высотах.

Отметим, что наши измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях (сум-

марный  $K_p$ -индекс  $\Sigma K_p = 4 \div 5$ ) вне временного интервала влияния солнечного терминатора и, следовательно, при низком естественном фоновом уровне внутренних гравитационных волн. Можно предполагать, что имеющие место на рис. 1 вариации интенсивности принимаемого излучения с периодами до  $30 \div 60$  мин и амплитудой  $2 \div 5$  % от среднего уровня микроволнового излучения, которые выходят за уровень ошибок измерений, являются проявлением влияния естественных внутренних гравитационных волн на результаты наших измерений. Периоды  $30 \div 60$  мин являются обычно наблюдаемыми периодами для естественных среднемасштабных внутренних гравитационных волн. Кроме того, согласно [31], отклики ионосферной плазмы на движение солнечного терминатора и на её периодический нагрев мощным коротковолновым радиоизлучением сопоставимы по своей величине, что, собственно, и следует из наших измерений на мезосферных высотах.

## ВЫВОДЫ

Сформулируем кратко результаты, полученные в настоящей работе.

1) В результате проведённого 27–28 марта 2011 года эксперимента по искусственному воздействию на нижнюю ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением было подтверждено обнаруженное в [21] новое физическое явление — уменьшение интенсивности микроволнового излучения мезосферы в линии озона.

2) Показано, что этот эффект наблюдался не только непосредственно в модифицированной области мезосферы, но и на расстоянии  $150 \div 170$  км к югу от неё.

3) Установлено, что увеличение мощности волны накачки, излучаемой нагревным стендом, приводит к пропорциональному возрастанию величины ослабления интенсивности излучения в линии озона.

4) На основе [28] предложена физическая модель эффективного силового источника для генерации внутренних гравитационных волн, которые, по представленным в работе оценкам, могут оказывать влияние на вариации высотного распределения содержания мезосферного озона и, следовательно, на интенсивность принимаемого микроволнового излучения.

Справедливость выдвинутой гипотезы влияния внутренних гравитационных волн, генерируемых при модификации мощным коротковолновым радиоизлучением  $E$ -слоя ионосферы, допускает простую экспериментальную проверку. До сих пор мы проводили эксперименты главным образом в часы, близкие к полуденным, когда наблюдаются наиболее плотные  $E$ - и  $D$ -слои и значительная доля энергии волны накачки поглощается в них, приводя к заметному разогреву плазмы нижней ионосферы. Также в этих экспериментах использовались мощные волны необыкновенной поляризации как наиболее эффективный источник её омического нагрева. Именно в таких условиях предложенный выше механизм наиболее эффективен. Ясно, что его эффективность резко уменьшится при модификации вечерней и особенно ночной ионосферы. Поэтому в последующих экспериментах необходимо провести измерения в различное время суток и получить суточную зависимость величины изменения интенсивности микроволнового излучения в линии озона, а также сравнить величины уменьшения интенсивности этого излучения при использовании мощных волн разной поляризации. Такие измерения планируется провести на стенде «Сура» в 2012 году.

Важно также получить результаты прямых измерений вариаций температуры электронов в нижней ионосфере, которые можно выполнить, например, с помощью метода частичных отражений. Такие совместные эксперименты были начаты в августе–сентябре 2011 года, полученные в них данные в настоящее время обрабатываются. Выполнение намеченной программы исследований позволит получить новые важные сведения, которые будут иметь принципиальное значение

для понимания физической природы исследуемого явления.

