

УДК 550.388;551.594

ОТКЛИК МЕЗОСФЕРНОГО ОЗОНА НА НАГРЕВ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2013 г. Ю. Ю. Куликов¹, В. Л. Фролов², Г. И. Григорьев², В. М. Демкин¹,
Г. П. Комраков², А. А. Красильников¹, В. Г. Рыскин¹

¹Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

²Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород

e-mail: yuyukul@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 09.03.2011 г.

После доработки 25.01.2012 г.

Обнаружено уменьшение интенсивности микроволнового излучения в линии атмосферного озона на частоте 110836.04 МГц во время модификации ионосферы Земли мощными КВ радиоволнами, излучаемыми нагревным стендом “Сура”. На основании полученных экспериментальных данных сделано предположение, что причиной этого эффекта является воздействие на мезосферный озон внутренних гравитационных волн, генерируемых в *E*-области ионосферы при ее нагреве мощной радиоволной.

DOI: 10.7868/S0016794013010112

1. ВВЕДЕНИЕ

Мезосфера Земли, расположенная на высотах 50–90 км, до сих пор остается наименее исследованной частью средней атмосферы. Ее ионизация достаточно слаба и существенна только в дневное время. Ионизация определяется космическими лучами галактического и солнечного происхождения, наиболее энергичной частью солнечного рентгеновского спектра, излучением интенсивной солнечной линии Лайман- α и др. (разные источники ионизации наиболее эффективны на разных высотах атмосферы) [Данилов, 1978]. Отличительной особенностью этой области является большая плотность нейтральных частиц и слабоионизованная плазма с различного рода положительными и отрицательными ионами и ионами-связками, образующимися в результате сложных ионизационных и рекомбинационных процессов (см., например, [Данилов, 1978; Tomko et al., 1980; Mitra and Rowe, 1972] и цитируемую в них литературу). При существующей сложности физических процессов количество возможных методов ее исследования ограничено. Здесь для регулярных наблюдений обычно используются метод кросс-модуляции [Fejer, 1955; Гинзбург, 1967; Черногор, 1984], метод частичных отражений [Berlose and Burke, 1964; Иванов, 1985; Беликович и др., 2004], измерения с помощью МСТ-радаров [Gage and Green, 1982], эпизодически также используются запуски геофизических ракет [Пахомов и Князев, 1988]. В последнее время стал использоваться метод на основе создания искусственных периодических неоднородностей [Беликович и др., 1999; Беликович и Бенедиктов, 2002]. Однако эти мето-

ды не используются в комплексе, а каждый из них сам по себе не дает достаточного набора параметров, необходимых для определения существа процессов формирования и эволюции мезосферы. С этим связана нерешенность ряда еще существующих проблем. Например, стоит задача исследования возможного влияния на рекомбинационные процессы в *D*-области малых составляющих атмосферы, и в частности озона, который может быть фактором, способствующим образованию стабильных отрицательных ионов. Необходимо также более детально изучить влияние изменения температуры электронов и нейтральной компоненты на фотохимические, рекомбинационные и процессы турбулентной диффузии, определяющие свойства *D*-области, а также излучательные способности атомов и молекул.

Помимо изучения естественных факторов, влияющих на состояние мезосферы, в последние десятилетия развивались методы искусственного воздействия с помощью мощного КВ радиоизлучения, генерируемого специально построенными нагревными стендами. Это позволяет выполнять исследования, когда измерения проводятся с повторяемыми и контролируемыми свойствами создаваемых возмущений. Первые полученные здесь результаты по воздействию на нижнюю ионосферу приведены, например, в работе [Utlaut and Violet, 1974]. Позднее на основе численных расчетов было показано, что в дневных условиях мощная волна за счет омического нагрева электронов плазмы теряет значительную долю своей энергии в нижней ионосфере (*D*- и *E*-области), вызывая здесь при мощностях волны накачки

(ВН) $P_{эфф} \approx 100$ МВт увеличение температуры электронов в 5–10 и более раз на высотах 70–80 км и до 2-х раз на высотах ~60 км [Meltz et al., 1974; Иткина и Кротова, 1981; Enell et al., 2005; Гуревич и Шварцбург, 1973]. Как показали измерения, такое сильное увеличение температуры в D -области приводит к сильному уменьшению интенсивности УКВ рассеяния из мезосферы [Belova et al., 2003].

Основной задачей настоящей работы является изучение влияния контролируемого нагрева нижней (D - и E -областей) ионосферы мощным КВ радиоизлучением на характеристики содержания озона на высотах мезосферы.

