

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ**Н.О. Шевчук, А.И. Погорельцев****MODELING ACOUSTIC-GRAVITY WAVE TRAJECTORIES IN THE ATMOSPHERE****N.O. Shevchuk, A.I. Pogoreltsev**

Наблюдения за полем серебристых облаков позволяет определить геометрические характеристики (длина волны, высота наблюдения, азимут распространения) гравитационных волн, дошедших до мезосферы. Использование этих данных в численном моделировании вертикальной структуры гравитационных волн позволяет провести обратную трассировку волн в область тропосферы и определить местоположение источника волны на высотах порядка 10 км. Для более точного вычисления положения источника волны в тропосфере используется методика разделения волн на прямую и отраженную от диссипативной области, основанная на WKBJ-приближении. Существующие теоретически полученные формулы дают возможность оценивать мощность источника гравитационных волн через величину фонового ветра. Проведенный анализ показывает, что в определенных путем обратной трассировки волны, областях действительно существуют заметные источники гравитационных волн.

Noctilucent clouds observations allow us to determine characteristics of gravity wave, monitored in mesosphere (wave length, wave observation height, propagation azimuth). Using this parameters in numerical simulation of vertical structure of gravity wave makes possible wave inverse ray tracing in the upper troposphere (to the heights of 10 km). We also apply technique, based on WKBJ-approximation, to separate numerical solution to direct and refracted waves. Theoretical formula give the opportunity of estimation power characteristics of gravity wave source by values of background wind. The results obtained show good agreement between inverse ray tracing data and evaluation of source power characteristics.

Атмосферные гравитационные волны являются объектом интенсивного изучения в последние десятилетия вследствие огромного множества эффектов и их значительного вклада в структуру атмосферы, ее изменчивость и циркуляцию. Это ведет к тому, что изучение волновых движений является одним из важнейших направлений в физике атмосферы.

Целью данной работы является определение местоположения и характеристик источника гравитационных волн, наблюдаемых в мезосфере, в нижележащих слоях атмосферы (тропосфере, стратосфере) с учетом реалистичных профилей ветра и температуры путем проведения моделирования траекторий рассматриваемых волн.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Определены характеристики возмущения анализом поля серебристых облаков в мезосфере.

2. Построен профиль фактического фонового ветра для рассматриваемых случаев наблюдения серебристых облаков.

3. Построен профиль температуры окружающего воздуха для рассматриваемых случаев наблюдения серебристых облаков.

4. Произведена обратная трассировку гравитационной волны из области наблюдения в мезосфере в область возможного источника в тропосфере и стратосфере (определены координаты возможного источника волны).

5. Определена мощность возможных источников по данным о поле фонового ветра.

Характеристики моделируемых волновых возмущений (длина волны, высота наблюдения, азимут распространения волны), используемые при дальнейшем моделировании, были получены путем анализа поля серебристых облаков мезосферы. Фиксация поля серебристых облаков в обоих случаях производилась автоматическими цифровыми камерами, расположенными в Красногорске и Обнинске (Мос-

ковская область, Россия). Использование методики триангуляции [Dalin, 2015] позволяет оценить параметры гравитационных волн, проявляющихся в серебристых облаках. Эти параметры приведены в таблице.

Параметры волны для двух случаев наблюдения серебристых облаков

Параметр	1 случай	2 случай
Время наблюдения	18–19 июля 2013 22:15–23:30 UT	7–8 июля 2014 20:15–23:00 UT
Диапазон высот, км	84–85	79–82
Горизонтальная длина волны, км	66.6	21.4
Азимут движения	126°	11°
Горизонтальная фазовая скорость относительно Земли, м/с	28.3	11.3
Наблюдаемый период (относительно Земли), мин	39.2	31.6

Для рассмотренных в этой работе событий по моделированию вертикальной структуры гравитационных волн профили фонового ветра строятся следующим образом. Профили фонового ветра для высот от 0 до 60 км взяты из модели MERRA, между 80 и 100 км – из глобальной эмпирической модели ветра GEWM (Global Empirical Wind Model), выше 150 км – из модели HWM07, на промежуточных высотах (от 60 до 80 и от 100 до 150 км) используются интерполированные данные. Профили температуры берутся из модели NRLMSISE-00.

