

Определение энергии атмосферных гравитационных волн в односторонних спутниковых измерениях

А. К. Федоренко

*Институт космических исследований НАНУ и НКАУ,
пр. Академика Глушкова, 40, корп. 4/1, г. Киев, 03680, Украина
e-mail: aurora28@i.ua*

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2010 г.

Предложена методика определения пространственной плотности энергии атмосферных гравитационных волн (АГВ) на основе контактных спутниковых измерений. Эта методика позволяет вычислять потенциальную энергию волны по спутниковым данным двух типов: масс-спектрометрическим измерениям концентраций атмосферных газов или синхронным измерениям общей плотности и температуры. Проанализировано распределение составляющих потенциальной энергии (акустической и термобарической) для АГВ, наблюдавшихся со спутника Dynamics Explorer 2. На высотах F2-области ионосферы по энергетическому составу выделяются несколько типов АГВ: полярные, в которых оба вида потенциальных энергий примерно равны; среднеширотные и низкоширотные (с подавляющим преобладанием термобарической энергии и с примерным равенством потенциальных энергий). Максимальная плотность энергии наблюдается в полярных АГВ.

1. Введение

Интерес к изучению атмосферных гравитационных волн (АГВ) в значительной степени обусловлен их важной ролью в формировании энергетического баланса верхней атмосферы. Поэтому определение энергетических характеристик АГВ (плотности энергии, величин потоков, скорости переноса энергии) на основе прямых спутниковых измерений представляется важным направлением исследований динамики верхней атмосферы. Однако экспериментальные возможности для вычисления энергетических составляющих АГВ в односторонних спутниковых измерениях ограничены. Фазовые горизонтальные скорости АГВ (сотни метров в секунду) значительно меньше, чем скорость низкоорбитального спутника (около 8 км/с), поэтому эти волны наблюдаются в виде пространственных вариаций концентрации, температуры, давления, скорости и др. Таким образом, с борта спутника регистрируется только компонента длины волны вдоль витка, при этом

другие спектральные свойства остаются неизвестными. В связи с этим большое значение при изучении АГВ на основе спутниковых данных приобретает разработка методик восстановления недоступных в прямых измерениях характеристик волн: периода, фазовой скорости, направления распространения и др.

В работе представлена методика, позволяющая вычислять пространственное распределение плотности потенциальной энергии АГВ на основе двух типов спутниковых данных: масс-спектрометрических измерений концентраций отдельных атмосферных газов, синхронных измерений плотности и температуры. В основе методики лежит разделение наблюдаемых со спутника вариаций плотности среды, вызванных распространением АГВ, на акустическую и гравитационную составляющие. Вычислены плотности энергии АГВ по данным спутника Dynamic Explorer 2 (DE2) на высотах F2-области ионосферы. Обнаружены отличия в энергетическом составе волн, наблюдавшихся в разных географических регионах.

2. Определение энергии АГВ по измерениям концентраций атмосферных газов

Методика определения потенциальной энергии АГВ по спутниковым измерениям концентраций основана на сравнении относительных амплитуд колебаний в разных сортах атмосферных газов. На спутнике DE2 концентрации нейтральных компонент: атомарного кислорода $n(O)$, молекулярного азота $n(N_2)$, аргона $n(Ar)$ и гелия $n(He)$ – измерялись с помощью масс-спектрометра в эксперименте NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) [1]. Распределение общей концентрации атмосферы вдоль участка отдельного витка DE2 показано на рис. 1, а. Высота спутника на этом участке витка изменяется примерно от 280

до 250 км, преобладающими газами являются O и N_2 , концентрации которых составляют $10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-3}$. Волны, вызывающие изменения концентрации нейтральных частиц, регистрируются на фоне крупномасштабных изменений неволновой природы (суточные вариации, изменение высоты орбиты, крупномасштабные динамические процессы и др.). Отделение волновых вариаций от трендов производилось с помощью метода скользящего среднего, при этом количество точек фильтра выбиралось из условия максимальной кросс-корреляции вариаций концентрации O и N_2 [2]. Относительные вариации концентрации после исключения тренда показаны на рис. 1, б. В полярных регионах отчетливо выделяются волновые формы, амплитуда которых в несколько раз, а часто на порядок, превышает амплитуды колебаний в сред-

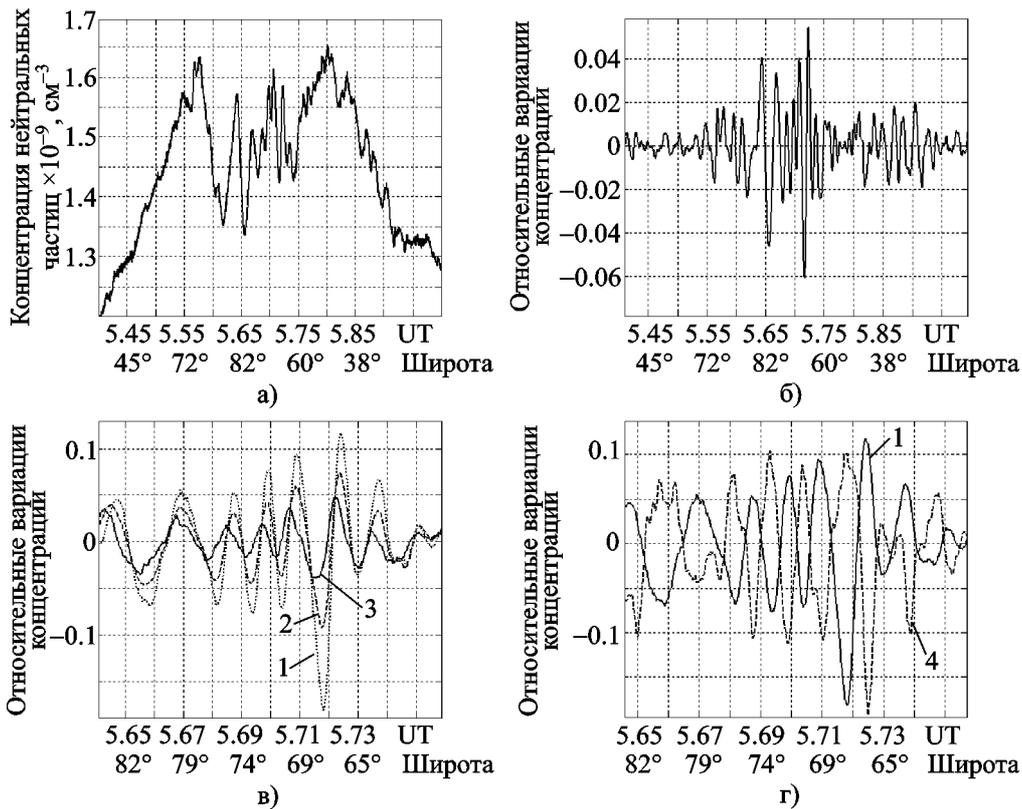


Рис. 1. Концентрации нейтральных частиц на витке 8296 в зависимости от инвариантной широты: а) – общая концентрация; б) – относительные вариации концентрации; в), г) – синхронные относительные вариации в разных сортах атмосферных газов (кривая 1 – Ar; кривая 2 – N_2 ; кривая 3 – O; кривая 4 – He). UT – всемирное время

них и низких широтах. Существует ряд характерных признаков, позволяющих отождествить эти вариации с АГВ [3, 4]: 1) преобладание относительной амплитуды колебаний в тяжелых газах, 2) опережение или отставание профиля колебаний концентрации O относительно N_2 и Ar по ходу движения спутника (рис. 1, в), 3) почти противофазные колебания He относительно тяжелых газов (рис. 1, г).

В основе методики вычисления пространственного распределения энергии АГВ лежит разделение вариаций концентрации на гравитационную и акустическую части. Используя соотношения теории АГВ, относительное изменение плотности при распространении этих волн можно представить в виде [5]:

$$\frac{\delta\rho}{\rho_0} = \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right) \frac{h}{H} + \frac{V_x U_x}{c^2}, \quad (1)$$

где ρ_0 – невозмущенное значение плотности; $\delta\rho$ – отклонение от среднего значения; h – вертикальное смещение элемента объема газа; $H = \frac{kT_n}{\bar{m}g}$ – высота однородной атмосферы, k – постоянная Больцмана, T_n – температура нейтральной компоненты, \bar{m} – средняя масса атомов и молекул, g – ускорение силы тяжести; γ – показатель адиабаты; U_x – горизонтальная фазовая скорость волны; V_x – горизонтальная скорость частиц; c – скорость звука. Первое слагаемое в правой части формулы (1) обусловлено вертикальными смещениями объема атмосферного газа под действием силы тяжести. Обозначим его: $\frac{\delta\rho_G}{\rho_0} = \frac{(\gamma-1)h}{\gamma H}$, – и будем называть “гравитационной” составляющей вариаций плотности. Поскольку для монохроматической АГВ изменение давления $\delta p = \rho_0 V_x U_x$ [5], а $\gamma p_0 = c^2 \rho_0$, второе слагаемое в правой части формулы (1) отражает вариации плотности вследствие возмущения давления, как в обычной звуковой волне. В этом смысле его можно назвать “акустической” частью вариаций плотности $\frac{\delta\rho_A}{\rho_0} = \frac{V_x U_x}{c^2} = \frac{1}{\gamma} \frac{\delta p}{p_0}$. Соответственно выделяются два вида потенциальной энергии АГВ: упругая энергия акустического

сжатия и так называемая термобарическая энергия, связанная с вертикальными смещениями объема атмосферного газа. Закон сохранения энергии для АГВ без учета источников и потерь имеет вид [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_k + E_A + E_G) + \nabla \cdot (\vec{V} \delta p) = 0,$$

где $\vec{V}(V_x, V_z)$ – вектор скорости АГВ; $E_k = \frac{1}{2} \rho_0 \vec{V}^2$ – плотность кинетической энергии; $E_A = \frac{\delta p^2}{2\rho_0 c^2}$ – плотность упругой акустической энергии; $E_G = \frac{g}{2\rho_0 \beta c^2} (\delta p - c^2 \delta \rho)^2$ – плотность термобарической энергии, $\beta = (\gamma-1)g + \frac{dc^2}{dz}$ – коэффициент статической устойчивости (на высотах термосферы полагаем $\beta \cong (\gamma-1)g$); $\vec{V} \delta p$ – поток энергии.

Учитывая, что $\delta p = \rho_0 V_x U_x$, и определив $\delta\rho$ из формулы (1), плотность упругой акустической энергии запишем в виде

$$E_A = \frac{\delta p^2}{2\rho_0 c^2} = \frac{\rho_0 V_x^2 U_x^2}{2c^2} = \frac{\rho_0 c^2}{2} \left(\frac{\delta\rho_A}{\rho_0} \right)^2, \quad (2)$$

а плотность термобарической энергии в виде

$$E_G = \frac{g(\delta p - c^2 \delta \rho)^2}{2\rho_0 \beta c^2} = \frac{\rho_0 c^2}{2} \left(\frac{\delta\rho_G}{\rho_0} \right)^2 \frac{1}{(\gamma-1)}. \quad (3)$$

Таким образом, упругая акустическая и термобарическая потенциальные энергии АГВ выражаются соответственно через акустическую и гравитационную части вариаций плотности. Для вычисления пространственного распределения обоих видов потенциальных энергий АГВ по формулам (2) и (3) достаточно разделить наблюдаемые со спутника общие вариации плотности на акустическую и гравитационную части. Такую возможность предоставляют синхронные масс-спектромет-

рические измерения концентраций разных атмосферных газов.

Как видно из формулы (1), для определения гравитационной части $\delta\rho_G/\rho_0$ достаточно знать γ и отношение h/H . Вычислить вертикальное смещение элементарного объема можно на основе измерения концентраций пары атмосферных газов, например преобладающих O и N₂ [4]:

$$h = \frac{kT_n}{g} \frac{1}{m(N_2) - m(O)} \left[\frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)} - \frac{\delta n(O)}{n(O)} \right], \quad (4)$$

где $\delta n(N_2)$, $\delta n(O)$ – волновые отклонения от средних значений концентраций газов; $m(O)$, $m(N_2)$ – массы атома O и молекулы N₂.

Эффективная высота однородной атмосферы определяется в основном относительным вкладом преобладающих на высотах спутника газов:

$$H = \frac{n(N_2)}{n(N_2) + n(O)} H(N_2) + \frac{n(O)}{n(N_2) + n(O)} H(O) = \frac{kT_n}{g} \frac{1}{n(N_2) + n(O)} \left[\frac{n(N_2)}{m(N_2)} + \frac{n(O)}{m(O)} \right], \quad (5)$$

где $H(O)$ и $H(N_2)$ – масштабы высотных распределений компонент. Для вычисления непосредственных значений h и H на основе экспериментальных данных необходимы синхронные измерения концентрации и температуры, но, как видно из (4) и (5), отношение этих величин зависит только от концентраций и масс компонент.

Таким образом, на основе измерений только концентраций можно рассчитать все величины, необходимые для определения $\delta\rho_G/\rho_0$. Вычислив гравитационную компоненту и вычтя ее из общих вариаций концентрации, получим акустическую часть $\delta\rho_A/\rho_0$. Акустическая и гравитационная части, выделенные из общих вариаций концентрации, наблюдавшихся на витке 8296, показаны на рис. 2, а. Текущие распределения плотностей обеих видов потенциальных энергий АГВ, расчи-

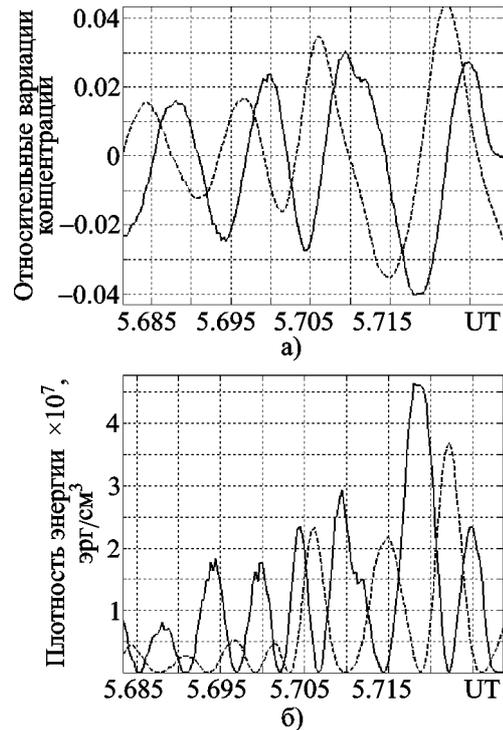


Рис. 2. Акустическая A (штриховая кривая) и гравитационная G (сплошная кривая) составляющие вариаций концентрации (а), распределения плотностей акустической E_A (штриховая кривая) и термобарической E_G (сплошная кривая) потенциальных энергий АГВ (б) на участке витка 8296

танные по формулам (2), (3) для этого же участка витка, показаны на рис 2, б.

3. Синхронные измерения плотности и температуры

Масс-спектрометр – достаточно габаритный и энергоемкий прибор, который не часто устанавливается на космических аппаратах. Однако есть возможность развить описанную в предыдущем разделе методику, если на спутнике проводятся синхронные измерения температуры нейтральной компоненты и общей плотности атмосферы без разделения на отдельные сорта газов. В этом случае распределение плотности энергии вдоль витка также вычисляется на основе разделения вариации общей плотности на акустическую и гравитационную части.

Используя уравнение состояния идеального газа,

$$\frac{\delta p}{\rho_0} = \frac{\delta \rho}{\rho_0} + \frac{\delta T_n}{T_{n0}},$$

выразим акустическую и гравитационную части вариаций плотности через изменения общей плотности и температуры:

$$\frac{\delta \rho_A}{\rho_0} = \frac{1}{\gamma} \frac{\delta p}{\rho_0} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\delta \rho}{\rho_0} + \frac{\delta T_n}{T_{n0}} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\delta \rho_G}{\rho_0} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\delta \rho}{\rho_0} (\gamma - 1) - \frac{\delta T_n}{T_{n0}} \right). \quad (7)$$

Тогда согласно (2), (3), (6), (7) распределения плотностей потенциальных энергий АГВ имеют вид:

$$E_G = \frac{\rho_0 c^2}{2} \frac{1}{\gamma^2} \times \left[\left(\frac{\delta \rho}{\rho_0} \right)^2 (\gamma - 1) + \frac{1}{\gamma - 1} \left(\frac{\delta T_n}{T_{n0}} \right)^2 - 2 \frac{\delta \rho}{\rho_0} \frac{\delta T_n}{T_{n0}} \right], \quad (8)$$

$$E_A = \frac{\rho_0 c^2}{2} \frac{1}{\gamma^2} \left[\left(\frac{\delta \rho}{\rho_0} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_n}{T_{n0}} \right)^2 + 2 \frac{\delta \rho}{\rho_0} \frac{\delta T_n}{T_{n0}} \right]. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) позволяют рассчитать распределения плотностей двух видов потенциальных энергий АГВ вдоль витка спутника по измерениям общей плотности и температуры. Или сразу вычислить плотность полной потенциальной энергии АГВ:

$$E_P = E_A + E_G = \frac{\rho_0 c^2}{2} \frac{1}{\gamma} \left[\left(\frac{\delta \rho}{\rho_0} \right)^2 + \frac{1}{\gamma - 1} \left(\frac{\delta T_n}{T_{n0}} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

4. Равенство средних значений кинетической и потенциальной энергий АГВ

В предыдущих разделах рассматривалась методика вычисления распределения потенциальной энергии АГВ по спутниковым измерениям. Для определения кинетической энергии необходимы измерения скорости. На основе базовых теоретических соотношений покажем, что в среднем за период потенциальная и кинетическая энергии АГВ равны. Для установления связи между кинетической и потенциальной энергией выразим средние значения плотностей обоих видов потенциальных энергий через компоненты скорости частиц. Среднюю плотность потенциальной акустической энергии можно выразить через горизонтальную компоненту скорости АГВ V_x ,

$$\bar{E}_A = E_* \left| \frac{\delta \rho_A}{\rho_0} \right|^2 = \frac{1}{4} \rho_0 |V_x|^2 \left(\frac{U_x}{c} \right)^2, \quad (11)$$

а среднюю плотность потенциальной термобарической энергии – через вертикальную составляющую скорости АГВ V_z ,

$$\begin{aligned} \bar{E}_G &= \frac{E_*}{\gamma - 1} \left| \frac{\delta \rho_G}{\rho_0} \right|^2 = \frac{\rho_0 c^2 (\gamma - 1)}{4} \frac{|h|^2}{\gamma^2 H^2} = \\ &= \frac{\rho_0 (\gamma - 1) g^2 |V_z|^2}{4 c^2 \omega^2} = \frac{1}{4} \rho_0 |V_z|^2 \left(\frac{\omega_B}{\omega} \right)^2, \end{aligned} \quad (12)$$

где $E_* = \rho_0 c^2 / 4$, $V_z = i \omega h$, ω – частота волны, $\omega_B = g \sqrt{(\gamma - 1)} / c$ – частота Брента–Вяйсяля.

Параметры АГВ удовлетворяют дисперсионному уравнению [7]:

$$\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma^2} \frac{\omega^2}{\omega_B^2} - \frac{1}{4} \right) \frac{\omega^2}{\omega_B^2} + k_x^2 H^2 - (k_x^2 + k_z^2) H^2 \frac{\omega^2}{\omega_B^2} = 0, \quad (13)$$

где k_x, k_z – горизонтальная и вертикальная компоненты волнового вектора. Учитывая, что $U_x = \omega/k_x, c = \sqrt{\gamma g H}$, перепишем (13) в виде:

$$\frac{k_z^2 + \zeta^2}{k_x^2} = \left[\left(\frac{\omega_B}{\omega} \right)^2 - 1 \right] \left[1 - \left(\frac{U_x}{c} \right)^2 \right], \quad (14)$$

где $\zeta^2 = g^2(1 - \gamma/2)^2/c^4$. Соотношение, связывающее вертикальную и горизонтальную компоненты скорости АГВ [7] можно записать в виде:

$$\frac{V_x}{V_z} = \left[-\frac{k_z}{k_x} + i \frac{\zeta}{k_x} \right] \left[1 - \left(\frac{U_x}{c} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (15)$$

На основе (11)-(15) получим:

$$\begin{aligned} \bar{E}_K &= \frac{1}{4} \rho_0 (|V_x|^2 + |V_z|^2) = \\ &= \frac{1}{4} \rho_0 \left[|V_x|^2 \left(\frac{U_x}{c} \right)^2 + |V_z|^2 \left(\frac{\omega_B}{\omega} \right)^2 \right] = \bar{E}_A + \bar{E}_G. \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, средние за период плотности кинетической и потенциальной энергий АГВ равны.

Синхронные измерения на спутнике DE2 концентрации и скорости предоставляют уникальную возможность экспериментально проверить равенство (16). Для этого потенциальную энергию АГВ, $E_P = E_A + E_G$, можно вычислить на основе измерений концентраций по методике, описанной выше, а кинетическую энергию – по измерениям концентраций и скорости. На спутнике DE2 в эксперименте WATS [8] измерялись две компоненты скорости нейтральных частиц: V_{zs} – вертикальная и V_{ys} – горизонтальная, перпендикулярная к вектору скорости спутника, (индекс “s” означает, что соответствующие компоненты измеряются в системе координат спутника). Таким образом, по измерениям DE2 можно рассчитать неполную кинетическую энергию

$E_K^* = \frac{1}{2} \rho_0 (|V_{ys}|^2 + |V_{zs}|^2)$. После усреднения по периоду получаем средние распределения потенциальной и кинетической энергий. Результат сравнения средних плотностей кинетической и потенциальной энергий АГВ показан на рис. 3. Даже без учета компоненты V_{xs} плотности этих энергий оказываются близкими по величине.

Таким образом, методики вычисления полной средней за период энергии АГВ, $\bar{E}_{tot} = 2\bar{E}_P = 2\bar{E}_K$, и масс-спектрометрические измерения позволяют определить сразу полную энергию волны.

5. Экспериментальные результаты

На основе анализа энергетических соотношений для АГВ по наблюдениям на спутнике DE2 можно выделить два основных типа этих волн: полярные и среднеширотные. Полярные АГВ представляют собой разновидность среднemasштабных волн с выделенными горизонтальными длинами 500 ÷ 650 км, периодами, достаточно близкими к периоду Брента–Вяйсяля ($\tau_B/\tau \approx 0.7 \div 0.85$) и примерным равенством средних значений потенциальных энергий $\bar{E}_A \approx \bar{E}_G$ [4, 9, 10]. Примеры полярных волн приведены на рис 4. Слева показаны волно-

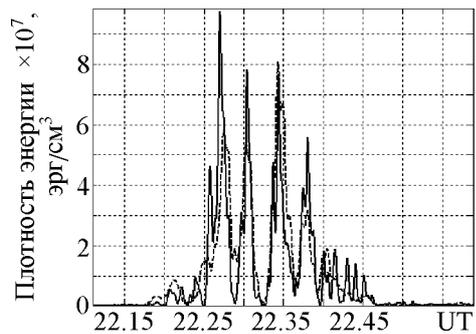


Рис. 3. Средние за период плотности кинетической E_K (штриховая кривая) и потенциальной E_P (сплошная кривая) энергии АГВ на витке 8132. Кинетическая энергия рассчитана по измерениям скорости нейтральных частиц в эксперименте WATS, потенциальная – по измерениям концентраций нейтральных компонент в эксперименте NACS на спутнике DE2

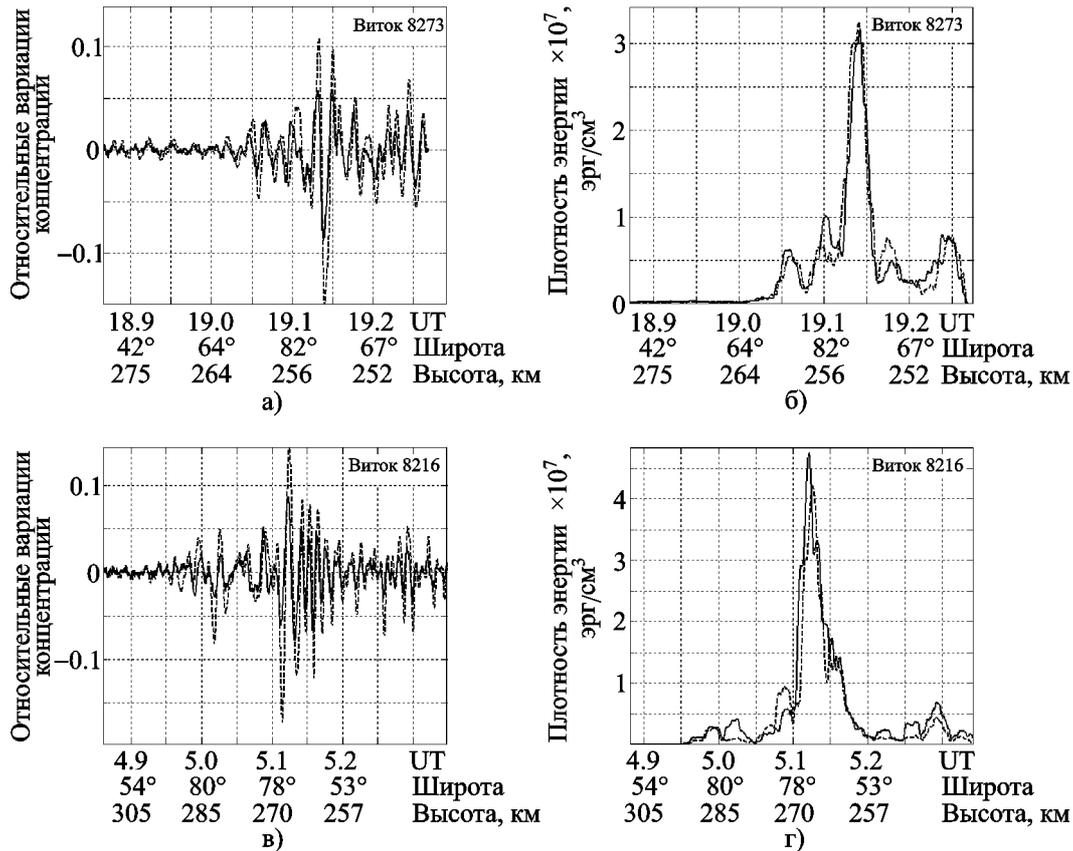


Рис. 4. АГВ над полярными шапками в вариациях концентраций атмосферных газов N_2 (итриховая кривая) и O (сплошная кривая) – слева, и средние за период распределения плотностей акустической \bar{E}_A (итриховая кривая) и термобарической \bar{E}_G (сплошная кривая) потенциальных энергий по измерениям DE2 – справа

вые формы в вариациях концентраций атмосферных газов для двух витков, справа – средние за период распределения акустической и термобарической энергии. Высота спутника на этих участках изменялась мало, волновые формы отчетливо выражены, значения средних плотностей потенциальных энергий \bar{E}_A и \bar{E}_G близки и составляют около $3 \cdot 10^{-7}$ эрг/см³ на витке 8273 и $4 \cdot 10^{-7}$ эрг/см³ на витке 8216.

Волновые формы в средних и низких широтах достаточно часто представляют собой своеобразные “хвосты”, тянущиеся от авроральных областей, и, по-видимому, являются продолжением полярной волновой активности. В таких “хвостах”, как и у полярных АГВ, наблюдается примерное равенство обоих ви-

дов потенциальных энергий. Реже встречаются изолированные волновые цуги из нескольких периодов, в которых гравитационная составляющая значительно превышает акустическую. Отличие в соотношении энергетических компонент полярных и низкоширотных АГВ показано на рис. 5. Вдоль витка 7299 было зарегистрировано три области усиления волновой активности. Первая – в северном полушарии с максимумом примерно на геомагнитной широте аврорального овала, вторая – около геомагнитного экватора, третья – при подлете к южной полярной шапке. Далее ряд данных обрывается. Энергия полярных волн на этом витке почти на порядок меньше, чем на витках, рассмотренных на рис. 4. Скорее всего, это связано с большей высотой орбиты (350 ÷ 400 км),

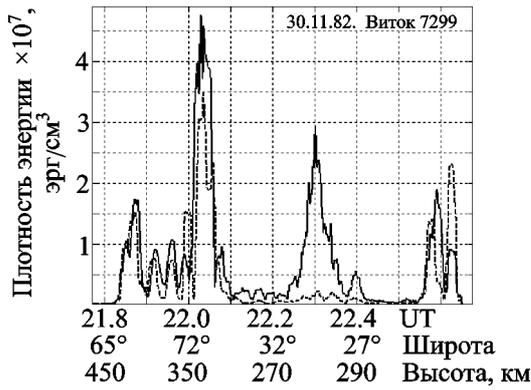


Рис. 5. Распределение плотностей акустической E_A (штриховая кривая) и термобарической E_G (сплошная кривая) потенциальных энергий АГВ вдоль витка 7299 в зависимости от инвариантной широты и высоты спутника

где выше величина диссипации волновой энергии за счет вязкости. Потенциальные энергии АГВ полярных регионов близки по величине, а термобарическая энергия низкоширотных волн на порядок превышает акустическую.

Попытаемся понять физический смысл этого различия на основе соотношений теории АГВ. Используя (14)-(16), отношение потенциальных энергий АГВ запишем в виде:

$$\frac{\bar{E}_G}{\bar{E}_A} = \frac{(c/U_x)^2 - 1}{1 - (\tau_B/\tau)^2}, \quad (17)$$

где τ – период волны, τ_B – период Брента-Вяйсяля. Выражение (17) позволяет анализировать относительный вклад различных энергетических составляющих АГВ в зависимости от их спектральных свойств. Отношение \bar{E}_G/\bar{E}_A при разных значениях горизонтальной длины волны λ_x показано на рис. 6. Расчеты проведены для относительного содержания атомарного кислорода около 70 %, молекулярного азота 30 % и $T_n = 1000$ К, что примерно соответствует условиям измерений на DE2. Отсечка кривых в области коротких периодов связана с тем, что согласно дисперсионному уравнению АГВ для каждого значения λ_x существует минимально возможный период $\tau_{\min}(\lambda_x) > \tau_B$, при

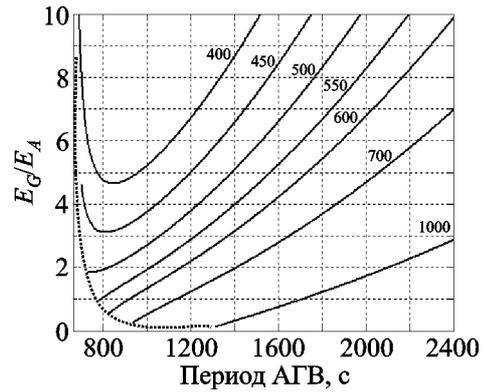


Рис. 6. Отношение потенциальных энергий АГВ при разных значениях $\lambda_x = 400, 450, 500, 600, 700, 1000$ км в зависимости от периода

котором еще может выполняться условие свободного распространения ($k_z^2 > 0$). Из рис. 6 видно, что общей тенденцией является увеличение относительного вклада термобарической потенциальной энергии с уменьшением λ_x и увеличением периода АГВ. Акустическая составляющая может превысить термобарическую компоненту только начиная с некоторой граничной длины волны $\lambda_x > c\tau_B$ (около 520 км для условий наблюдений). Для преобладающих над полярными шапками волн с $\lambda_x \sim 500 \div 650$ км, отношение \bar{E}_G/\bar{E}_A может быть близко к единице только для периодов 800 ÷ 900 с. Именно такие спектральные характеристики соответствуют наблюдаемым со спутника DE2 полярным волнам. Отметим, что у таких АГВ горизонтальные фазовые скорости составляют 600 ÷ 700 м/с, следовательно, волны могут возникать только в верхней атмосфере, где скорость звука превышает это значение. Для показанного на рис. 5 низкоширотного цуга при длине волны около 550 км и отношении $\bar{E}_G/\bar{E}_A \approx 10$ период составляет примерно 2200 с, а горизонтальная фазовая скорость ~ 250 м/с. Такая волна – дозвуковая на любом высотном уровне в атмосфере, и гипотетически могла возникнуть даже вблизи поверхности Земли.

В спутниковых измерениях регистрируется не истинная горизонтальная длина волны, а ее проекция на направление движения спутника, которая зависит от угла пересечения

волнового фронта. В некоторых случаях анализ энергетических характеристик АГВ позволяет делать выводы относительно истинного значения λ_x . Например, для полярных АГВ отношение \bar{E}_G/\bar{E}_A близко к единице, что возможно только для $\lambda_x > 520$ км. Кроме того, над полярными шапками преобладают волны с горизонтальными масштабами 500 ÷ 650 км [2, 4, 9]. Поскольку измеряемая длина волны может быть только равна (если фронт пересекается перпендикулярно) или больше истинной (в остальных случаях), приходим к выводу, что истинные значения λ_x также лежат в пределах 500 ÷ 650 км.