В работе представлены результаты экспериментов по модификации ионосферы, которые проводились в 2008–2009 гг. на нагревном стенде “Сура” (ФГБНУ НИРФИ, г. Н. Новгород), расположенном около Васильсурска на расстоянии 120 км к востоку от Нижнего Новгорода [Караштин и др., 1999]. Их первоначальной целью было определение степени возмущения наименее изученной нижней части D -области ионосферы на высотах 50–60 км мощными КВ радиоволнами. В этих измерениях в качестве диагностического признака наличия такого влияния было выбрано изменение характеристик регистрируемого с этих высот микроволнового излучения в линии атмосферного озона на частоте 110836.04 МГц. Параллельно решалась также задача об измерении возможного влияния мощного радиоизлучения на содержание мезосферного озона. Первые такого рода эксперименты были выполнены на стенде “Сура” в августе 2008 г. Они показали наличие влияния мощного КВ радиоизлучения на измеряемое содержание озона на высотах ~60 км, однако из-за не совсем оптимальной используемой в них схемы измерений количественных результатов тогда не было получено. В марте 2009 г. эти эксперименты были проведены с учетом опыта ранее выполненных измерений.

Во второй части работы приводится описание эксперимента, выполненного в марте 2009 г., здесь также даны характеристики использованных средств для нагрева ионосферы и диагностики создаваемых возмущений. В третьей части работы рассмотрены полученные в этом эксперименте результаты. Их обсуждение и возможная интерпретация составляют содержание ее четвертой части. В конце работы приводятся выводы и предложения по развитию дальнейших исследований.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по модификации ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением, результаты которого рассматриваются в настоящей работе, были проведены на стенде “Сура” 14–19 марта

2009 г. Определение количества озона в верхней атмосфере выполнялось методом наземной микроволновой радиометрии, основанном на измерении и анализе формы спектра теплового излучения атмосферы в окрестностях линии вращательного перехода озона [Красильников и др., 2003; Kulikov et al., 2007].

Эксперимент был поставлен следующим образом. Нагревный стенд излучал под углом 12° от зенита на юг мощную радиоволну X -поляризации на минимально возможной для стенда частоте $f_0 = 4.3$ МГц; эффективная мощность излучения составляла $P_{эфф} = 80$ МВт. Частота и поляризация ВН были выбраны, исходя из условия обеспечения, по возможности, наиболее сильного нагрева нижней ионосферы [Иткина и Кротова, 1981; Гуревич и Шварцбург, 1973]. В направлении пучка мощных радиоволн была ориентирована антенна мобильного микроволнового озонометра для приема теплового излучения средней атмосферы на частоте 110.83604 ГГц. Эта частота соответствует вращательному переходу молекулы озона $6_0, 6-6_{1, 5}$, находящейся в основном колебательном состоянии. Озонометр состоит из гетеродинного приемника миллиметровых волн и многоканального спектрометра. На входе приемника находится модуль, который состоит из антенны (скалярный рупор) и переключающего устройства для калибровки уровня принимаемого из атмосферы излучения. Ширина диаграммы направленности рупорной антенны по уровню – 3 дБ имеет величину 5.4° , при этом диаметр области атмосферы, из которой регистрировалось микроволновое излучение, составляет ~6 км на высоте 60 км, что ~ в 2.7 раза меньше размеров возмущенной мощной радиоволной D -области (~16 км по уровню половинной мощности излучения). Озонометр имеет следующие характеристики: однополосная шумовая температура – 2500 К, полоса анализа – 240 МГц, спектральное разрешение – от 1 МГц до 10 МГц, число каналов – 32. В наблюдениях был использован метод абсолютной калибровки по двум эталонам излучения, один из которых находился при температуре окружающего воздуха, а другой – при температуре кипения жидкого азота.

Параметры прибора позволяют измерять спектр линии излучения озона в течение нескольких минут с точностью ~2%. По измеренному единичному спектру можно восстановить вертикальное распределение озона в интервале высот 20–60 км с точностью 5–20% в зависимости от имеющейся информации об атмосферных параметрах [Красильников и др., 2003; Kulikov et al., 2007]. Следует отметить, что, поскольку в наших экспериментах оценка вариаций профиля озона, по существу, базируется на относительных измерениях (сравниваются оценки профиля в естественной и нагретой мощной

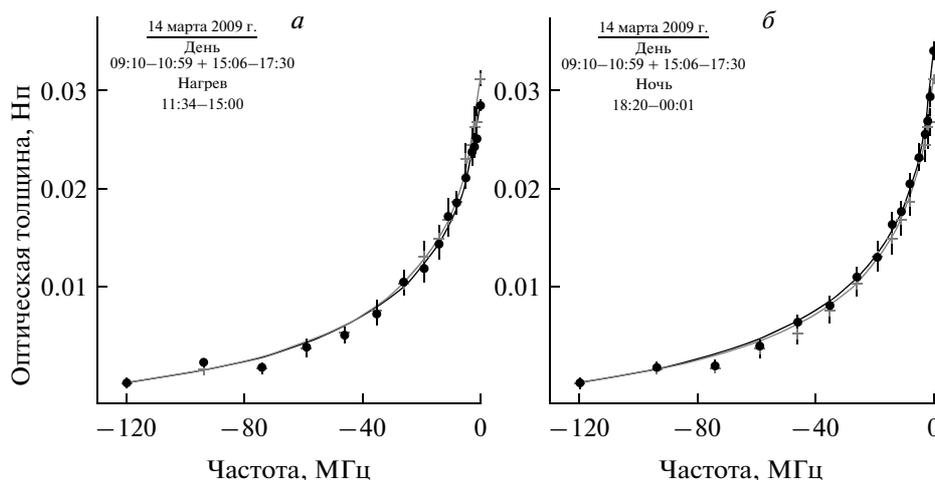


Рис. 1. Изменения спектра атмосферной линии озона при воздействии мощного КВ радиоизлучения на нижнюю ионосферу (панель *а*: кресты — спектр озона, измеренный днем в отсутствие нагрева ионосферы, заполненные кружки — спектр озона днем, усредненный по нескольким периодам нагрева); суточные изменения спектра озона, которые связаны с восходом и заходом Солнца (панель *б*: кресты то же, что и на панели *а*, заполненные кружки — спектр озона, измеренный ночью).

КВ волной атмосфере) сама величина изменения высотного профиля озона может быть получена с погрешностью не хуже, чем 5%.

Микроволновый озонметр с 14 по 19 марта был включен в режиме непрерывного измерения интенсивности теплового излучения средней атмосферы. Используемая в этих измерениях методика измерений позволяла получать спектры линии озона с временным разрешением 15 мин. Помимо искусственных вариаций, вызванных нагревом нижней ионосферы мощными КВ радиоволнами, в выполненных круглосуточных измерениях были также определены естественные фоновые вариации излучения страто-мезосферного озона, к которым относятся суточные колебания его содержания на высотах более 40 км, связанные с восходом и заходом Солнца [Hilsenrath, 1971].

Следует отметить, что измерения 14–19 марта выполнялись в спокойных ионосферных условиях, когда значения трехчасового Kp -индекса не превышали 3.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Работа стенда на нагрев ионосферы с помощью мощного КВ радиоизлучения выполнялась 14 марта с 11:30 до 15:00 мск (значение суммарного трехчасового Kp -индекса за сутки $\Sigma Kp = 18$), 15 марта с 12:11 до 14:41 мск ($\Sigma Kp = 15^+$), 16 марта с 12:01 до 14:31 мск ($\Sigma Kp = 10$) и 17 марта с 11:40 до 13:10 мск ($\Sigma Kp = 8^+$), в часы близкие к полуденным, когда наблюдается наиболее сильный D -слой. Видно, что за время измерений величина ΣKp постепенно уменьшалась, что должно было приводить к некоторому уменьшению электронной

концентрации в D -области [Данилов, 1978]. Включение стенда осуществлялось в режиме: 30 мин — излучение, 30 мин — пауза. Такой режим был выбран исходя из возможностей микроволнового озонметра, когда за время нагрева и паузы можно было получить с необходимым разрешением по два спектра атмосферной линии озона. В результате выполненных измерений было обнаружено уменьшение во время нагрева интенсивности теплового излучения атмосферы в линии озона на частоте 110.83604 ГГц в среднем на 10% по всем выполненным сеансам измерений.

На рисунке 1 приведены измеренные спектры атмосферной линии озона 14 марта, когда был осуществлен наиболее продолжительный по времени сеанс нагрева ионосферы в условиях наибольших значений ΣKp . На рисунке показана зависимость интенсивности атмосферной линии O_3 относительно частоты отстройки от 110836.04 МГц. Причем здесь приведено, только одно крыло линии, которое было получено усреднением высокочастотного и низкочастотного частей спектра, чтобы уменьшить ошибки измерений и получить более надежное свидетельство наблюдаемого эффекта. На левой панели рис. 1 сопоставлены дневной спектр линии излучения озона в отсутствие нагрева ионосферы мощным радиоизлучением стенда “Сура” и его же усредненный спектр по периодам нагрева; на правой панели рисунка представлены спектры линии озона в отсутствие нагрева ионосферы, полученные с усреднением за дневные и ночные часы наблюдений. Хорошо видно, что нагрев ионосферы приводит к заметному понижению интенсивности излучения в линии озона на отстройках $|\Delta f| \leq 40$ МГц относительно центральной частоты линии и тем больше,

Результаты вычислений содержания озона на высоте 60 км

Дата	Период измерений, мск	Вычисленная концентрация озона (см^{-3}) на высоте 60 км	Условия измерений
14.03.2009 г.	09:10–10:59	$(9.36 \pm 0.48) \times 10^9$	день
	11:34–15:00	$(7.74 \pm 0.27) \times 10^9$	нагрев
	15:05–17:30	$(9.08 \pm 0.42) \times 10^9$	день
	18:20–00:01	$(1.27 \pm 0.06) \times 10^{10}$	ночь
15.03.2009 г.	00:16–06:18	$(1.21 \pm 0.07) \times 10^{10}$	ночь
	06:18–12:14	$(9.60 \pm 0.50) \times 10^9$	день
	12:18–14:48	$(8.31 \pm 0.29) \times 10^9$	нагрев
	14:48–17:56	$(9.23 \pm 0.21) \times 10^9$	день
16.03.2009 г.	17:56–23:56	$(1.44 \pm 0.07) \times 10^{10}$	ночь
	00:11–05:05	$(1.37 \pm 0.07) \times 10^{10}$	ночь
	06:20–12:15	$(9.55 \pm 0.40) \times 10^9$	день
	12:19–14:33	$(7.31 \pm 0.46) \times 10^9$	нагрев
17.03.2009 г.	14:33–17:56	$(9.02 \pm 0.25) \times 10^9$	день
	17:56–23:47	$(1.19 \pm 0.06) \times 10^{10}$	ночь
	00:01–05:15	$(1.36 \pm 0.05) \times 10^{10}$	ночь
	06:13–11:43	$(9.82 \pm 0.35) \times 10^9$	день
	11:43–13:13	$(8.97 \pm 0.49) \times 10^9$	нагрев
	13:28–17:59	$(9.67 \pm 0.30) \times 10^9$	день
	18:02–23:45	$(1.22 \pm 0.05) \times 10^{10}$	ночь

чем меньше величина отстройки. Отметим, что именно мезосферный озон дает наибольший вклад в эту часть спектральной линии.

Оценка вертикального распределения озона по измеренным спектрам его атмосферной линии выполнялась методом подгонки [De la Noë et al., 1983], который основан на использовании априорной информации о характере вертикального распределения озона. Изменяя параметры заданного слоя озона, и используя методику последовательных приближений, добиваются минимального отличия расчетного спектра от экспериментального. Отметим, что при получении расчетных спектров в отсутствие нагрева ионосферы мощным радиоизлучением использовались модельные зависимости давления и температуры от высоты [Barnett and Corney, 1985]. Результаты вычислений измеренного содержания озона на высоте 60 км для всех дней наблюдений приведены в таблице. Отметим, что для уменьшения погрешности восстановления вертикального профиля озона было проведено усреднение по 6–8 спектрам линии, измеренным в одном цикле нагрева, что обеспечило погрешность оценки профиля озона не хуже, чем 5%. Приведенные в таблице данные измерений ясно демонстрируют эффект понижения измеренной концентрации озона во время нагрева ионосферы мощным КВ радиоизлучением. Величина такого понижения концентрации отно-

сительно ее дневных невозмущенных значений составляет в среднем 17% (1.17 ± 0.03) по всем дням наблюдений.

На рисунке 2 для выполненного 14 марта 2009 г. эксперимента представлены результаты измерений интенсивности линии озона, усредненные за время нагрева ионосферы мощным КВ радиоизлучением (черные прямоугольники) и за время паузы излучения ВН (белые прямоугольники). Хорошо видно, что каждое включение нагрева приводило к уменьшению интенсивности излучения, которая восстанавливается до своих дневных невозмущенных значений при его выключении. Среднее по всем дням наблюдений уменьшение интегральной интенсивности микроволнового излучения в линии озона составляло ~10% (при точности ее измерения 2%). Сплошными горизонтальными линиями на рис. 2 показаны средние значения интенсивности линии озона для дня и ночи, откуда видно, что средние ночные значения измеренного содержания озона на высоте 60 км превышают его дневные значения.

Средняя по всем дням наблюдений амплитуда суточного изменения рассчитанного содержания мезосферного озона здесь составила величину 42% (1.42 ± 0.03), что близко к обычно наблюдаемому его значению.

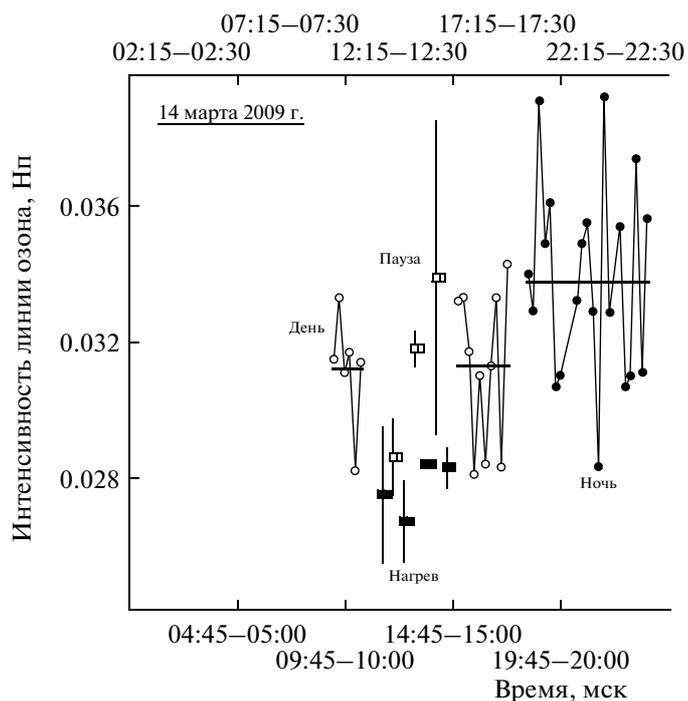


Рис. 2. Вариации интенсивности линии озона на частоте 110.8 ГГц во время нагревного эксперимента 14 марта 2009 г. Каждая точка на рисунке соответствует времени накопления ~ 15 мин.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Проведенные на стенде “Сура” эксперименты по модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением позволили обнаружить новое явление — уменьшение интенсивности микроволнового излучения в линии атмосферного озона на частоте 110.83604 ГГц. Расчеты вертикального профиля озона, выполненные на основе полученных экспериментальных данных, показали, что при мощности ВН $P_{эфф} = 80$ МВт нагрев ионосферы приводит к уменьшению измеренного с помощью микроволнового озонметра содержания мезосферного озона на высотах ~ 60 км в среднем на 17%. С окончанием воздействия содержание озона восстанавливается. Для сравнения, на высоте 60 км амплитуда суточных колебаний содержания мезосферного озона ото дня к ночи составила величину $\sim 40\%$ в этот же период наблюдений. Таким образом, вызванные нагревом ионосферы вариации измеренного содержания озона оказываются лишь только приблизительно в два раза меньше его суточных вариаций. Характерные времена уменьшения и восстановления интенсивности излучения были заведомо меньше 15 мин — временное разрешение получения данных.

Условия эксперимента (воздействие на дневную ионосферу волнами Х-поляризации) были таковы, что наиболее эффективно происходил

нагрев нижней ионосферы (ее D- и E-областей). При этом, согласно выводам работы [Гуревич и Шварцбург, 1973] и условиям нашего эксперимента, на высоте 60 км при отношении напряженности электрического поля ВН к плазменному полю ~ 1.2 рост температуры электронов может составить в зависимости от состояния D-области до (20–40)% относительно невозмущенного ее значения ~ 250 К. Однако ничтожное по сравнению с концентрацией нейтралов содержание электронов ($\sim 10^{-9}$) в D-области делает маловероятным прямое влияние увеличения их температуры в поле мощной радиоволны на свойства нейтральной компоненты.

Поэтому возникает задача выяснения механизма воздействия модифицированной мощной радиоволной ионосферы на нейтральную компоненту атмосферы (мезосферный озон).

В качестве возможного объяснения изменения интенсивности микроволнового излучения в линии озона при включении нагревного стенда может рассматриваться изменение плотности и температуры атмосферы при распространении внутренних гравитационных волн (ВГВ), возбуждаемых (усиливаемых) при нагреве ионосферы мощной КВ радиоволной. Факт возбуждения (усиления) ВГВ при работе стенда “Сура” был недавно установлен экспериментально [Бурмака и др., 2009].

Сделаем некоторые оценки эффективности такого влияния.

Независимо от способа возбуждения ВГВ при их распространении в атмосфере изменяются ее плотность ρ , давление p и температура T . Если задана частота ω гармонического источника ВГВ, то в предположении изотермической стратификации атмосферы и без учета диссипации возмущения, изменения различных параметров имеют характер неоднородных плоских волн вида

$$\frac{\Delta p}{p_0} \propto \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \propto \exp(-i\omega t + ikx + ikz + k_0 z). \quad (1)$$

При записи выражения (1) использована декартова система координат (x, y, z) , ось z которой направлена по вертикали против силы тяжести с ускорением $\mathbf{g}(0, 0, -g)$. Частота ω и компоненты волнового вектора $\mathbf{k}(k, 0, \kappa)$ в монохроматической волне связаны дисперсионным уравнением, которое в предположении несжимаемости среды ($\text{div} \mathbf{v} = 0$) имеет вид

$$\omega^2 = \frac{\omega_g^2 k^2}{k^2 + \kappa^2 + k_0^2}, \quad (2)$$

где $\omega_g^2 = g/H$, $k_0 = 1/2H$, H — высота однородной атмосферы. Как следует из уравнения (2), частота Брента-Вяйсяля ω_g является предельной для ВГВ. Численное ее значение при $g = 10$ м/с² и $H = 10$ км равно $\omega_g = 3.3 \times 10^{-2}$ с⁻¹, период $T_g =$

$= 2\pi/\omega_g \approx 3.2$ мин. Диссипация является слабой для больших длин волн, когда $k^2 + \kappa^2 \gg k_0^2$. В этих условиях уравнение (2) можно представить в виде $\omega = \omega_g \sin\theta$, где θ – угол, образованный вектором \mathbf{k} с вертикалью. Из выражения (2) следует анизотропный характер распространения ВГВ, они распространяются преимущественно в горизонтальном направлении. Предельный угол α (от горизонтали), где их еще можно наблюдать, определяется равенством $\text{tg}\alpha = \omega/\omega_g$. Более подробные сведения о ВГВ и связанных с ними перемещающимися ионосферных возмущений содержатся, например, в работах [Госсард и Хук, 1978; Григорьев, 1999].

В работе [Григорьев и Трахтенгерц, 1999] рассмотрено возбуждение ВГВ при работе мощных нагревных стендов в режиме временной модуляции их излучения. Идея этой работы очень проста. Оцениваются вариации токов $\Delta \mathbf{j}$ в динамо-области ионосферы, обусловленные меняющимся с заданной частотой $\omega < \omega_g$ нагревом, который вызывает модуляцию проводимости и электрического поля. Далее оцениваются возмущения в атмосфере под действием гармонического локализованного источника, которым является пондеромоторная сила $[\Delta \mathbf{j} \times \mathbf{H}_0]$ или омический нагрев плазмы. В работе [Григорьев и Трахтенгерц, 1999] оценены возмущения давления Δp атмосферы при мощности нагревного стенда $W = 80$ МВт. На высоте 110 км они могут достигать регистрируемых значений $\Delta p \approx 10^{-2} p_0$. По существу это такой же механизм генерации ВГВ, который действует в областях полярных токовых струй во время полярных магнитных бурь [Григорьев и Докучаев, 1969]. По своей природе близок к нему и механизм генерации комбинационных частот при воздействии на ионосферную токовую струю мощной модулированной по амплитуде волной (эффект Гетманцева) [Гетманцев и др., 1974].

Поляризационные соотношения для ВГВ дают связь Δp и $\Delta \rho$. Запишем ее в виде [Григорьев, 1999]

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{\Omega_0^2 + \gamma(i\kappa H - 0.5) \Delta p}{\gamma(\Omega_0^2 - 1) p} \quad (3)$$

где $\gamma = c_p/c_v$ – отношение теплоемкостей, $\Omega_0 = \omega/\omega_g$. Из этой формулы следует, что возмущения плотности $\Delta \rho/\rho_0$ могут существенно (например, на порядок) превышать приведенную выше величину $\Delta p/\rho_0$, если выполнены условия $\kappa H \gg 1$ и $\Omega_0 \ll 1$, так что для приведенных выше условий вполне возможны значения $\Delta \rho/\rho_0 \approx 0.1$.

Следует также отметить работу [Lee et al., 2004], в которой приведены результаты регистрации изменений максимальной концентрации электронов в F -области ионосферы и высоты максимума этой области после магнитной бури,

произошедшей 6–7 апреля 2000 г. Отмечено их противофазное изменение в пространстве от средних широт до экватора. Подъем максимума F -области сопровождался значительным уменьшением концентрации электронов. В этой работе не приведены подробные сведения о расчетах или измерениях нейтральной составляющей (кроме ветров). Но если учесть, что в силу слабой ионизации ионосферы плазму можно рассматривать как пассивную примесь к нейтральной составляющей, то пространственно-временные изменения примеси и основной среды совпадают. Поэтому справедливым является утверждение, что вместе с уменьшением концентрации плазмы происходило уменьшение концентрации и нейтральной компоненты. Указанный эффект наблюдался и подтвержден модельными расчетами для импульсного энерговыделения во время бури, продолжавшейся несколько часов.

После сделанных замечаний приведем некоторые соображения о связи вариаций интенсивности излучения и концентрации частиц. Если принять, что интенсивность излучения озона зависит от концентрации частиц n и температуры атмосферного газа T как $I \approx \eta f(T)$, то после линеаризации этой формулы получим выражение для относительного изменения $\Delta I/I$

$$\Delta I/I = \frac{\Delta n}{n_0} + \left(\frac{df}{dT} \right)_{T=T_0} \frac{\Delta T}{f(T_0)}. \quad (4)$$

Заметим, что в книге [Шефов и др., 2006] для $\Delta I/I$ приведено выражение для изменения интенсивности свечения в оптическом диапазоне атмосферных составляющих (кислорода, углекислого газа, озона и гидроксила) в виде

$$\Delta I/I = \eta \frac{\Delta T}{T}, \quad (5)$$

где численный коэффициент η изменяется в пределах от 2 до 4. Принимая зависимость интенсивности излучения от температуры в формуле (4) в виде $f = \exp(-E/kT)$, где E – энергия перехода с возбужденного уровня молекулы на равновесный уровень из формулы (4) получим

$$\Delta I/I = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta T}{T} \frac{E}{kT}, \quad (6)$$

где k – постоянная Больцмана, через Δp , Δn , ΔT обозначены отклонения от равновесных величин давления, концентрации и температуры, возникающие при распространении слабых ВГВ. В силу поляризационных соотношений для ВГВ [Госсард и Хук, 1978; Григорьев, 1999] при $\omega \ll \omega_g \kappa H \gg 1$ имеем $\Delta p/p \ll \Delta \rho/p$, так что $\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\Delta n}{n}$, а формула (6) преобразуется к виду

$$\Delta I/I = \frac{\Delta T}{T} \left(\frac{E}{kT} - 1 \right) = \frac{\Delta n}{n} \left(1 - \frac{E}{kT} \right). \quad (7)$$

Сопоставление формул (5) и (7) в этих условиях показывает их соответствие. Таким образом, если выбранная функция $f = \exp(-E/kT)$ хорошо моделирует зависимость интенсивности излучения от температуры, а энергия перехода между уровнями известна, то по формуле (6) легко связать изменение интенсивности излучения с изменением концентрации или плотности при прохождении ВГВ.

Сделаем два замечания по поводу приведенных оценок. Первое из них касается того обстоятельства, что результаты цитированной работы [Григорьев и Трахтенгерц, 1999] справедливы в волновой зоне на некотором удалении от источника. В нашем случае измерения производились в непосредственной близости от источника, при этом амплитуда возмущений атмосферных параметров должна превышать указанные в оценках значения. Во-вторых, требуются более точные оценки параметров возмущений, чем те, которыми мы воспользовались. Здесь уместно отметить результаты измерений вариаций атмосферного озона в условиях прохождения солнечного терминатора, когда происходит возбуждение ВГВ естественным образом [Kulikov et al., 2008].

Численные расчеты [Cot and Teitelbaum, 1980] указывают на возможность появления неоднородности в озоновом слое из-за терминаторной волны, которая возникает при восходе и заходе Солнца. Первое экспериментальное подтверждение воздействия терминаторной волны на структуру вертикального распределения озона появилось в работе [Sheldon et al., 1997]. При контактных измерениях озона в полете баллона на высоте 40 км обнаружено значительное (на 50%) понижение озона при восходе Солнца. Продолжительность снижения озона после восхода Солнца составила ~20 мин. Методом микроволновой радиометрии (временное разрешение 15 мин) были обнаружены вариации теплового излучения стратосферы (высоты 22–60 км) в линии озона с периодом ~25 мин. Продолжительность квазипериодического волнового процесса составила около двух–трех часов. Наибольшее по величине изменение озона было на высоте ~25 км. С ростом высоты величина изменения озона падала. Возможной причиной возникновения этого процесса является прохождение терминатора на восходе Солнца [Kulikov et al., 2008].

5. ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные эксперименты по воздействию на ионосферу мощными радиоволнами позволили, по-видимому, подтвердить разработанную физическую модель эффективно-силового источника для внутренних гравитационных волн [Григорьев и Трахтенгерц, 1999] и влияние его на вариации мезосферного озона.

Предложенная интерпретация наблюдаемого уменьшения интенсивности излучения в линии озона при облучении ионосферы мощным КВ радиоизлучением ни в коей мере нельзя считать полностью завершенной и еще требуется проведение дополнительных как экспериментальных, так и теоретических исследований, чтобы объяснить все его особенности.

В плане развития представленного в данной работе направления исследований необходимо выполнить новые эксперименты в различных геофизических условиях при различных режимах излучения ВН. При этом предполагается: а) выполнить измерения в более широком временном интервале, захватывая моменты захода и восхода Солнца в ионосфере, когда происходит рост и деградация *D*- и *E*-областей ионосферы; б) для повышения чувствительности и информативности измерений развернуть двухпозиционную систему наблюдений; в) уменьшить временное разрешение измерений вариаций интенсивности микроволнового излучения мезосферного озона с помощью модернизации приемника озонометра, чтобы по возможности более точно определить характерные времена наблюдаемого явления; г) определить зависимость величины наблюдаемого эффекта от мощности ВН и ее поляризации; д) выполнить измерения в различных геофизических условиях; е) дополнить выполняемые эксперименты измерениями с использованием метода частичных отражений с целью получения независимой дополнительной информации о степени возмущенности атмосферы на высотах нижней части *D*-области ионосферы, вызванной ее нагревом. Все это позволит детализировать механизмы обменных процессов в мезосфере Земли, построить более полную эмпирическую и теоретическую модели эффекта вариации интенсивности микроволнового излучения в линии озона в нагревных экспериментах, и, в конечном итоге, развить новые методы диагностики до сих пор, наименее изученной нижней части ионосферы.

Авторы благодарят за поддержку РФФИ (гранты № 08-05-99047, № 08-02-00171, № 09-05-01041, № 09-05-10033 и № 09-05-97014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 156 с. 1999.
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Исследование сумеречной *D*-области ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 45. № 6. С. 502–508. 2002.
- Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е. Исследования ионосферы методом частичных отражений //

- Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 2. С. 189–194. 2004.
- Бурмака В.П., Домнин И.Ф., Урядов В.П., Черногор Л.Ф. Вариации параметров рассеянных сигналов и ионосферы, сопутствовавшие воздействию на плазму мощным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 52. № 11. С. 859–880. 2009.
- Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 685 с. 1967.
- Гетманцев Г.Г., Зуйков Н.А., Котик Д.С. и др. Обнаружение комбинационных частот при взаимодействии мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой // Письма в ЖЭТФ. Т. 20. С. 229–232. 1974.
- Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир. 532 с. 1978.
- Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. №1. С. 3–25. 1999.
- Григорьев Г.И., Докучаев В.П. Генерация ионосферных возмущений переменными токами полярных широт // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 9. № 4. С. 650–654. 1969.
- Григорьев Г.И., Трахтенгерц В.Ю. Излучение внутренних гравитационных волн при работе мощных нагревных стенов в режиме временной модуляции ионосферных токов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 6. С. 90–94. 1999.
- Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 272 с. 1973.
- Данилов А.Д. Популярная аэрономия. Л.: Гидрометеоздат, 136 с. 1978.
- Иванов В.А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений. Йошкар-Ола: МПИ. 196 с. 1985.
- Иткина М.А., Кротова З.Н. Изменение параметров нижней ионосферы под действием мощного радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 24. С. 415–419. 1981.
- Караштин А.Н., Комраков Г.П., Токарев Ю.В., Шлюгаев Ю.В. Радиолокационные исследования на стенде Сура // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 8. С. 765–779. 1999.
- Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Щитов А.М. Микроволновые приемники для диагностики малых газовых составляющих земной атмосферы // Изв. РАН. Сер. Физическая. Т. 67. С. 1788–1792. 2003.
- Пахомов С.В., Князев А.К. Озон в мезосфере и электронная концентрация среднеширотной области D // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. № 6. С. 976–979. 1988.
- Черногор Л.Ф. Исследование нижней ионосферы методом импульсной кроссмодуляции // Геофизический журнал. Т. 6. № 5. С. 46–58. 1984.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
- Barnett J.J., Corney M. Middle atmosphere reference model derived from satellite data // Handbook for MAP. V. 16. P. 47–85. 1985.
- Belova E., Chilson P.B., Kirkwood S., Rietveld M.T. The response time of ionospheric heating to PMSE // J. Geophys. Res. V. 108. № D8. P. 8446, doi: 10.1029/2002JD002385, 2003.
- Berlose J.S., Burke M.J. Study of the lower ionosphere using partial reflections. 1. Experimental technique and methods of analysis. // J. Geophys. Res. V. 69. P. 2799–2818. 1964.
- Cot C., Teitelbaum H. Generation of gravity waves by inhomogeneous heating of the atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 42. № 9/10. P. 877–883. 1980.
- De la Noë J., Baudry A., Perault M. et al. Measurements of the vertical distribution of ozone by ground-based microwave techniques at the Bordeaux Observatory during the June 1981 Intercomparison Campaign // Planet. Space Sci. V. 16. P. 737–741. 1983.
- Enell C.-F., Kero A., Turunen E. et al. Effects of D-region RF heating studied by the Sodankyla Ion Chemistry model // Ann. Geophysicae. V. 23. P. 1575–1583. 2005.
- Fejer J.A. The interaction of pulsed radio waves in the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 7. № 6. P. 322–332. 1955.
- Gage K.S., Green J.L. A technique for determining the temperature profile from VHF radar observations // J. Appl. Meteor. V. 21. P. 1146–1149. 1982.
- Hilsenrath E. Ozone measurements in the mesosphere and stratosphere during two significant geophysical events // J. Atmos. Sci. V. 28. P. 295–297. 1971.
- Kulikov Y.Y., Demkin V.M., Krasilnikov A.A. Fast variations of thermal emission of middle atmosphere in a line of ozone at frequency 110.8 GHz on plateau Shatshatmas–Kislovodsk // 31st Annual Apatity Seminar “Physics of Auroral Phenomena”. Abstracts. Apatity. P. 72–73. 2008.
- Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Shchitov A.M. New mobile ground-based microwave instrument for research of stratospheric ozone (some results of observation) // MSMW’07 Conf. Proc. V. 1. P. 62–66. 2007.
- Lee C.C., Liu J.Y., Chen M.Q. et al. Observation and model comparisons of the traveling atmospheric disturbances of the Western Pacific region during the 6–7 April 2000 magnetic storm // J. Geophys. Res. V. 109, A09309, doi: 10.1029/2003JA010267, 2004.
- Meltz G., Holway L.H., Tomlyanovich N.M. Ionospheric heating by powerful radio waves // Radio Sci. V. 9. P. 1049–1063. 1974.
- Mitra A.P., Rowe J.N. Ionospheric effects of solar flares – VI. Changes in D-region ion chemistry during solar flares // J. Atmos. Terr. Phys. V. 34. P. 795–806. 1972.
- Sheldon W.R., Benbrook J.R., Amedieu P. Ozone depletion in the upper stratosphere at the down terminator // J. Atmos. Terr. Phys. V. 59. № 1. P. 1–7. 1997.
- Tomko A.A., Ferraro A.J., Lee H.S., Mitra A.P. A theoretical model of D-region ion chemistry modifications during high power radio wave heating // J. Atmos. Terr. Phys. V. 42. P. 275–285. 1980.
- Utlaut W.F., Violett E.J. A summary of vertical incidence radio observations of ionospheric modulation // Radio Sci. V. 9. P. 805–903. 1974.