В основе расчета траекторий акустико-гравитационных волн лежит соотношение, связывающее горизонтальную x и вертикальную z координаты волнового возмущения. Использование фор-

мулы прямоугольников можно получить следующее выражение:

$$\int_0^{x(z)} dx = x(z) = \int_{z_0}^z \frac{V_{gx}}{V_{gz}} dz \cong x(z_k) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{V_{gx}}{V_{gz}} \right)_i (z_i - z_{i-1}) = \Delta z \sum_{i=1}^k \left(\frac{V_{gx}}{V_{gz}} \right)_i$$

В этих выражениях V_{gx} и V_{gz} являются проекциями групповой скорости волны на оси x и z соответственно. Величины групповой скорости определяются из выражений, лежащих в основе модели вертикальной структуры гравитационных волн [Bidingmayer, Pogoreltsev, 1992; Pogoreltsev, Pertsev, 1996]. Использование при моделировании вертикальной структуры гравитационных волн входных параметров, приведенных в таблице, для реалистичных профилей ветра и температуры позволяет получить траектории волн, приведенные на рис. 1 и 2.

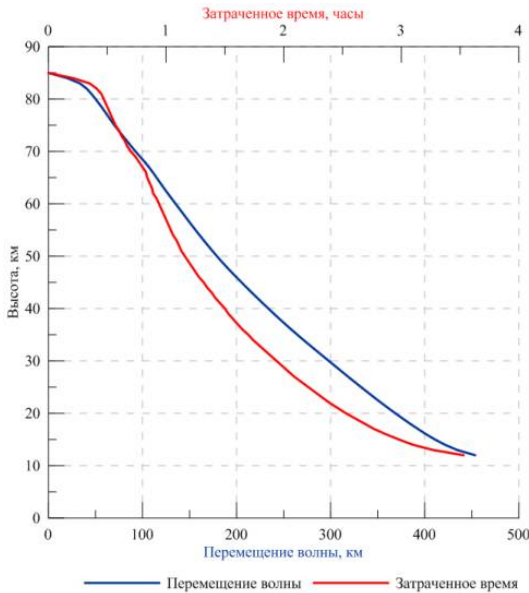


Рис. 1. Траектория движения волнового возмущения и затраченное на движение время для первого случая (18–19 июля 2013 г.).

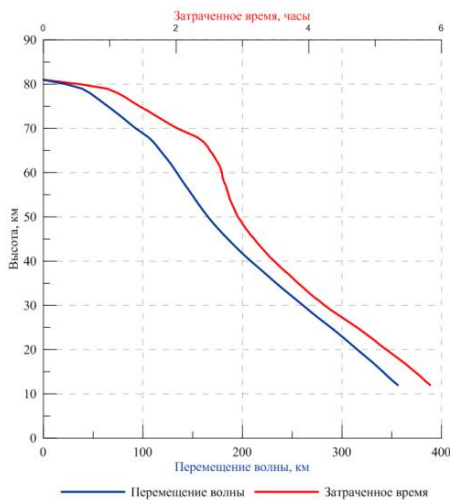


Рис. 2. Траектория движения волнового возмущения и затраченное на движение время для для второго случая (7–8 июля 2014 г.).

Существенная часть гравитационных волн генерируется в тропосфере благодаря различным механизмам. Один из возможных кандидатов на роль такого механизма – нелинейные атмосферные движения.

В работе Medvedev и Gavrilov (1995) продемонстрирован способ для изучения процессов генерации гравитационных волн, заключающийся в разложении гидродинамических переменных в ряды по числам Россби. В работе [Medvedev, Gavrilov, 1995] этот метод используется для того, чтобы разработать примерные выражения для «форсингового» члена, который описывает генерацию инерционно-гравитационных волн фоновыми квази-геострофическими движениями.

$$G_0 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial u_0}{\partial y} \frac{\partial v_0}{\partial x} + \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right)^2$$

Сопоставление полей этой величины в различные моменты времени позволяет проследить эволюцию источника и его перемещение в пространстве. На рис. 3 и 4 изображены поля величины G_0 в моменты времени наиболее близкие к предполагаемому времени генерации волны для первого случая наблюдения поля серебристых облаков (18–19 июля 2013 г.). На рис. 5 и 6 соответственно изображены поля величины G_0 для второго случая (7–8 июля 2014 г.).