6. Выводы

Предложена методика определения плотности энергии АГВ вдоль витка спутника по измерениям концентраций атмосферных газов. Вычисление энергии производится на основе сравнения амплитуд в вариациях концентраций разных газов, и не требуется экспериментально измерять длину волны, истинное значение которой в общем случае не известно. По данным спутника DE2 исследованы энергетические характеристики АГВ на высотах F2-области ионосферы. Для АГВ полярных регионов преимущественно наблюдается примерное равенство термобарической и акустической потенциальных энергий. В средних и низких широтах значительное преобладание термобарической энергии чаще встречается в локализованных волновых пакетах, а равенство термобарической и акустической энергий – в основном в “хвостах”, тянущихся от авроральных областей.

Анализ соотношений потенциальных энергий АГВ на основе спутниковых данных позволяет оценить спектральные характеристики волны, недоступные в этих измерениях, – период и горизонтальную фазовую скорость. Кроме того, оценивая соотношения компонент энергии, можно делать некоторые выводы относительно высоты расположения источника АГВ. Например, при изучении воздействий снизу можно сразу отсеять волны, которые в принципе не могли возникнуть в нижней атмосфере.

Энергетический состав разных типов АГВ на ионосферных высотах требует дальней-

шего исследования. В частности, представляет интерес изучить процентное соотношение быстрых АГВ ($U_x \sim 600 \div 700$ м/с), которые могли возникнуть и распространяться только в верхней атмосфере, и волн с $U_x < 300$ м/с, которые гипотетически могут быть связаны с тропосферными источниками или являться переотраженными от поверхности Земли гармониками.

Литература

1. Carignan G. R., Block B. P., Maurer J. C., Hedin A. E., Reber C. A., and Spencer N. W. The neutral mass Spectrometer on Dynamics Explorer // *Space Sci. Instrum.* – 1981. – Vol. 5. – P. 429.
2. Федоренко А. К. Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // *Космічна наука і технологія.* – 2008 – Т.14, №5. – С. 65-73.
3. Dudis J. J. and Reber C.A. Composition effects in thermospheric gravity waves // *Geophys. Res. Lett.* – 1976 – Vol. 3, No. 12. – P. 727-730.
4. Федоренко А. К. Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основі мас-спектрометричних супутникових вимірювань // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2009. – Т.14, №3. – С.254-265.
5. Makhlof U. R., Dewan E. A., Isler J., 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.
6. Yeh K. S. and Liu C. H. Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere // *Rev. Geophys. Space. Phys.* – 1974. – Vol. 12. – P. 193-216.
7. Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* – 1960. – Vol. 38. – P. 1441-1481.
8. Spencer N. W., Wharton L. E., Niemann H. B., Hedin A. E., Carignan G. R., and Maurer J. C. The Dynamics Explorer wind and temperature spectrometer // *Space Sci. Instrum.* – 1981. – Vol. 5. – P. 417.
9. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., Coley W. R., Carignan G. R., and Spencer N. W. Gravity waves near 300 km over the polar caps // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100. – P. 23993-24002.
10. Федоренко А. К. Энергетический баланс акустико-гравитационных волн над полярными шапками по данным спутниковых измерений // *Геомагнетизм и астрономия.* – 2010 – Т. 50, №1. – С. 111-122.

Визначення енергії атмосферних гравітаційних хвиль в однокіткових супутникових вимірюваннях

А. К. Федоренко

Запропоновано методику визначення просторової щільності енергії атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) на основі контактних супутникових вимірювань. Ця методика дозволяє розрахувати потенціальну енергію хвилі за супутниковими даними двох типів: мас-спектрометричними вимірюваннями концентрацій атмосферних газів або синхронними вимірюваннями загальної концентрації і температури. Проаналізовано розподіл складових потенціальної енергії (акустичної і термобаричної) для АГХ, спостережуваних супутником Dynamics Explorer 2. На висотах F2-області іоносфери за енергетичним складом розрізняються кілька типів АГХ: полярні, в яких обидва види потенціальних енергій є наближено рівними; середньширотні та низькоширотні (з тотальним переважанням термобаричної енергії та з приблизною рівністю потенціальних енергій). Максимальна щільність енергії спостерігається в полярних АГХ.

Determination of Energy of Atmospheric Gravity Waves from One-Point Satellite Measurements

A. K. Fedorenko

The method for determination of spatial energy density distribution in atmospheric gravity waves (AGW) employing direct satellite-based measurements is proposed. The method allows determining the potential AGW energy using the two types of satellite data: mass-spectrometer measurements of concentrations of atmospheric gases and synchronously obtained data of total density and temperature. The distribution of potential energy components (acoustic and thermobaric) for AGWs observed from Dynamics Explorer 2 satellite has been analyzed. At F2-region altitudes, the following AGW types were identified: polar – with the nearly equal both types of potential energy; middle latitude and low latitude (with total prevailing of thermobaric energy and with near equal potential energies). The maximum AGW energy density is observed in the polar regions.