

ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ ПРИ РАБОТЕ НАГРЕВНЫХ СТЕНДОВ

*Ю.И. Зецер, Ю.С. Рыбнов, А.Т. Ковалев, И.Х. Ковалева,
О.П. Попова, В.А. Харламов*

В статье рассмотрены вопросы генерации низкочастотных волновых возмущений в атмосфере-ионосфере при работе нагревных стендов. Приведены результаты натурных наблюдений за низкочастотными колебаниями давления на поверхности Земли. В целом ряде экспериментов зарегистрировано появление волнового импульса при работе передатчика нагревного стенда в режиме Х-моды. Предложена простая модель для оценки движения формирующейся нагретой области газа на высоте 80÷120 км. Разработана модель отклика ионосферы на данное возмущение в виде крупномасштабных колебаний плотности плазмы на высотах 200 км и выше. Основной механизм переноса плазмы на указанных высотах осуществляется с помощью ионно-циклотронных дрейфовых солитонов, рождающихся на градиенте плотности. Проведён тестовый расчёт развития ионосферного колебательного возмущения. Теоретические оценки удовлетворительно совпадают с результатами натурных наблюдений.

Введение

Исследования процессов нелинейного взаимодействия мощного коротковолнового радиоизлучения с ионосферной плазмой, приводящих к возрастанию температуры нейтральной компоненты плазмы [Гуревич, 1974; Григорьев, 1975] были начаты в 70-х гг. Если нагрев нейтралов достаточно интенсивен, то это может привести к генерации внутренних гравитационных волн (ВГВ) благодаря подъему и остыванию прогреваемой области [Григорьев, 1975]. Возникающие ВГВ распространяются в различных направлениях, в том числе могут достигать поверхности Земли [Григорьев, 1999], а также вызывать возмущения в вышележащих слоях

ионосферы, в том числе распространяющиеся на большие расстояния. В настоящей работе представлены результаты комплексных исследований низкочастотных волновых возмущений нейтральной среды и ионосферной плазмы, возникающих при работе нагревного стенда.

Возмущения давления на поверхности Земли при работе нагревного стенда

Измерения колебаний давления у поверхности Земли при работе нагревного стенда Сура (56.15 с.ш.; 46.12 в.д.) проводились в районе п. Новая Жизнь расположенного приблизительно в 25 км на юг от стенда. Для измерений использовались микробарометры, имеющие следующие технические характеристики:

- полоса регистрируемых частот – $3 \cdot 10^{-4} \div 10$ Гц;
- динамический диапазон – $0,05 \div 200$ Па

Вся информация записывалась фрагментами по 180 мин с частотой дискретизации 20 Гц. Синхронизация записей и привязка к точному времени осуществлялась от приемника GPS.

С 2007 по 2011 гг. было проведено 9 сеансов наблюдений. В 6 сеансах, когда передатчик работал в режиме излучения в течение $30 \div 50$ мин, были зарегистрированы характерные импульсы давления. Нагревный стенд работал на несущей частоте 4785 кГц в X-моду, при эффективной излучаемой мощности 750 МВт.

На рис. 1 приведены три часовых фрагмента исходных записей (сплошные линии), синхронизованные по началу работы стенда в 11:00 московского времени, для 06.07.2009, 07.07.2009 и 08.07.2009 [Попова, Рыбнов, 2010]. Через 5–7 мин после начала работы стенда наблюдался небольшой подъем давления с последующим значительным уменьшением давления, достигающим минимума через ~5 мин. После чего в течение ~5 минут происходило восстановление давления до первоначального уровня, сопровождающееся более высокочастотными колебаниями. Импульсы давления, зарегистрированные в разные дни, удовлетворительно совпадали друг с другом, как по началу вступления, так и по длительности. Длительность импульса атмосферного давления составляла ≈ 10 мин, а амплитуда импульса не превышала 1 Па (рис. 1).

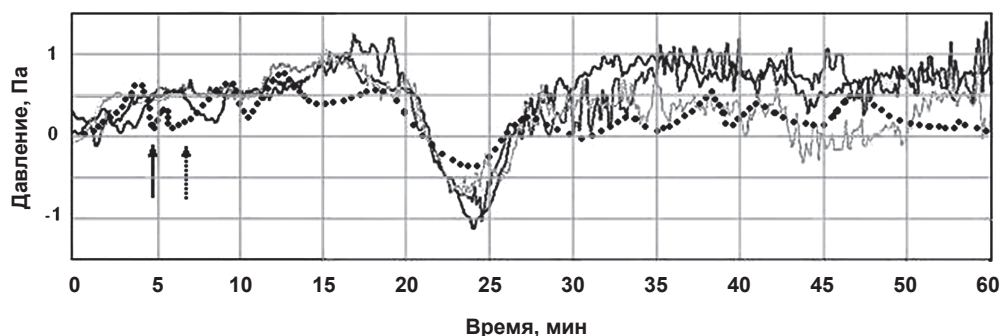


Рис. 1. Колебания давления, измеренные на поверхности Земли при работе нагревного стенда Сура на расстоянии 25 км от стенда в июле 2009 г (сплошные кривые) и при работе нагревного стенда HIPAS на расстоянии 35 км от стенда (точечная кривая).

Соответствующими стрелками показано время начала работы стендов.

Регистрация возмущений давления на поверхности Земли проводилась и при работе нагревного стенда HIPAS (65.0 с.ш.; 213 в.д.) на расстоянии 35 км от стенда [Minami et al., 1999]. Нагревный стенд работал на частоте 2,85 МГц с эффективной излучаемой мощностью 80 МВт в режиме: 10 мин нагрев – 10 мин пауза. Так же как и на Сура был зафиксирован импульс изменения давления амплитудой менее $\approx 0,6$ Па, сопровождавшийся низкочастотными колебаниями с периодом ≈ 10 мин (рис. 1). Были определены высота источника возмущений и скорость их распространения – ≈ 90 км и ≈ 210 м/с соответственно. Как видно из рис. 1 в экспериментах на нагревных стендах Сура и HIPAS наблюдается подобие как волновых форм импульсов, так и их параметров.

Кроме того, в сентябре 2009 г., был проведен ряд измерений на расстоянии 480 км от нагревного стенда Сура [Попова, Рыбнов, 2010]. Сигнал был зарегистрирован 21, 22 и 25 сентября (начало работы стенда 9:00 московского времени, X-мода, эффективная излучаемая мощность 750 МВт). Характерные измеренные импульсы давления приведены на рис. 2. Сопоставление рисунков 1 и 2 показывает, что длительности импульсов давления увеличиваются с расстоянием от источника [Hines, 1960; Hunsaker, 1982] при сохранении их формы, что косвенно может свидетельствовать в пользу того, что источником возмущения является нагревный стенд и колебания давления соответствуют ВГВ.



Рис. 2. Колебания давления, измеренные на поверхности Земли при работе нагревного стенда Сура на расстоянии 480 км от стенда в сентябре 2009 г.

Как правило, ВГВ регистрировались в утренние часы, при этом перед началом сеанса нагрева ионограммы демонстрировали присутствие увеличенных электронных концентраций на высотах 100–120 км (см. ионограмму, рис. 3) в виде E или E-спорадических слоев. Во всех случаях отсутствия E или E-спорадических слоев ВГВ не наблюдалось. Как показано в [Blanc, 1984; Francis, 1973; Hines, 1960], колебания атмосферы наиболее эффективно возбуждаются на высотах $\approx 80\div 120$ км. Можно предположить, что необходимым условием эффективного формирования и всплытия нагретой области нейтрального газа является наличие E или Es слоя.

Следует отметить, что в работе [Mishin et al., 2012] сообщается о наблюдении атмосферных гравитационных волн (в принятой терминологии – ВГВ), возможно вызванных работой нагревного стенда HAARP (62.4 с.ш.; 214.9 в.д.), в F₂ области ионосферы. Авторы [Mishin et al., 2012] утверждают, что источник возмущений так-

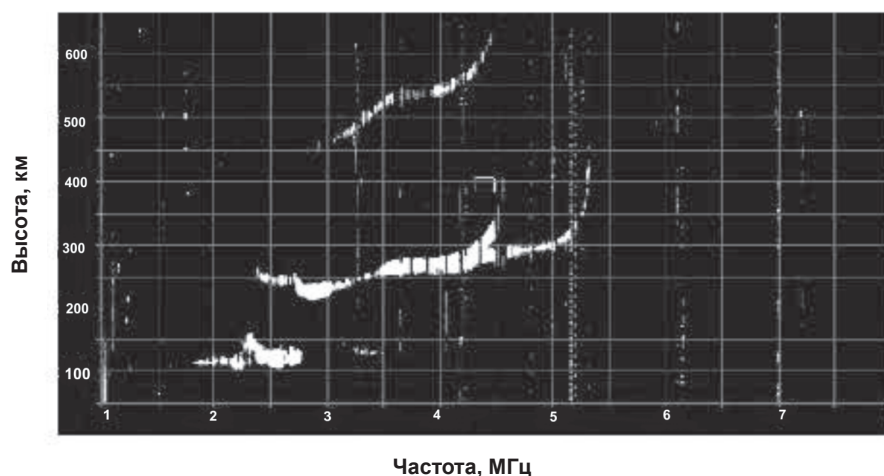


Рис. 3. Ионограмма перед сеансом нагрева, 08:57 22 сентября 2009 г.
Соответствующие колебания давления приведены на рис. 2.

же располагается в F_2 области ионосферы. Можно предположить, что существуют разные механизмы возбуждения атмосферных возмущений.

Движение нагретой области газа

В основе дальнейшего рассмотрения лежит гипотеза о том, что регистрируемые возмущения вызываются всплытием нагретой стеном области нейтрального газа. Характер движения объема нагретой области во времени можно оценить по упрощенной газодинамической модели, в которой предполагается, что нагреваемая область имеет сферическую форму с начальным радиусом r_0 с вовлечением окружающего газа (коэффициент вовлечения α). При расчете подъема такой нагретой области решалась система уравнений [Гостинцев, Шацких, 1987], в которую входят уравнения торможения, изменения массы и плавучести области. Результаты расчетов для следующих исходных данных: высота нагрева – 110 км, радиус нагретой области – 10 км, приведены на рис. 4.

Расчеты показывают, что при данных условиях нагретая область сместится вверх от начальной высоты нагрева на $\approx 9,7$ км (новое положение равновесия) при максимальной скорости смещения ≈ 19 м/с. Нагретая область, поднимаясь и опускаясь, возбуждает внутреннюю гравитационную волну и совершает несколько затухающих колебаний на высоте зависания (рис. 4). Модельные эксперименты по движению термиков в стратифицированной по плотности среде [Заславский, Юрьев, 1999] также показывают, что всплывающий термик поднимается чуть выше уровня нулевой плавучести, затем опускается и разрушается, совершив несколько затухающих колебаний с частотой Брента-Вайсяля. Вызванные таким движением колебания давления, которые могут достичь поверхности Земли, соответствуют по форме колебаниям скорости (рис. 4, серая кривая), имеющим ярко выраженный начальный импульс с последующим затуханием. Период колебаний составляет ≈ 9 мин, что согласуется с наблюдаемой длительностью зарегистрированного импульса давления (рис. 1).



Рис. 4. Зависимость от времени смещения и вертикальной скорости области газа, нагретой на начальной высоте 110 км.

Следует отметить, что имеется определенное отличие модельной волновой формы (рис. 4, серая кривая) от зарегистрированных колебаний (рис. 1), в которых затухание носит аperiодический характер. Это может быть связано неучетом диссипации энергии в рассматриваемой модели и линеаризацией исходных уравнений.

Оценим амплитуду ожидаемых возмущений у поверхности Земли. Энергию нагретой сферы радиуса r_0 , если задано изменение температуры нейтральных частиц ΔT , можно оценить как:

$$W = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_0 C_p \Delta T,$$

где C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении. В работах [Буш и др., 1977; Цикулин, 1969; Reed, 1972] исследованы процессы распространения колебаний давления от высотных источников и приведены несколько отличающиеся оценки амплитуды возмущений давления на поверхности, основанные на теории энергетического подобия [Губкин, 1978]. Используя предложенные в работах соотношения можно оценить амплитуду колебаний давления на поверхности Земли от источника с энергией W . Для источника радиусом 10 км с $\Delta T \sim 1^\circ\text{K}$, расположенного на высоте 110 км, амплитуда колебаний может лежать в диапазоне $0,4 \div 1,5$ Па, что по порядку величин соответствует измеренным импульсам давления (рис. 1, 2).

Таким образом, оценки подтверждают предложенный механизм генерации ВГВ при работе нагревного стенда, который не противоречит экспериментальным данным.

Реакция ионосферы на движение нагретой области

Всплытие нагретой области вызывает возмущение плотности плазмы на высотах ионосферы 100–150 км, способное активизировать ионосферные волновые возмущения, которые распространяются от точки возбуждения по ионосфере. В основе дальнейшего рассмотрения лежит гипотеза о том, что возмущения нейтральных

составляющих ионосферной плазмы внутренними гравитационными волнами возбуждают низкочастотные колебания ионных компонент в гораздо большем диапазоне высот, распространяющиеся на большие расстояния от источника. Формирование вторичного волнового возмущения обусловлено плазменными механизмами переноса вещества. Дальнейшее движение моделировалось методом, подробно рассмотренным в работе [Ковалева, Ковалев, 2012]. В модели магнитогидродинамическое рассмотрение дополнено дополнительным переносом плазмы поперек силовых линий магнитного поля ионно-циклотронными градиентно-дрейфовыми солитонами. Этот дополнительный перенос реализуется включением в модель элементов метода песочной горки, когда при превышении порога по градиенту плотности ионизованных компонент плазмы поперек силовых линий магнитного поля возбуждаются солитоны, движущиеся против направления градиента и переносящие зарядово-нейтральные сгустки плазмы. Амплитуды солитонов зависят от направления ионосферного электрического поля. Солитоны распространяются перпендикулярно направления ионосферного дрейфа, определяемого направлением электрического поля поперек геомагнитного. Это должно формировать возмущение, направление движения которого определяется суточными вариациями электрического поля и его вариациями, обусловленными геофизической обстановкой (наличием суббурь или других крупномасштабных возмущений ионосферы). При этом даже вблизи источника возбуждения возмущение должно демонстрировать асимметрию по различным направлениям.

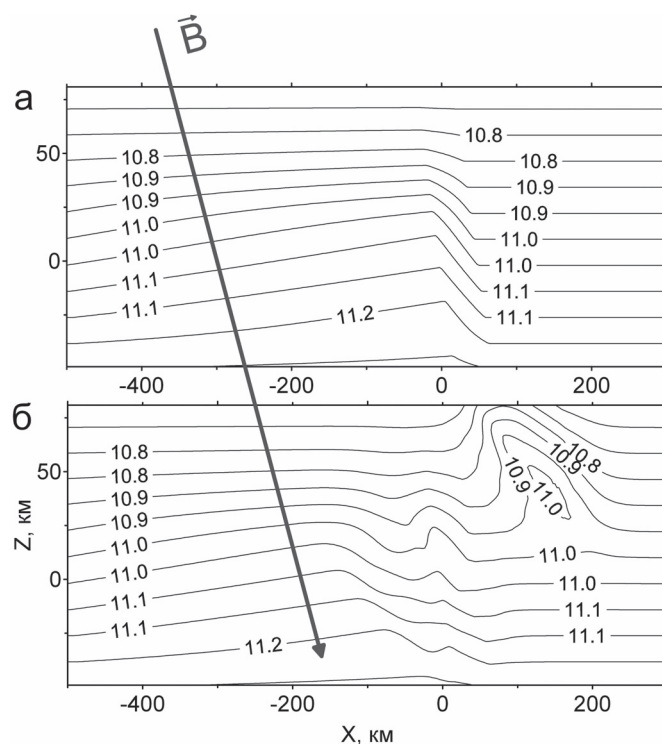


Рис. 5. Модельный расчет распределения плотности плазмы по высоте ионосферы (-50 км положение источника): (а) – первоначальное распределение плотности ионов; (б) – результат движения.

Данный механизм реализуется на вертикальном градиенте ионов NO^+ , модифицирует высотный профиль плотности плазмы, формируя характерные, наклонно ориентированные (за счёт движения солитонов примерно поперек силовых линий поля) сгустки плотности. Пример результата модельного расчёта, иллюстрирующий данную конфигурацию распределения плотности плазмы, приведён на рис. 5. На верхней панели первоначальное распределение плотности ионов NO^+ , на нижней – результат движения. Общий высотный профиль плотности плазмы формируется сложением данного распределения с высотным профилем ионов O^+ .

Регистрация изменений интенсивности сигнала со спутника «Космос 2407» при его прохождении через возмущенную область в меридиональной плоскости позволила определить распределение плотности плазмы в ионосфере при работе нагревного стенда Сура [Kunitsyn et al., 2012]. Был зарегистрирован подъем области возмущений до высот F-области (200–400 км). Наблюдалась асимметрия в развитии возмущений на север и на юг, расстояние между максимумами плотности составляло порядка 200 км.

В предложенной модели воспроизводится подъем области возмущения от первоначальной высоты, формирование периодической структуры сгустков плотности плазмы на расстояниях порядка 200 км. В модели также объясняется асимметрия север-юг; поскольку перенос солитонов зависит от направления ионосферного электрического поля и обусловлен наклоном геомагнитного поля.

Выводы

Выполненные исследования показывают, что при воздействии нагревных стендов на E-область ионосферы может сформироваться область нагретого газа, который, поднимаясь и опускаясь в стратифицированной среде, возбуждает интенсивную внутреннюю гравитационную волну. Генерация ВГВ подтверждается измерениями колебаний давления у поверхности Земли, амплитуда и период которых удовлетворительно согласуются с теоретическими оценками.

Всплытие газа, нагретого на высотах E-области, может вызывать возмущение плотности плазмы на больших высотах ионосферы (≥ 150 км), способное, в свою очередь, возбуждать характерные волновые возмущения плотности плазмы на высотах F-области.

Для подтверждения предлагаемого механизма формирования термосферно-ионосферного возмущения необходимо проведение дальнейших экспериментальных и теоретических исследований в данном направлении.

Литература

Буш Г.А., Иванов Е.А., Куличков С.Н., Педанов М.В. Некоторые результаты по регистрации акустических сигналов от высотных взрывов // Физика атмосферы и океана: Изв. АН СССР. т. 33, № 1, С. 67–71. 1977.

Гостинцев Ю.А., Шацких Ю.В. О механизме генерации длинноволновых акустических возмущениях в атмосфере всплывающим облаком продуктов взрыва // Физика горения и взрыва. № 2, 1987. С. 91–97.

Григорьев Г.И. О перемещающихся ионосферных возмущениях, возникающих при работе мощных передатчиков // Радиофизика: Изв. высших учебных заведений, т. XVIII, № 12, 1975. Р. 1801–1804.

- Григорьев Г.И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Радиофизика: Изв. ВУЗов. 1999. Т. XLII. № 1. С. 3–25.
- Губкин К.Е.* О подобии взрывов // Физика Земли: Изв. АН СССР. № 10, С. 49–60. 1978.
- Гуревич А.В.* О нагреве нейтральной компоненты нижней ионосферы в поле мощной радиоволны // Геомагнетизм и аэрономия, № 1, 1974. С. 161–163.
- Заславский Б.И., Юрьев Б.В.* О движении термиков в стратифицированной атмосфере // Прикладная механика и теническая физика. Т. 40, № 5, 1999. С. 33–39.
- Ковалева И.Х., Ковалев А.Т.* Перемещение крупномасштабных возмущений ионосферы с помощью нелинейных ионно-циклотронных градиентно-дрейфовых волн // настоящий сборник.
- Попова О.П., Рыбнов Ю.С.* Экспериментальные исследования пульсаций атмосферного давления в приземном слое атмосферы от нагревного стенда // Динамические процессы в геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2010. С. 269–274.
- Цикулин М.А.* Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. М.: Наука, 1969. с. 88.
- Blanc E.* Interaction of an Acoustic Wave of Artificial Origin with the Ionosphere as Observed by HF Sounding at Total Reflection Levels // Radio Science, 19, 653, 1984.
- Francis S.H.* Acoustic-gravity modes and large-scale traveling ionospheric disturbances of a realistic dissipative atmosphere // J. Geophys. Res., 1973, v. 78, № 13, p. 2278–2301.
- Hines C.O.* Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys., 1960, v. 38, № 11, p. 1441–1481.
- Minami S., Nishino M., Suzuki Y., Sato S., Tanikawa T., Nakamura Y., Wong A.Y. and UCLA HIPAS Group.* Ionospheric stimulation by high power radio waves // Adv. Space Res. Vol. 24, № 8, p. 997–1001, 1999.
- Mishin E., Sutton E., Milikh G., Galkin I., Roth C., Forsters M.* F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams // Geophysical Research Letters, V. 39, L11101, doi:10.1029/2012GL052004, 2012.
- Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., et al.* Sounding of HF Heating-Induced Artificial Ionospheric Disturbances by Navigational Satellites Radio Transmissions // Radio Science, 2012, V. 47, RS0L15, 13PP., doi:10.1029/2011RS004957.
- Reed J.W.* Air blast overpressure decay at long ranges // J.Geoph.Res. V. 77, № 9, P. 1623–1629. 1972.