Авторы благодарят сотрудников стенда «Сура» за помощь в проведении измерений. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 09–05–01041, 09–05–10033, 09–05–97014 и 11–02–00374) и Министерства образования и науки РФ (государственный контракт 16.518.11.7066).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов А. Д. Популярная аэрономия. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 136 с.
2. Tomko A. A., Ferraro A. J., Lee H. S., Mitra A. P. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1980. V. 42. P. 275.
3. Mitra A. P., Rowe J. N. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1972. V. 34. P. 795.
4. Fejer J. A. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1955. V. 7, No. 6. P. 322.
5. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 685 с.
6. Черногор Л. Ф. // *Геофизический журнал.* 1984. Т. 6, № 5. С. 46.
7. Verlose J. S., Burke M. J. // *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69. P. 2799.
8. Иванов В. А. Исследование *D*-области ионосферы методом частичных отражений. Йошкар-Ола: МПИ, 1985. 196 с.
9. Беликович В. В., Вяхирев В. Д., Калинина Е. Е. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2004. Т. 44, № 2. С. 189.
10. Gage K. S., Green J. L. // *J. Appl. Meteor.* 1982. V. 21. P. 1146.
11. Пахомов С. В., Князев А. К. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1988. Т. 28. С. 976.
12. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Толмачёва А. В., Бахметьева Н. В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999. 156 с.
13. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2002. Т. 45. С. 502.
14. Sheldon W. R., Benbrook J. R., Aïmedieu P. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1997. V. 59, No. 1. P. 1.
15. Gerrard A. J., Kane T. J., Eckermann S. D., Thayer J. P. // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. Art. no. D10103.
16. Thomas R. J., Barth C. A., Solomon S. // *Geophys. Res. Lett.* 1984. V. 11, No. 7. P. 673.
17. Куликов Ю. Ю., Красильников А. А., Рыскин В. Г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2002. Т. 38, № 2. С. 182.
18. Куликов Ю. Ю., Красильников А. А., Демкин В. М., Рыскин В. Г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2008. Т. 44, № 4. С. 522.
19. Kulikov Y. Y., Demkin V. M., Krasilnikov A. A. // 31st Annual Apatity Seminar “Physics of Auroral Phenomena”: Abstracts. Apatity, 2008. P. 72.
20. Kulikov Y. Y., Frolov V. L. // MSMW-10. Proc. Kharkov, Ukraine, June 21–26, 2010. doi:10.1109/MSMW.2010.5545979.
21. Куликов Ю. Ю., Фролов В. Л., Григорьев Г. И. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2012 (в печати).
22. Красильников А. А., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г., Щитов А. М. // *Изв. РАН. Сер. физическая.* 2003. Т. 67, № 12. С. 1788.
23. Красильников А. А., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г. и др. // *Приборы и техника эксперимента.* 2011. № 1. С. 127.
24. Красильников А. А., Куликов Ю. Ю., Мазур А. Б. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1997. Т. 37, № 3. С. 174.
25. Митяков Н. А., Грач С. М., Митяков С. Н. // *Итоги науки и техники. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы.* Т. 9. М.: ВИНТИ, 1989. 138 с.



26. Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Сазонов Ю. А. и др. // XIX Всерос. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл. Казань, 1999. С. 369.
27. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
28. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
29. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14.
30. Minami S., Nishino M., Suzuki Y., et al. // Adv. Space Res. 1999. V. 24, No. 8. P. 997.
31. Бессонова С. Г., Григорьев Г. И., Марьин А. А. Возбуждение акустико-гравитационных волн в динамо-области ионосферы энергетическим источником под действием мощного КВ излучения: Препринт № 470 НИРФИ. Нижний Новгород, 2001. 9 с.
32. Григорьев Г. И., Трахтенгерц В. Ю. // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39, № 6. С. 90.
33. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978.
34. Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор её структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
35. Cot S., Teitelbaum H. // J. Atmos. Terr. Phys. 1980. V. 42, No. 9–10. P. 877.

Поступила в редакцию 7 декабря 2011 г.; принята в печать 27 февраля 2012 г.

#### VARIATIONS IN THE MICROWAVE RADIATION OF THE MESOSPHERE DURING HEATING OF THE IONOSPHERE WITH HIGH-POWER RADIO WAVES

*Yu. Yu. Kulikov, G. I. Grigor'ev, A. A. Krasil'nikov, and V. L. Frolov*

We present the results of microwave observations of ozone radiation in the middle atmosphere during modification of the ionosphere by high-power short radio waves on March 27–28, 2011. The modification was performed on the “Sura” heating facility of the Radiophysical Research Institute (Nizhny Novgorod, Russia) by using two ozone meters oriented towards different regions in the sky. The effect of a decrease in the radiation intensity in the ozone line when the ionosphere is heated with high-power short-wave radio emission, which was discovered earlier, has been confirmed, and new data related to its characteristics, have been obtained. A possible interpretation of this phenomenon is discussed.