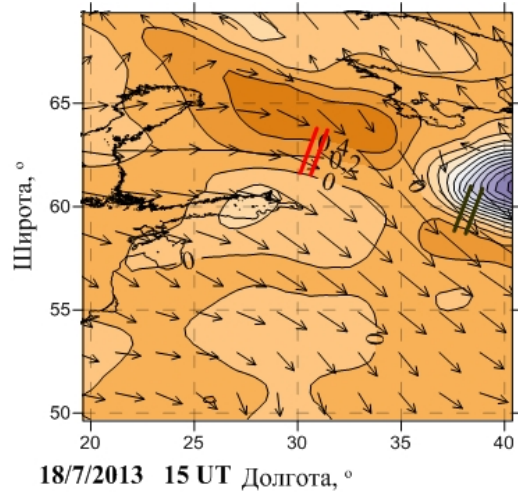


Рис. 3. Поле величины $10^{-8} \cdot G_0$ на высоте 400 мбар, 18 июля 2013 г., 15 UT.

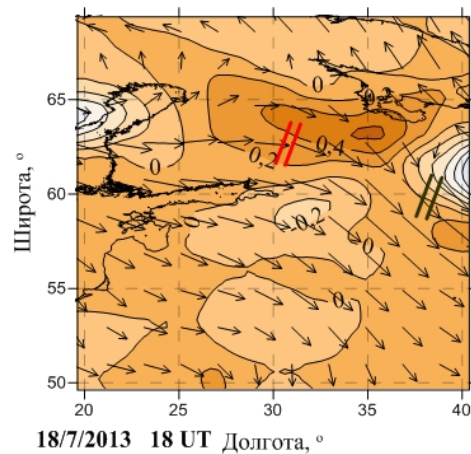


Рис. 4. Поле величины $10^{-8} \cdot G_0$ на высоте 400 мбар, 18 июля 2013 г., 18 UT.

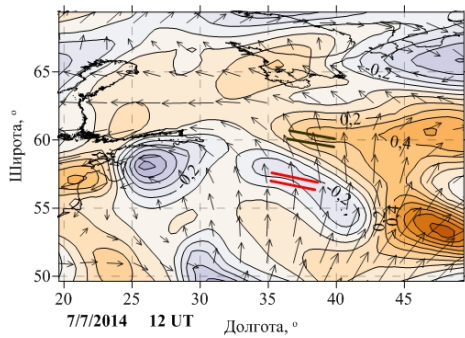


Рис. 5. Поле величины $10^{-8} \cdot G_0$ на высоте 250 мбар, 7 июля 2014 г., 12 UT.

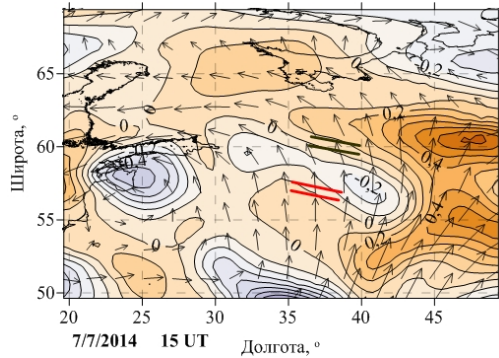


Рис. 6. Поле величины $10^{-8} \cdot G_0$ на высоте 250 мбар, 7 июля 2014 г., 15 UT.

В результате текущей работы удалось достичь поставленной цели, а именно определить местоположение источника гравитационной волны путем проведения обратной трассировки с реалистичными профилями ветра и температуры для волн с параметрами, полученными анализом поля серебристых облаков в мезосфере. Также анализ величин фонового ветра позволил оценить величину источника и его эволюцию, которая находится в хорошем согласии с результатами проведения обратной трассировки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 14-17-00685).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Dalin P., et al. Evidence of the formation of noctilucent clouds due to propagation of an isolated gravity wave caused by a tropospheric occluded front // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. P. 2037–2046.

Bidlingmayer E.R., Pogoreltsev A.I. Numerical modeling of acoustic-gravity wave transformation into thermal and viscous waves in the thermosphere // *Atmospheric and oceanic physics*. 1992. V. 28, N 1. P. 64–74.

Medvedev A.S., Gavrilov N.M. The nonlinear mechanism of gravity wave generation by meteorological motions in the atmosphere // *J. Atmos. Terres. Phys.* 1995. V. 57, N 11. P. 122–1231.

Pogoreltsev A.I., Pertsev N.N. The influence of background wind on the formation of the acoustic-gravity wave structure in the thermosphere // *Atmospheric and oceanic physics*. 1996. V. 31, N 6. P. 723–728.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия