

Генерация атмосферных гравитационных волн солнечным терминатором по данным измерений на спутнике “Atmosphere Explorer-E”

Г. В. Лизунов, А. К. Федоренко¹

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
пр. Академика Глушкова, 6, г. Киев, 03022, Украина
E-mail: liz@ikd.kiev.ua*

*¹Институт космических исследований НАНУ-НКАУ,
пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680, Украина
E-mail: aurora@space.is.kiev.ua*

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2005 г.

По данным прямых спутниковых измерений исследован динамический отклик нейтральных и ионизированных компонент верхней атмосферы на прохождение терминатора. Проанализированы наблюдения на “Atmosphere Explorer-E” за период, когда спутник находился на круговой околоэкваториальной орбите с наклоном $i = 19.7^\circ$ и высотой $250 \div 300$ км. Установлено, что на терминаторе происходит генерация крупномасштабных атмосферных гравитационных волн (АГВ) и перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) с параметрами: горизонтальная длина волны – $1200 \div 1600$ км; вычисленный период – около 50 мин; длительность волнового цуга – четыре-шесть периодов; относительная амплитуда АГВ – до нескольких процентов; относительная амплитуда ПИВ утром – до нескольких процентов, вечером – до десятков процентов, причем колебания концентрации основного иона O^+ происходят в противофазе, а молекулярных ионов NO^+ и O_2^+ в фазе с колебаниями концентраций основных нейтральных компонент N_2 , O . На основе теории распространения АГВ в многокомпонентной газовой среде дана интерпретация экспериментальных результатов. Показано, что амплитудные и фазовые отличия колебаний атмосферных компонент, включая основной ион O^+ , вызваны различием их вертикальных распределений выше турбопаузы. Предложен механизм генерации АГВ и ПИВ на высотах F-области за счет градиента электронного давления на терминаторе.

Введение

Возможность генерации атмосферных гравитационных волн (АГВ) солнечным терминатором (СТ) теоретически предсказана в работе [1]. Отклик, который АГВ вызывает в заряженной компоненте верхней атмосферы, – перемещающееся ионосферное возмущение (ПИВ) – исследовался экспериментально методами наземного

ионосферного зондирования (см. [2, 3] и библиографию к этим статьям). В настоящей работе впервые исследованы волновые процессы “терминаторного” происхождения по результатам прямых спутниковых измерений. Геометрию спутникового эксперимента иллюстрирует рис. 1. Относительно Солнца терминатор и орбита спутника неподвижны. Атмосфера вращается вместе

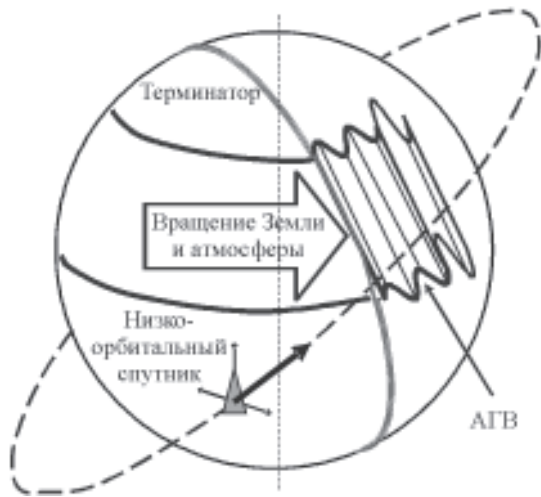


Рис. 1. Схема спутникового эксперимента по наблюдению атмосферно-ионосферных возмущений от терминатора. Орбита спутника, линия терминатора и генерируемая терминатором волновая структура неподвижны друг относительно друга

с Землей, что может приводить к возбуждению колебаний в набегающем на терминатор воздушном потоке. Как видно из рис. 1, на каждом орбитальном витке спутник пересекает терминатор и генерируемое им возмущение по одной и той же траектории. Это позволяет наблюдать терминаторные волнообразные процессы многократно с периодичностью вращения спутника.

Эксперименты с синхронной регистрацией параметров нейтральных и ионизированных компонент атмосферы осуществлялись в 70-х–80-х гг. на космических аппаратах (КА) серии Atmosphere Explorer, Dynamic Explorer и др. [4]. Для настоящей работы были использованы наблюдения на КА “Atmosphere Explorer-E” (АЕ-Е) за период, когда спутник находился на круговой орбите с высотой $h = 250 \div 300$ км и наклоном $i = 19.7^\circ$. Такая орбитальная конфигурация хорошо подходит для изучения процессов на терминаторе. Спутник находился на сравнительно небольшой высоте и из-за малого наклона орбиты пересекал весь цуг волн, генерируемых

терминатором (рис. 1). Большинство более поздних “ионосферных” спутников, включая современный DEMETER, запускались на высоты $600 \div 1000$ км, т. е. выше области существования АГВ.

Геометрически оптический СТ представляет собой границу, разделяющую освещенную и затененную Землей части атмосферы. На высоте 300 км угол наклона оптического терминатора к горизонтали равен примерно 10° , толщина области полутени – 55 км, экваториальная скорость терминатора относительно земной поверхности $V_{СТ} = 450$ м/с. Область генерации АГВ и ПИВ (назовем ее физическим терминатором), как будет видно ниже из данных наблюдений, отстоит от оптического терминатора на восток и характеризуется шириной $L \sim 1500$ км (примерно в один часовой пояс). Структуру оптического и физического терминаторов иллюстрирует рис. 2.

Механизмы поглощения солнечного излучения, приводящие к возбуждению атмосферных колебаний, описаны в работах [5, 6]. При больших зенитных углах Солнца (на терминаторе более 90°) основной поток энергии коротковолнового излучения диссипирует на высотах выше 200 км. Как будет показано в разделе 3 настоящей работы, АГВ имеют сравнительно небольшую групповую скорость, вследствие чего их излучение вверх и вниз из области максимального поглощения солнечной радиации не объясняет происхождения возмущения

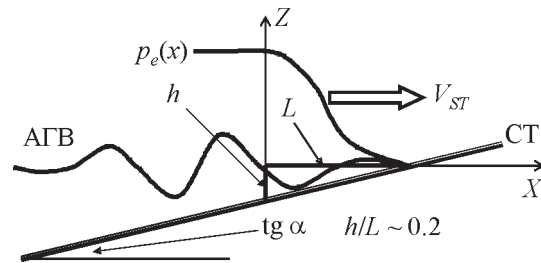


Рис. 2. Структура утреннего терминатора: X и Z – горизонтальная и вертикальная оси, p_e – электронное давление

ний на других высотных уровнях. Колебания атмосферных слоев на разных высотах генерируются терминатором независимо.

Настоящая работа имеет следующую структуру. Первый раздел посвящен описанию методики обработки спутниковых данных. В разделе 2 представлены конкретные примеры волновых возмущений на терминаторе. В разделе 3 предложен новый механизм генерации атмосферных колебаний в области терминатора. Теоретическая интерпретация экспериментальных результатов приведена в разделе 4.

1. Методика обработки данных

Данные наблюдений на спутнике АЕ-Е взяты из базы данных “National Space Science Data Center” <<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/atmoweb>>. В качестве информативных параметров атмосферы на высотах области F2 выбраны:

- концентрации основных нейтральных составляющих $n[\text{O}]$ и $n[\text{N}_2]$;
- температура нейтральных частиц T_n ;
- концентрация n_e и температура электронов T_e ;
- концентрации ионов $n[\text{O}^+]$, $n[\text{NO}^+]$, $n[\text{O}_2^+]$.

Для поиска генерируемых терминатором квазиволновых возмущений был использован специальный алгоритм обработки данных. Поскольку фазовая скорость АГВ (сотни метров в секунду) мала по сравнению с орбитальной скоростью спутника $V_{\text{sat}} \approx 8$ км/с, частота регистрируемого квазиволнового возмущения ω' в основном определяется пространственным спектром длин волн. Оцениваемая частота может быть представлена в виде: $\omega' = \omega - k_x V_{\text{sat}} \approx -k_x V_{\text{sat}}$, где ω – частота АГВ в покоящейся системе отсчета, $k_x = 2\pi/\lambda_x$ – компонента волнового вектора вдоль траектории спутника, λ_x – соответствующая длина волны. Дискретность отсчета t_{sampl} бортовых данных измерений накладывает ограничения на минимально различимую со спутника длину волны λ_{min} .

В случае с КА АЕ-Е $t_{\text{sampl}} = 15$ с, откуда $\lambda_{\text{min}} = 2V_{\text{sat}}t_{\text{sampl}} = 240$ км. Максимальная длина волны зависит от алгоритма спектрального анализа. Мы ставили целью наблюдение и измерение характеристик крупномасштабных АГВ и ПИВ, длины волн которых достигают $\lambda_{\text{max}} \sim 2000$ км [7, 8].

Главная проблема, с которой приходится сталкиваться при проведении спектрального анализа, состоит в выделении квазипериодических вариаций на фоне резких перепадов измеряемых параметров. Рассмотрим в качестве примера ситуацию, возникающую в утренней ионосфере. После прохождения терминатора на протяжении нескольких часов в F-области концентрация заряженных частиц возрастает более чем на порядок величины. Одновременно на фоне плавного изменения концентрации наблюдается “мелкая рябь”, вызванная волновой активностью терминатора. Чтобы в таких условиях обнаружить ПИВ и корректно измерить его характеристики, применялась методика детрендрования исходных данных, описанная, например, в [9]. Мы вычитали “медленную” (низкочастотную) вариацию измеряемых параметров из исходной последовательности данных. Это приводило к потере информации об атмосферных неоднородностях с масштабами $L > \lambda_{\text{max}}$, обусловленных главным образом суточным ходом параметров. После процедуры детрендрования производился спектральный анализ высокочастотной составляющей.

2. Анализ событий

Анализ данных КА АЕ-Е показал, что в утренние часы после восхода Солнца (примерно в интервале 6:00 ÷ 11:00 местного времени (LT)) и вечером после захода (19:00 ÷ 24:00 LT) происходит усиление волновой активности, проявляющееся в квазипериодических вариациях плотности и температуры различных сортов атмосферных газов.

На рис. 3 представлен типичный пример волнового возмущения на утреннем терминаторе. После исключения крупномасштабных трендов, выделяются вариации в нейтральной (АГВ) и заряженной

(ПИВ) компонентах с относительными амплитудами $\frac{\delta n[\text{O}]}{n[\text{O}]} \sim 5\%$, $\frac{\delta n[\text{O}^+]}{n[\text{O}^+]} \sim 10\%$. Отметим, что концентрации основных компонент нейтрального газа колеблются син-

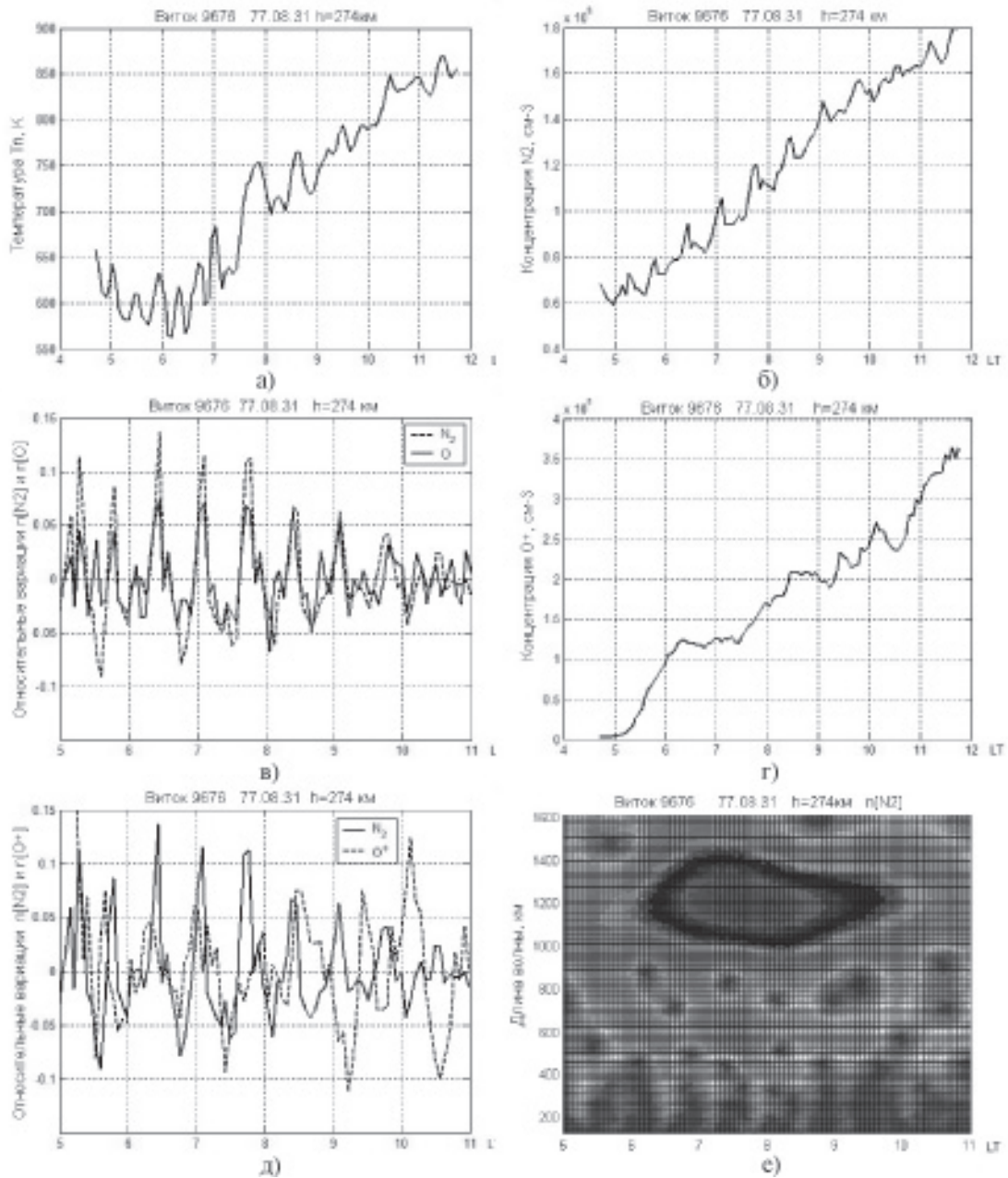


Рис. 3. Ход атмосферных параметров в области утреннего терминатора на витке 9676 КА АЕ-Е в зависимости от местного времени (LT): а), б), в) – исходное поведение параметров T_n , $n[\text{N}_2]$ и $n[\text{O}^+]$; г) – относительные вариации нейтральных компонент; д) – относительные вариации нейтральной и ионной компонент; е) – амплитудный вейвлет-спектр вариаций $n[\text{N}_2]$

фазно, но с различными относительными амплитудами (отношение амплитуд ~ 2). Вейвлет-преобразование позволяет выделить пространственный масштаб колебаний ($\lambda_x = 1250$ км) и временной интервал,

в котором наблюдается волновая активность (6:00 ÷ 10:00 LT).

Другой пример возмущения на утреннем терминаторе приведен на рис. 4. Как и в предыдущем случае, наблюдаются

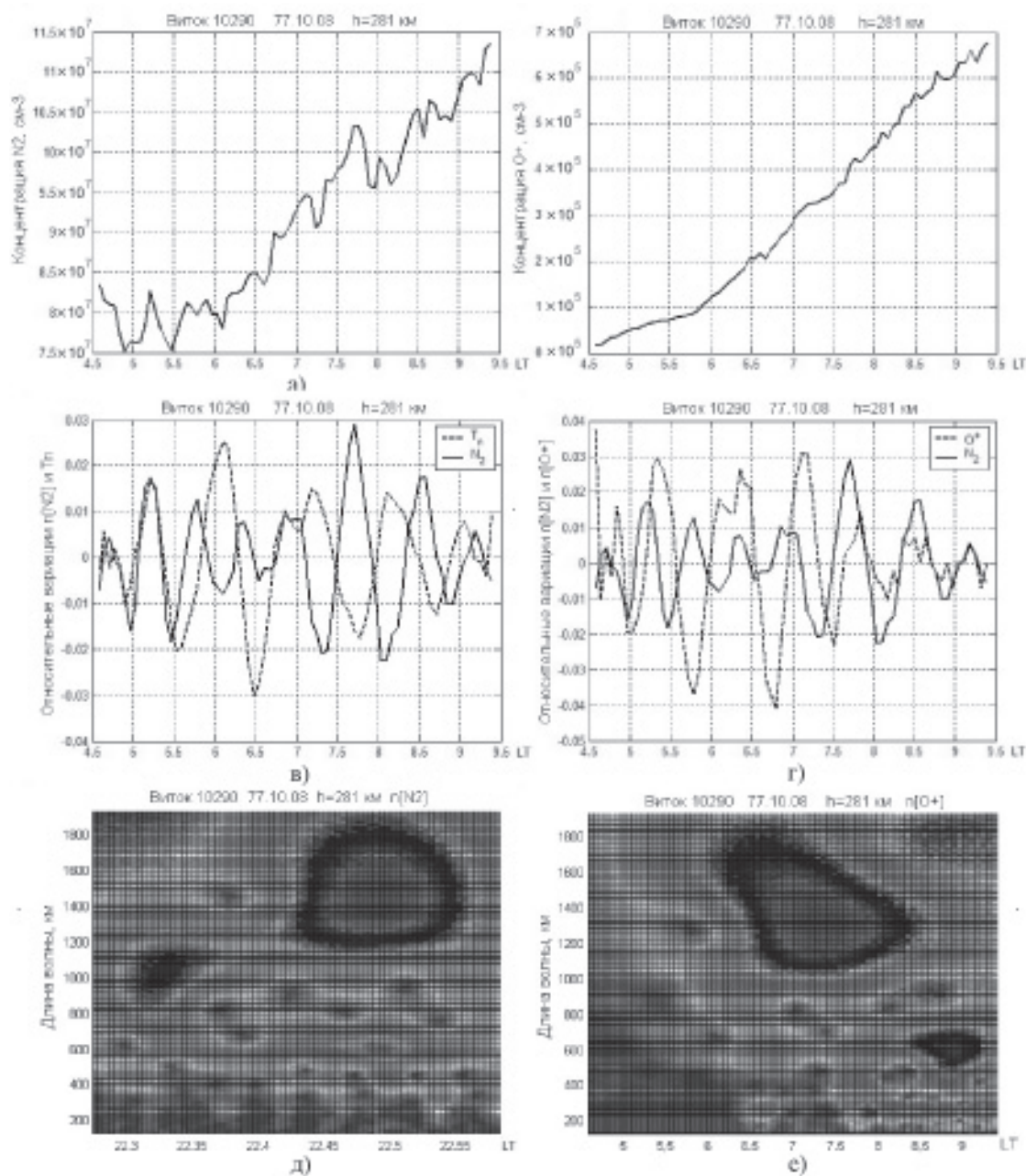


Рис. 4. Вариации атмосферных параметров в области утреннего терминатора на витке 10290 КА АЕ-Е: а), б) – исходное поведение $n[N_2]$ и $n[O^+]$; в) – относительные вариации плотности и температуры нейтральных частиц; г) – относительные вариации нейтральных частиц и ионов; д), е) – амплитудные вейвлет-спектры $n[N_2]$ и $n[O^+]$

значительные тренды параметров, особенно в заряженной компоненте. Заметим, что в пределах волнового цуга (5:30 ÷ 8:30 LT) относительные вариации концентраций нейтральных частиц происходят примерно в противофазе с колебаниями температуры, относительные вариации концентраций ионов в несколько раз превышают вариации нейтральных частиц. Горизонтальные длины волн составляют $\lambda_x = 1400 \div 1500$ км.

Пример возмущения от вечернего терминатора показан на рис. 5. После исключения тренда выделяются относительные вариации в нейтральной и заряженной компонентах с характерным масштабом $\lambda_x \approx 1400$ км.

Концентрация основного иона $n[O^+]$ изменяется в противофазе с концентрациями $n[O_2^+]$ и $n[NO^+]$, которые практически “отслеживают” по амплитуде и фазе колебания основных нейтральных компонент.

Было проанализировано несколько десятков событий на терминаторе. В таблице представлены восемь событий, для которых есть одновременные измерения параметров как ионизированных, так и нейтральных компонент. Для утренних и вечерних событий длины волн, длительности волновых цугов, относительные амплитуды АГВ примерно совпадают. Главным отличием вечерних событий является большая амплитуда плазменного отклика.

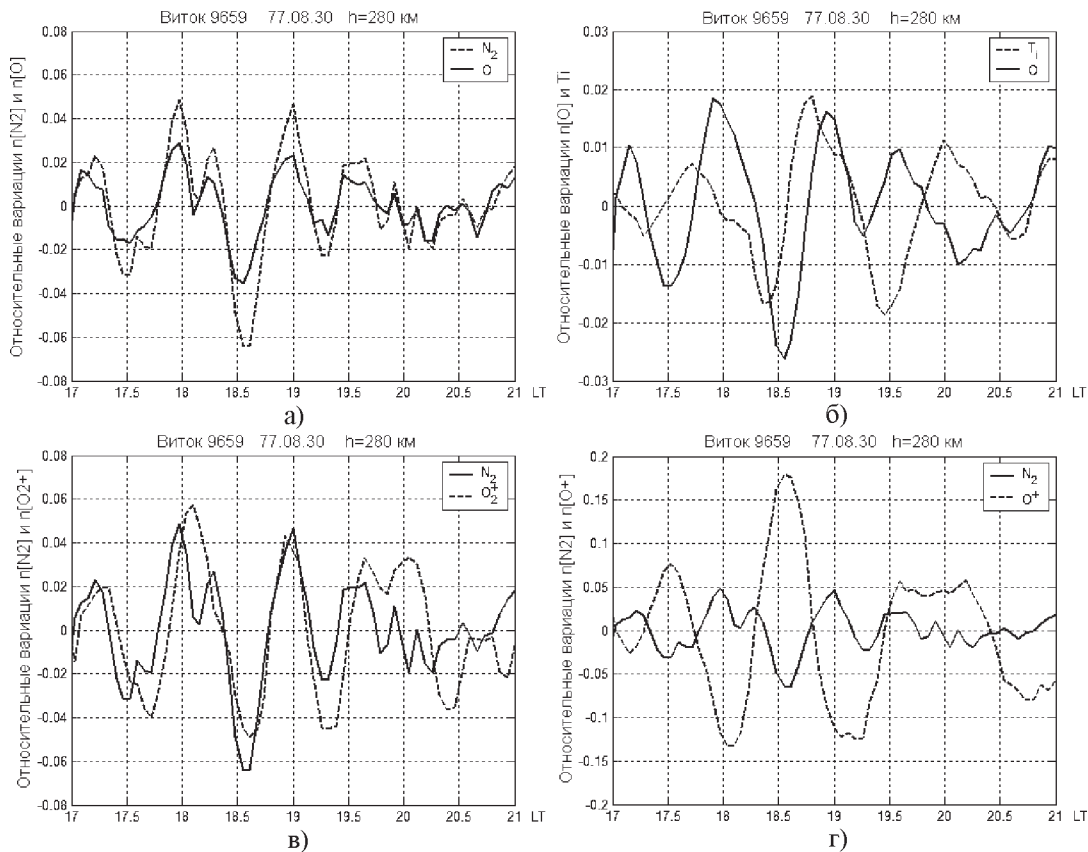


Рис. 5. АГВ и ПИВ на вечернем терминаторе (19:00 ÷ 21:00 LT): а), б) – относительные вариации плотности основных нейтральных составляющих и температуры ионов; в), г) – взаимосвязь относительных вариаций концентраций разных сортов ионов и $n[N_2]$

Таблица. Параметры атмосферных возмущений в области терминатора по данным КА АЕ-Е. Обозначения: h – высота орбиты, T_n – температура нейтральных частиц, V_z – вертикальная скорость газа, λ_x – горизонтальная длина волны АГВ и ПИВ

Дата	Виток	h , км	LT, ч	Относительные флуктуации, %						V_z , м/с	λ_x , км
				$n[\text{N}_2]$	$n[\text{O}]$	T_n	$n[\text{O}^+]$	$n[\text{NO}^+]$	$n[\text{O}_2^+]$		
Вечерний терминатор											
23.04.77	7581	255	20 ÷ 1	4	2	2	20	–	–	5	1400, 2800
23.04.77	7583	255	20 ÷ 3	6	3	3	15	–	–	7	1440
30.08.77	9659	280	19 ÷ 24	5	3	–	20	5	5	10	1600
Утренний терминатор											
19.04.77	7514	257	4 ÷ 11	3	1.5	1	1	–	–	5	1600
28.07.77	9135	266	4 ÷ 11	–	–	3	10	–	–	–	1500
31.08.77	9676	274	5 ÷ 11	10	5	5	10	–	–	–	1250
08.10.77	10290	281	4.5 ÷ 9.5	3	2	2	3	–	–	–	1400
19.03.78	12874	317	6 ÷ 11	2	1	1	3	2	2	–	1300

3. Механизм генерации АГВ на утреннем терминаторе

На высотах орбиты КА АЕ-Е ионы составляют малую примесь к нейтральным частицам ($n[\text{O}^+]/n[\text{O}] \sim 10^{-4}$), соответственно кинетическая энергия колебаний сосредоточена в движениях преимущественно нейтрального газа. Обычно АГВ служат источником ионосферных возмущений, а не наоборот. Согласно данным КА АЕ-Е, в области терминатора мы сталкиваемся с достаточно необычной ситуацией, когда запас энергии электронного газа, образующегося в процессе фотоионизации, настолько велик, что может обеспечить генерацию неоднородностей не только в плазменной, но и в нейтральной компоненте атмосферы.

Обратим внимание на следующие экспериментальные факты: колебания, генерируемые терминатором, в высокой степени монохроматичны, выделенная длина волны составляет $\lambda_x \approx 1500$ км (период около 50 мин); колебания нарастают за терминатором резко, размер области генерации, по-видимому, не превышает длины волны. Картина выглядит так, как если бы терминатор создавал “жесткую” преграду для набегающего на него

воздушного потока. Мы искали атмосферный параметр, перепад которого мог бы служить источником наблюдаемых возмущений (физическим терминатором). По данным КА АЕ-Е таким параметром является давление электронного газа.

На рис. 6, а представлен ход электронного давления $p_e = k_B n_e T_e$ в области утреннего терминатора (k_B - постоянная Больцмана). Генерация и разогрев плазмы происходит на фронте фотоионизационного процесса, служащего источником электронов с энергиями порядка десятков электрон-вольт. Термализация сверхтепловых электронов за время $\nu_{ee}^{-1} \sim 10^{-3} \div 1$ с [10] приводит к резкому повышению p_e за терминатором. Следующие соображения подсказывают, что этот процесс может приводить к черенковскому возбуждению атмосферных колебаний. Во-первых, насколько можно судить по данным наблюдений, возрастание давления электронного газа совпадает с началом цуга АГВ. Во-вторых, размеры области, в которой происходит перепад электронного давления, $L \approx 1500$ км (на рис. 6, а – около часа), близки к длине волны, $\lambda_x \sim L$; это согласуется с представлением о том, что наиболее эффективно генерируются длины волн

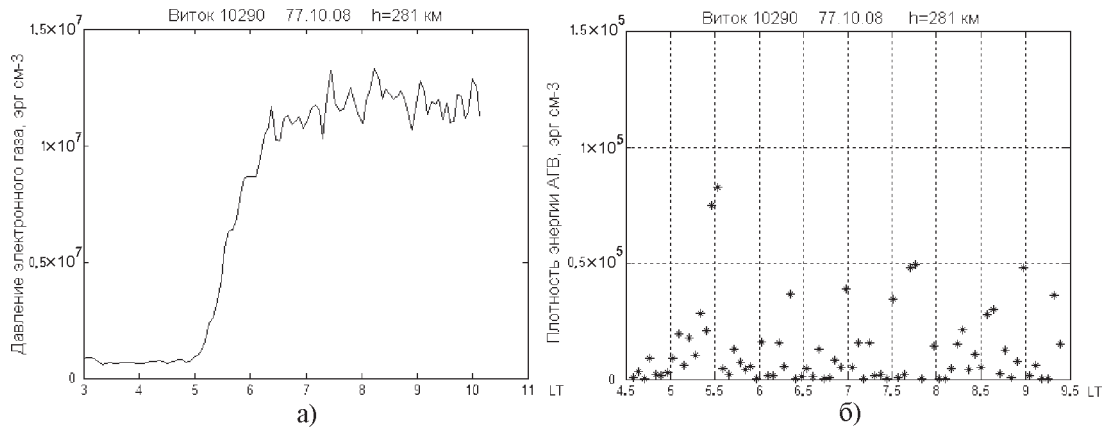


Рис. 6. а) Перепад давления электронного газа в области утреннего терминатора. б) Распределение плотности кинетической энергии колебаний нейтральных частиц

порядка размеров источника. В-третьих, плотность тепловой энергии, заключенной в электронном газе, которая численно равна его давлению, достаточно велика, чтобы обеспечить регистрируемые амплитуды АГВ. На рис. 6, б представлено распределение мгновенной плотности кинетической энергии атмосферных колебаний $\epsilon = \rho V_n^2 / 2 = \delta p_n$ (где ρ , V_n – концентрация и скорость основной нейтральной компоненты О, δp_n – вариация давления нейтрального газа под действием АГВ). Как видно, на протяжении всего цуга колебаний $p_e > \delta p_n$.

Оценим характеристики волн, генерируемых терминатором по описанному механизму. Горизонтальная фазовая скорость АГВ равна [11]

$$\frac{\omega}{k_x} = \frac{c_g}{\sqrt{1 + (\lambda_*/\lambda)^2}}, \quad (1)$$

где λ – длина волны; $\lambda_* = 4\pi H$, H – приведенная высота атмосферы; $c_g = 2[\sqrt{\gamma - 1}/\gamma]c_s$, γ – показатель адиабаты, c_s – скорость звука. На высотах орбиты Ка АЕ-Е $\lambda_* \sim 600$ км, $c_g \sim 600$ м/с. Условие черенковского излучения имеет вид:

$$\frac{\omega}{k_x} = V_{ST} \approx 450 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Из (1), (2) следует оценка длины волны: $\lambda = 350$ км. Сопоставляя эту величину с экспериментальным значением $\lambda_x \sim 1400$ км, находим направление распространения АГВ относительно горизонтали: $\theta = \arccos\left(\frac{\lambda}{\lambda_x}\right) \approx 78^\circ$.

При этом период волны равен $T = \frac{2\pi}{\omega} \approx 50$ мин, что примерно совпадает с величиной регистрируемого периода. Это подтверждает, что, в согласии с условием черенковского излучения (2), АГВ движется синхронно с терминатором.

Вертикальная групповая скорость АГВ равна

$$V_{gz} = \frac{\partial \omega}{\partial k_z} = -c_g \frac{(\lambda_*/\lambda)^2 \sin \theta \cos \theta}{(1 + (\lambda_*/\lambda)^2)^{3/2}} \approx 65 \text{ м/с},$$

что несколько меньше скорости вертикального движения терминатора $V_{STz} \approx 80$ м/с относительно поверхности Земли. С учетом геометрии задачи (рис. 2) нетрудно оценить запаздывание, с которым АГВ, генерируемые на одном высотном уровне, достигают других уровней. Оказывается, что распространение энергии АГВ происходит достаточно медленно, вследствие чего колебания

атмосферы на разных высотах возбуждаются терминатором независимо.

Из-за малого угла наклона терминатора к горизонту импульс силы, создаваемый градиентом электронного давления, направлен приближенно вниз. Оценка амплитуды АГВ следует из уравнения движения

$$\rho V_{ST} \frac{\partial}{\partial x} V_{nz} = -\frac{\partial}{\partial z} p_e \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A \equiv \frac{\delta \rho}{\rho} \sim \frac{V_{nz}}{V_{Tn}} \sim \frac{\delta p_e}{p_n} \frac{V_{Tn}}{V_{ST}} \operatorname{ctg} \alpha,$$

где ρ , V_{Tn} – плотность и тепловая скорость нейтральной компоненты; V_{nz} – вертикальная скорость; $\alpha \approx 10^\circ$ – угол наклона поверхности терминатора; $\delta \rho$ – амплитуда вариаций плотности в АГВ; A – относительная амплитуда волны. Для условий измерений на КА АЕ-Е $A \sim 10^{-2}$, что по порядку величины согласуется с экспериментальным значением (см. рис. 3-5).

4. Теория распространения АГВ в многокомпонентной атмосфере

Теории АГВ в многокомпонентной среде посвящены работы [12, 13], где показано, что амплитуды и фазы колебаний разных сортов газов отличаются между собой. Экспериментально этот эффект был обнаружен по данным спутника Atmosphere Explorer-C и описан в работах [14, 15]. Рассмотрим подробно механизм изменения плотности воздуха при распространении АГВ. Фаза сжатия АГВ возникает из-за всплытия воздуха из нижележащего более плотного слоя атмосферы. Аналогично фаза разрежения АГВ возникает вследствие погружения менее плотного вышележащего слоя.

Предположим, что движение элементарного объема воздуха (воздушной частицы) происходит настолько медленно, что его давление успевает сравняться с давлением окружающей атмосферы. Тогда изменение плотности воздушной частицы во времени определяется уравнением:

$$\delta \rho_s(t) = c_s^{-2} \delta p_s(t) = c_s^{-2} \delta(p_0 e^{-z(t)/H}) \approx$$

$$\approx -\frac{\delta z(t)}{\gamma H} \rho(z),$$

где c_s – скорость звука; $p(z) = p_0 e^{-z/H}$; $\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H}$ – барометрические распределения давления и плотности атмосферы; p_s , ρ_s – давление и плотность воздушной частицы; $\delta z = \delta z(t)$ – ее вертикальное смещение. Вариация плотности атмосферы на заданной высоте определяется разницей между плотностью всплывшего вещества $\rho_s(z) = \rho(z - \delta z) + \delta \rho_s$ и невозмущенной плотностью $\rho(z)$:

$$\delta \rho(t) = \rho_s(z) - \rho(z) = \delta \rho_s - \delta(\rho_0 e^{-z/H}) \approx$$

$$\approx \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\delta z(t)}{H} \rho,$$

откуда

$$\frac{\delta \rho(t)}{\rho} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\delta z(t)}{H}. \quad (3)$$

Последнее соотношение связывает относительную амплитуду АГВ $A = \delta \rho / \rho$ с амплитудой вертикального смещения частиц δz .

Повторяя рассуждения для газа сорта “i” и учитывая, что при расширении и сжатии газовой смеси плотности отдельных компонент изменяются пропорциональным образом, $\delta \rho_{si} / \rho_{si} = \delta \rho_s / \rho_s$, и что выше турбопаузы газы распределены с индивидуальными приведенными высотами атмосферы H_i [16], получим:

$$\frac{\delta \rho_i}{\rho_i} = \left(\frac{H}{H_i} - \gamma^{-1} \right) \frac{\delta z}{H} = \frac{\gamma H}{H_i} \frac{1}{\gamma - 1} \frac{\delta \rho}{\rho}. \quad (4)$$

Соотношения (3), (4) выведены с учетом упрощающих предположений, среди которых

главными являются следующие: распространение АГВ не нарушает гидростатического распределения атмосферного давления $p(z) = p_0 e^{-z/H}$, $p(x, y) = \text{const}$; различные атмосферные газы движутся в АГВ как единое целое. Более строгая теория [12, 17] приводит к несущественным для дальнейшего рассмотрения количественным поправкам к выражениям (3), (4).

На высотах 250 ÷ 300 км, где производились измерения, основной компонентой атмосферы является атомарный кислород (его содержание составляет около 90 %), определяющий приведенную высоту многокомпонентной атмосферы $H \approx H_O \approx 50$ км и показатель адиабаты $\gamma = 5/3$ (одноатомного газа). При характерной амплитуде АГВ $A = \frac{\delta n[\text{O}]}{n[\text{O}]} \sim 0.02$ амплитуда вертикального смещения атмосферных слоев согласно (3) равна $\delta z \sim 2$ км. Далее по уровню содержания следуют молекулярный азот и гелий в соотношении $n[\text{O}] : n[\text{N}_2] : n[\text{He}] = 100 : 10 : 1$, соотношение соответствующих высот однородных атмосфер $H_O : H_{\text{N}_2} : H_{\text{He}} = 1 : 1.75 : 0.25$. Согласно (4) амплитуды возмущений отдельных газов могут быть оценены как

$$\frac{\delta n[\text{N}_2]}{n[\text{N}_2]} \approx 3 \frac{\delta n[\text{O}]}{n[\text{O}]}, \quad \frac{\delta n[\text{He}]}{n[\text{He}]} \approx -\frac{\delta n[\text{O}]}{n[\text{O}]},$$

что хорошо согласуется с данными измерений на КА АЕ-Е. Отметим, что колебания плотности гелия происходят в противофазе с колебаниями основной компоненты.

На некоторых витках спутника проводились измерения вертикальной компоненты скорости нейтральных частиц V_z (см. таблицу), что позволяет вычислить период регистрируемых АГВ непосредственно из экспериментальных данных. Поскольку $V_z = \delta \dot{z} = i\omega \delta z$, соотношение (3) связывает частоту, относительную амплитуду АГВ и вертикальную скорость частиц:

$$\omega = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{V_{zm}}{H} A^{-1}, \quad (10)$$

где V_{zm} – амплитуда колебаний вертикальной скорости. Вычисленные отсюда периоды АГВ составляют 50 ÷ 55 мин, что хорошо согласуется с теоретическими оценками, приведенными в предыдущем разделе.

Эти расчеты, показывающие насколько различен отклик газовых составляющих на распространение АГВ, дают ключ к пониманию и плазменных вариаций. Напомним, что относительные возмущения ионной плотности обычно превышают возмущения нейтральных частиц. Особенно ярко “усиление” АГВ в ионной компоненте наблюдается в ночном полушарии, где относительные амплитуды вариаций плотности ионов достигают десятков процентов.

Как известно, в ночных условиях пополнение F-области плазмой происходит за счет опускающихся из внешней ионосферы ионов O^+ . Фотохимические потери O^+ при участии молекул азота в области высот 200 ÷ 300 км приводят к формированию “крутого” вертикального профиля ионосферного распределения $n_p(z)$ [16]. Динамику концентрации основного иона описывает уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial n[\text{O}^+]}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}_D \cdot n[\text{O}^+]) = -an[\text{N}_2] \cdot n[\text{O}^+], \quad (5)$$

где V_D – скорость регулярного дрейфа плазмы, $a \sim 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ – коэффициент потерь ионов на нейтральных частицах [16], величина $\tau = (an[\text{N}_2])^{-1}$ – время жизни иона O^+ . Полагая, что плазма опускается вертикально ($\vec{V}_D = -\vec{e}_z \cdot V_D$), находим квазистационарное распределение плотности иона O^+ в ночной ионосфере:

$$n[\text{O}^+] = n_p(z) = n_{p0} \exp \left\{ \frac{H_{\text{N}_2}}{H_p} \left(1 - e^{(z_0 - z)/H_{\text{N}_2}} \right) \right\},$$

где $H_p = (an[\text{N}_2])^{-1} \Big|_{z=z_0} \cdot V_D$ – длина пути дрейфа иона O^+ за время жизни τ ; H_{N_2} – шкала высот молекулярного азота; z_0 – высота, на которой задается концентрация

n_{p0} . Вблизи ионосферного максимума уравнение вертикального распределения (5) аппроксимируется экспоненциальной функцией:

$$n_p(z) \approx n_{p0} \exp\left\{\frac{z-z_0}{H_p}\right\} \quad \text{при } |z-z_0| < H_{N_2}. \quad (6)$$

Таким образом, H_p играет роль вертикального масштаба плазменного распределения (приведенной высоты ионосферы). При $z_0 = 300$ км и характерных значениях $V_D = 10$ м/с [18], $\tau = (an[N_2])^{-1}\Big|_{z=z_0} = 10^3$ с величина $H_p = 10$ км.

Воздействие АГВ на динамику плазмы в F-области описывается уравнением (5) с заменой $an[N_2] \rightarrow an[N_2] + \delta(an[N_2])$ (изменение рекомбинационного фона под действием АГВ) и $\vec{V}_D \rightarrow \vec{V}_D + \delta\vec{V}_i$ (вовлечение ионов в движение нейтральных частиц). Оценки показывают, что ниже высоты $h_m F2$, особенно в области крутого градиента плотности ионосферы (6), превалирует последний фактор. Задача о генерации плазменных неоднородностей сводится к задаче о колебаниях ионов, “вкрапленных” в нейтральную среду. Под действием столкновений с нейтральными частицами ионы движутся вдоль магнитного поля со скоростью нейтральной компоненты и, кроме того, совершают поперечный дрейф [16, 18]. Для дальнейших рассуждений важно, что за исключением области геомагнитного экватора, где магнитные силовые линии горизонтальны, скорости ионов и нейтральных частиц близки по величине, $\delta V_i \sim \delta V_n$. Отметим, что это подтверждается прямыми измерениями на КА АЕ-Е. Оценку вариации плотности плазмы в таких условиях дает выражение (4) с отрицательным масштабом высот ионизированной компоненты $H_i = -H_p$ (поскольку при $z < h_m F2$ плотность плазмы увеличивается с высотой):

$$\frac{\delta n[O^+]}{n[O^+]} \sim -\frac{\gamma \frac{H}{H_p} + 1}{\gamma - 1} \frac{\delta n[O]}{n[O]}. \quad (7)$$

Согласно (7), колебания ионной плотности происходят в противофазе с АГВ и превышают относительную амплитуду вызывающих их вариаций нейтральной плотности. При $H = 50$ км, $H_p = 10$ км находим:

$$\left| \frac{\delta n[O^+]}{n[O^+]} \right| = 15 \left| \frac{\delta n[O]}{n[O]} \right|.$$

В отличие от перемещения основного иона O^+ , механической перенос нейтральной компонентой молекулярных ионов NO^+ и O_2^+ на временных и пространственных масштабах АГВ несущественен. Относительные вариации концентраций молекулярных ионов отслеживают колебания плотности нейтральных частиц (см. рис. 5, в):

$$\frac{\delta n[NO^+]}{n[NO^+]} \sim \frac{\delta n[N_2]}{n[N_2]}, \quad \frac{\delta n[O_2^+]}{n[O_2^+]} \sim \frac{\delta n[O_2]}{n[O_2]}.$$

Таким образом, для этих ионов распространение АГВ сказывается просто в изменении рекомбинационного фона.

Заключение

В настоящей работе волновые процессы на терминаторе впервые исследованы по данным прямых спутниковых наблюдений. Проанализированы измерения, проведенные на КА “Atmosphere Explorer-E”, на борту которого были установлены датчики как нейтральных, так и ионизированных атмосферных компонент, что позволило непосредственно исследовать АГВ и ПИВ, их связь между собой и с фоновым ходом атмосферных параметров. Измерения производились в экваториальной ионосфере на высоте $250 \div 300$ км, несколько ниже главного максимума электронной концентрации.

Как показал анализ экспериментальных данных, в утренние часы после восхода Солнца ($6:00 \div 11:00$ LT) и вечером после захода ($19:00 \div 24:00$ LT) происходит усиление волновой активности в различных

компонентах атмосферы, свидетельствующее о генерации терминатором крупномасштабных АГВ и ПИВ. Основные характеристики возмущений стабильны и повторяются от события к событию:

- горизонтальная длина волны – 1400 ÷ 1600 км;
- характерный оцененный период – 50 ÷ 55 мин;
- длительность волнового цуга – 4 ÷ 6 волновых периодов;
- относительная амплитуда АГВ в утренние часы составляет несколько процентов, а в вечерние – десятки процентов;
- относительные возмущения концентраций ионов превышают возмущения концентраций нейтральных частиц; в ночных условиях колебания концентрации основного иона O^+ противофазны колебаниям концентраций основных нейтральных компонент N_2 , O ;
- колебания плотности молекулярных ионов NO^+ и O_2^+ повторяют колебания плотности нейтральной атмосферы.

Амплитудные и фазовые соотношения между колебаниями различных атмосферных компонент, описанные в настоящей работе, являются характерными для распространения АГВ выше турбопаузы. Напомним, что изменение плотности среды под действием АГВ обусловлено всплытием более сжатых нижележащих слоев воздуха и погружением вышележащих разреженных слоев. Безразмерным параметром, определяющим вариацию плотности газовой компоненты $\delta\rho_i$, является отношение вертикального смещения слоя к индивидуальной шкале высот данного газа $\delta z/H_i$. Чем тяжелее газ (т. е. чем меньше H_i), тем больше его относительная вариация. Ниже ионосферного максимума $h_m F2$ плотность плазмы растет с высотой, формально ионосферная шкала высот является отрицательной. Это объясняет противофазные вариации плотности плазмы и нейтральных компонент, а также превышение относительных вариаций амплитуд возмущений ионных компонент над нейтральными.

Интерпретация плазменного отклика ионосферы на распространение АГВ представляет значительный интерес, поскольку

на ионосферных высотах наземными методами обычно регистрируются только возмущения заряженных частиц. Выделим следующие важные, с точки зрения интерпретации наземных наблюдений, результаты:

- Как правило ночью возмущения заряженных компонент по относительной величине превышают возмущения в нейтральных компонентах примерно на порядок величины (см. таблицу). Поэтому делать выводы относительно амплитуды колебаний нейтральных частиц по наблюдениям ПИВ необходимо с учетом высотного распределения плазмы.

– Длительность цуга ПИВ может не соответствовать длительности АГВ. В некоторых событиях, зарегистрированных с помощью КА АЕ-Е, неоднородность заряженных компонент “отрывалась” от возмущения нейтральной компоненты (поскольку орбита КА АЕ-Е проходила в экваториальной области, можно предположить, что наблюдалось расслоение плазмы – так называемые “плазменные пузыри” [18]), но пространственный масштаб колебаний в плазме сохранялся и задавался АГВ.

На высотах орбиты КА АЕ-Е перепад давления электронного газа на терминаторе достаточно точно обозначает область возникновения атмосферных волн. Детальное изучение возможности генерации АГВ электронным давлением, а также сравнение эффективности такого механизма с предложенными ранее механизмами возбуждения колебаний [5, 6] требуют дополнительного теоретического и экспериментального исследования.

Литература

1. Beer T. Supersonic generation of atmospheric waves // *Nature*. – 1973. – Vol. 242, No. 5392. – P. 34.
2. Galushko V. G., Paznukhov V. V., Yampolski Y. M. and Foster J. C. Incoherent Scatter Radar Observations of the AGW/TID Events Generated by the Moving Solar Terminator // *Ann. Geophys.* – 1998. – Vol. 16. – P. 821-827.
3. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рас-

- сеяння // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – №3. – С. 4-35.
4. Dalgarno A., Hanson W. B., Spencer N. W., and Schmerling E. R. The Atmosphere Explorer mission // *Radio Sci.* – 1973. – Vol. 8. – P. 263-273.
 5. Сомсиков В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. – Алма-Ата: Наука, 1983. – 192 с.
 6. Сомсиков В. М. Волны в атмосфере, вызванные движением солнечного терминатора (обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 1991. – Т. 31, №1. – С. 1-12.
 7. Georges T. M. HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances // *J. Atmos. Terr. Phys.* – Vol. 30. – P. 735-746.
 8. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1975. – Vol. 37. – P. 1011-1054.
 9. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // *Радиофизика и Радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, №2. – С. 130-151.
 10. Маров М. Я., Колесниченко А. В. Введение в планетную аэрономию. – М.: Наука, 1987. – 456 с.
 11. Hines C. O. et al. The Upper Atmosphere in Motion // *Geophys. Monogr. Ser. Vol. 18, AGU Washington D. C.* – 1974.
 12. Del Genio A. D., Schubert G., Straus J. M. Gravity wave propagation in a diffusively separated atmosphere with height-dependent collision frequencies // *J. Geophys. Res.* – 1979. – Vol. 84, No. A8. – P. 4371-4378.
 13. Innis J. L. and Conde M. Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, No. A12. – SIA 1-21.
 14. Reber C. A., Hedin A. E., Pelz D. T., Potter W. E., and Brace L. H. Phase and amplitude relationships of wave structure observed in the lower thermosphere // *J. Geophys. Res.* – 1975. – Vol. 80. – P. 4576-1975.
 15. Potter, W. E., Kayser D. C., and Mauersberger K. Direct measurements of neutral wave characteristics in the thermosphere // *J. Geophys. Res.* – 1976. – Vol. 81. – P. 5002.
 16. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 527 с.
 17. Makhlof U., Dewan E., Isler J. R., and Tuan T. F. On the importance of the Purely Gravitationally Induced Density, Pressure and Temperature Variations in Gravity Waves: Their Application to Airglow Observations // *J. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 95. – P. 4103-4111.
 18. Kelley M. C. The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Electrodynamics // Academic Press. Inc. International Geophysics Series. – 1989. – Vol. 43. – 487 p.

Генерація атмосферних гравітаційних хвиль сонячним термінатором за даними вимірювань на супутнику “Atmosphere Explorer-E”

Г. В. Лизунов, А. К. Федоренко

За даними прямих супутникових вимірювань досліджено динамічний відгук нейтральних та іонізованих компонент верхньої атмосфери на проходження термінатора. Проаналізовано спостереження на “Atmosphere Explorer-E” за період, коли супутник знаходився на коловій біляекваторіальній орбіті з нахилом $i = 19.7^\circ$ і висотою $250 \div 300$ км. Встановлено, що на термінаторі генеруються великомасштабні атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ) та рухливі іоносферні збурення (РІЗ) з параметрами: горизонтальна довжина хвилі – $1200 \div 1600$ км; розрахований період – близько 50 хв; тривалість хвильового цугу – чотири-шість періодів; відносна амплітуда АГХ – до кількох процентів; відносна амплітуда РІЗ вранці – до кількох процентів, увечері – до десятків процентів, причому концентрація основного іона O^+ коливається у протифазі, а молекулярних іонів NO^+ і O_2^+ у фазі з коливаннями основних нейтральних компонентів N_2 та O . На основі теорії поширення АГХ у багатокомпонентному газовому середовищі інтерпретуються експериментальні результати. Показано, що амплітудні та фазові відмінності коливань атмосферних компонентів, включно з основним іоном O^+ , викликані відмінностями їх вертикальних розподілів вище турбопаузи. Запропоновано механізм генерації АГХ та РІЗ на висотах F-області за рахунок градієнту електронного тиску на термінаторі.

Atmospheric Gravity Waves Generation by Solar Terminator According to “Atmosphere Explorer-E” Satellite Data

G. V. Lizunov and A. K. Fedorenko

The upperatmospheric neutral and ionized components dynamical response on a moving solar terminator is investigated employing the direct satellite measurements. The observations from “Atmosphere Explorer-E” are analyzed for the period of the satellite being in a circular near-equatorial orbit with the inclination $i = 19.7^\circ$ and height $250 \div 300$ km. It came to light that the terminator generates the large-scale atmospheric gravity waves (AGW) and traveling ionospheric disturbances (TID) with the following parameters: the horizontal wavelength of about $1200 \div 1600$ km; the calculated period of about 50 min; the wavetrain duration of four-to-six periods; the relative AGW amplitude of several percent; the relative TID amplitude at sunrise terminator of about several percent, rising to tens percent at sunset terminator. The primary ion O^+ density oscillates in opposite phase, while that of molecular ions NO^+ and O_2^+ does in phase, with the density oscillations of the main neutral components N_2 and O . The experimental findings are interpreted in terms of the theory of AGW propagation in a multi-component gas medium. It is shown that the amplitude and phase distinctions in the oscillations of atmospheric components (including the main ionic component O^+) are caused by the differences in their vertical distributions above the turbo-pause. The mechanism of AGW and TID generation at the F-region heights due to electron gas pressure gradient is suggested.