



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОСЛОИСТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СТРУКТУР В АТМОСФЕРЕ

Кшевецкий С.П.¹, Курдяева Ю.А.², Куличков С.Н.¹, Гаврилов Н.М.³

¹ИФА РАН, г. Москва, Россия

²Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

³СПбГУ, г. Санкт-Петербург – Петродворец, Россия

yakurdyaeva@wdizmiran.ru

В настоящее время при исследовании вторичных ВГВ в атмосфере обсуждаются два механизма их генерации:

- разрушение ВГВ является сильно нелинейным процессом и может приводить к каскадной передаче энергии к более мелким спектральным компонентам. Вторичные волны первого типа имеют меньшие масштабы, чем первичные ВГВ.
- крупномасштабные пространственно-временные неоднородности в распределении волновых ускорений и притоков тепла, возникающих в процессе и после обрушения ВГВ, могут генерировать вторичные волны второго типа.

Эти вторичные волны, как правило, имеют более длинные горизонтальные волны и периоды по сравнению с первичными ВГВ. Они могут более эффективно переносить энергию и импульс и распространяться до больших высот в верхних слоях атмосферы. Такие два механизма образования вторичных волновых мод в атмосфере обеспечивает перемещение энергии в спектре ВГВ как в сторону более мелких, так и к более крупным пространственно-временным масштабам. Часть из этих вторичных мод может удовлетворять критериям формирования анизотропных структур

$$k^2 \ll m^2, m^2 \gg \alpha^2$$
$$\omega \ll N; c_{vert} \ll c_{hor} \ll 2NH,$$

где k и m – горизонтальное и вертикальное волновые числа, $\alpha = (2H)^{-1}$, H – высота однородной атмосферы, N – частота Брента-Вяйсяля, $\omega = \sigma - ku_0$ – внутренняя частота, σ – наблюдаемая частота, u_0 – проекция среднего ветра на направление горизонтального волнового вектора, c_{hor} и c_{vert} компоненты групповой скорости распространения узкого пакета ВГВ по горизонтали и по вертикали соответственно. Вторичные моды могут способствовать формированию дополнительных тонкослоистых структур.



Для построения источников возмущений для численного расчета использована линейная теория атмосферных волн, на которую были наложены нелинейные эффекты, обсуждаемые в работах [Куличков и др., 2016; Chunchuzov, 2002; Chunchuzov, 2009]. Эти эффекты приводят к формированию универсальных спектров ВГВ. Нелинейные слагаемые в уравнениях гидродинамики можно рассматривать как специфические «источники», добавляемые в систему линеаризованных уравнений.

В настоящем исследовании используется модификация трехмерной численной модели высокого разрешения AtmoSym. Модель учитывает нелинейные и диссипативные процессы, влияющие на атмосферные ВГВ, и может моделировать такие сложные процессы, как неустойчивость ВГВ, их разрушение и генерацию турбулентности. Для моделирования тонкослоистых структур модель AtmoSym модифицирована путем включения в уравнения неразрывности, горизонтальной скорости и притока тепла волновых источников Φ_ρ , Φ_u , Φ_T , соответственно, которые описываются формулами вида

$$\begin{aligned}\Phi_\rho &= \frac{\Delta\rho_t + \rho_0 - \rho}{\tau_t(t)}, \\ \Phi_u &= \rho \frac{\Delta u_t + u_0 - u}{\tau_t(t)}, \\ \Phi_T &= \rho c_v \frac{\Delta T_t + T_0 - T}{\tau_t(t)},\end{aligned}$$

где ρ , u , T – плотность, горизонтальная скорость и температура; c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме; индекс ноль обозначает фоновые значения. Формулы содержат величины $\Delta\rho_t$, Δu_t , ΔT_t , которые описывают среднеквадратичные пульсации спектра волновой турбулентности, создаваемой ВГВ, определенной случайным образом.

Аппроксимация источников волн

Источники волн в модели аппроксимируются следующими формулами:

$$\Delta\rho_t \approx \frac{\rho_0}{g} \sum_{i,n} c_i a_{in} \left(\frac{(\beta + 1)}{2\gamma H} \sin(m_i z + \varphi_i) - m_i \cos(m_i z + \varphi_i) \right) \sin(k_n(x - c_i t) + \psi_n).$$

$$\Delta u_t = \sum_{i,n} a_{in} \sin(m_i z + \varphi_i) \sin(k_n(x - c_i t) + \psi_n),$$

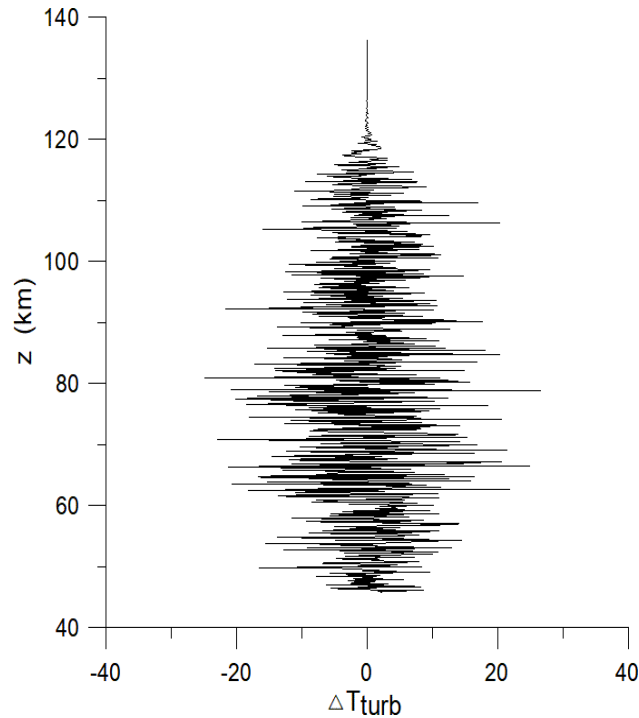
$$\Delta T_t \approx \frac{T_0}{g} \sum_{i,n} c_i a_{in} \left(\frac{2\gamma - \beta - 1}{2\gamma H} \sin(m_i z + \varphi_i) + m_i \cos(m_i z + \varphi_i) \right) \sin(k_n(x - c_i t) + \psi_n),$$

где $\beta = \gamma - 1 + \gamma \partial H / \partial z$; a_{in} и φ_i , ψ_n – случайные амплитуды и фазы волновых мод; c_i – скорость горизонтального распространения ВГВ, r – случайное число, равное +1 или -1 с вероятностью 0.5. Второе соотношение является модификацией полуэмпирической модели тонкой структуры атмосферного ветра, описанной в работе [Куличков и др., 2010] в случае волн малой амплитуды, для которых справедлива линейная теория ВГВ. Соотношения для $\Delta\rho_t$, ΔT_t в получены из выражения для Δu_t с использованием поляризационных соотношений линейной теории ВГВ. Поэтому все гидродинамические поля в согласованы между собою. Чтобы обеспечить $\Delta u_t = \delta$ (среднеквадратичное значение пульсаций скорости) для амплитуды a_{in} используется формула

$$a_{in} = \frac{b_{in}}{m_i^{3/2}} \sqrt{\frac{4\delta^2}{\sum_{i,n} (b_{in}^2 / m_i^3)}} e^{\lambda_i(z)t},$$

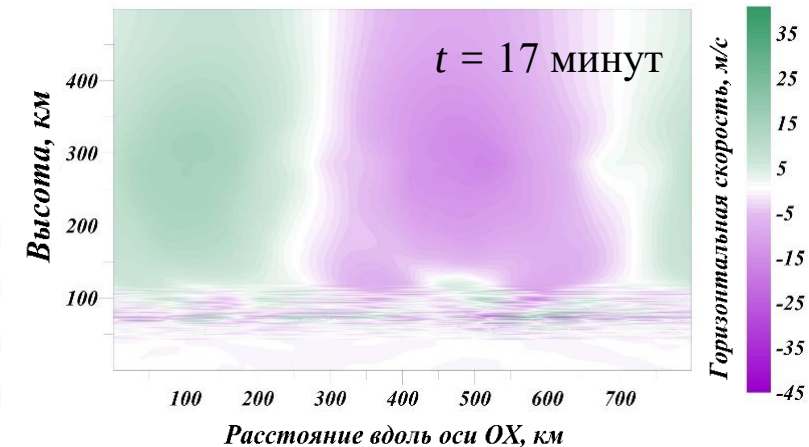
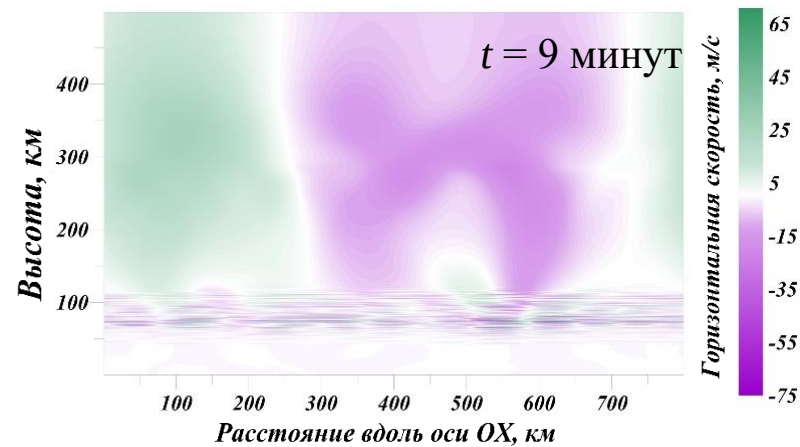
где b_{in} – случайные числа из интервала [0,1], $\lambda_i(z)$ – скорость диссипации волновой моды, зависящая от высоты и растущая с высотой. Формула соответствует степенному изменению спектральной плотности скорости ветра $S(m) \sim N^2/m^3$, которое часто наблюдается в атмосфере.

Результаты расчетов



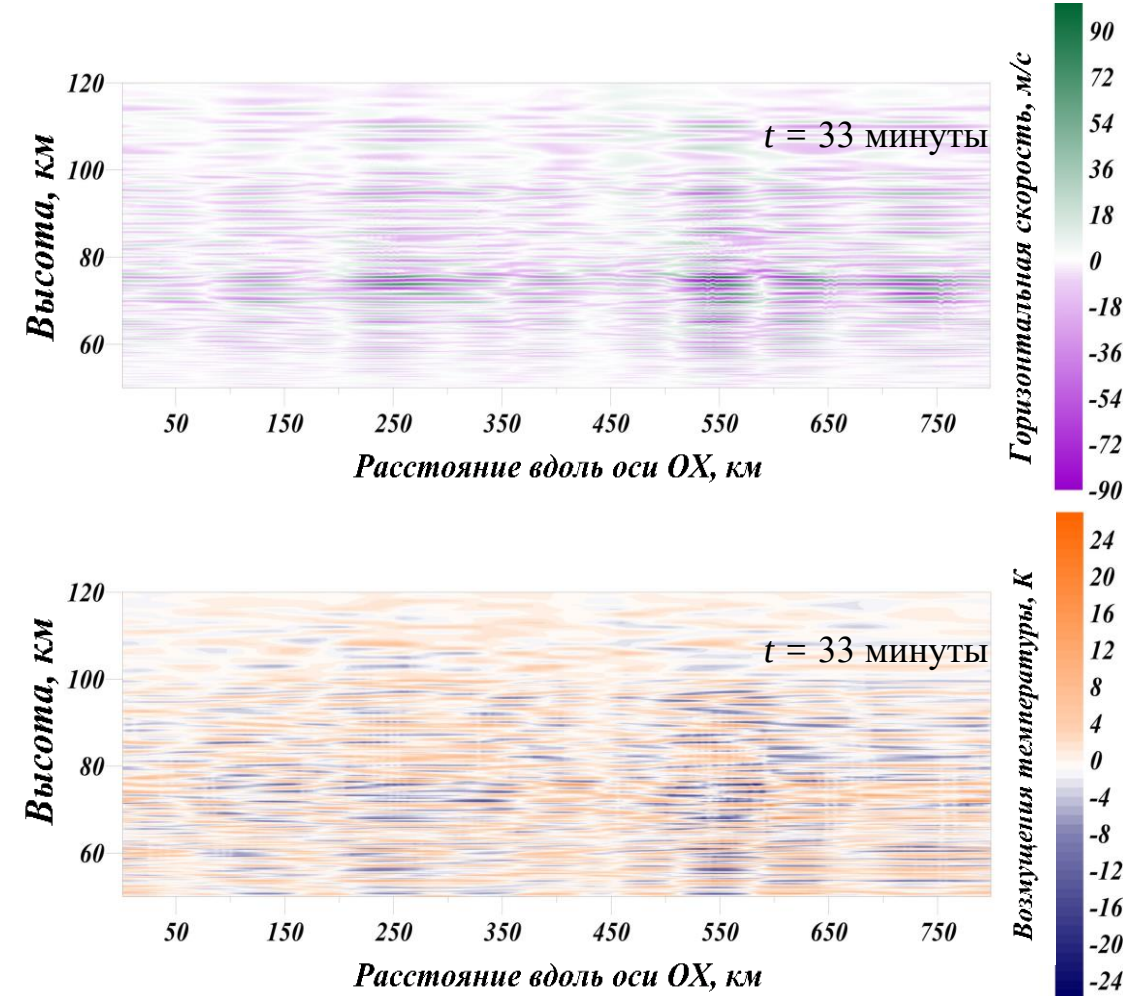
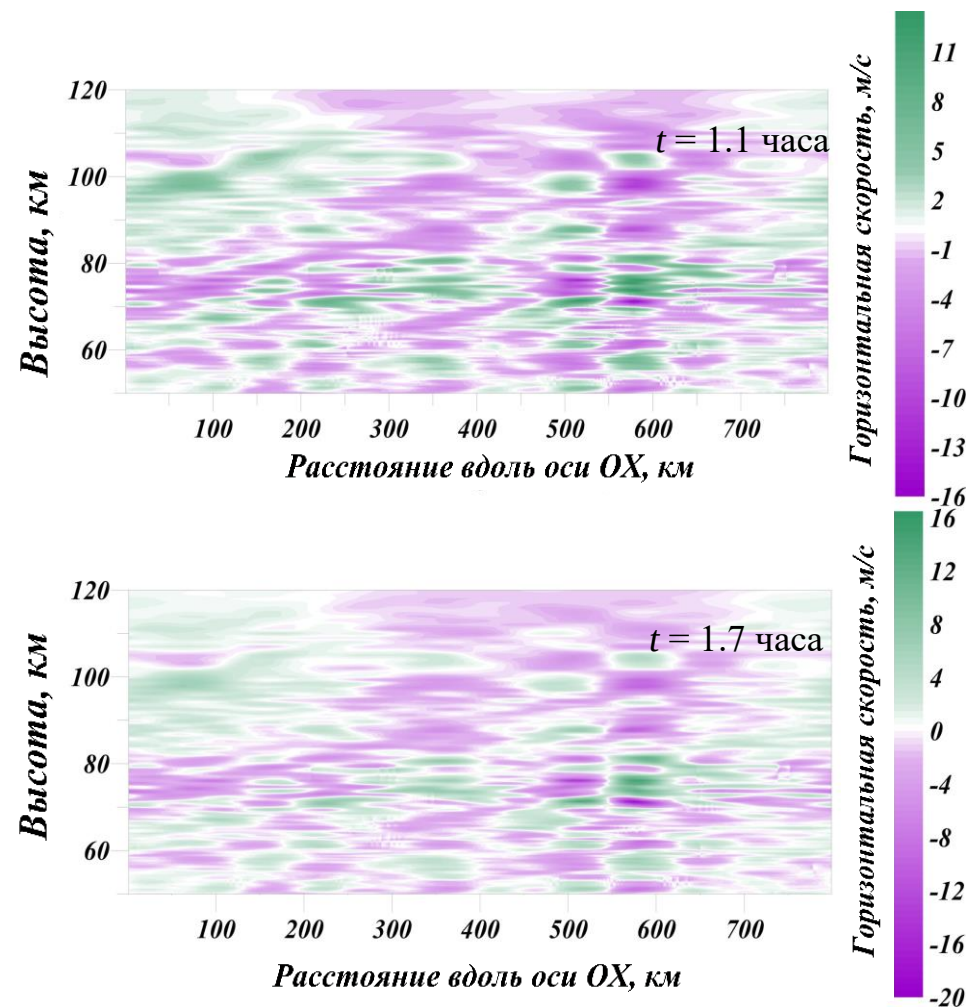
Вертикальный профиль волнового источника $\Delta T_t(z)$ после его включения при фиксированных горизонтальной координате и моменте времени. Изменение амплитуды температурных осцилляций при увеличении высоты определяется конкуренцией между ростом амплитуды колебаний с высотой вследствие падения плотности и уменьшением амплитуды вследствие нарастающей с высотой диссипацией. Выше 120 км диссипация доминирует, и амплитуда осцилляций становится пренебрежимо малой.

Модельные поля в разные моменты времени. На высотах до 100 км вертикальный шаг сетки равен 110 метров, поэтому в расчетах могут моделироваться ВГВ с вертикальной длиной волны более 450 метров.



На высотах ниже 100 – 120 км видны квази-горизонтальные тонкие структуры, которые порождаются построенными волновыми источниками. Волновые источники ослабевают во времени. Амплитуда волн в тонкой структуре со временем уменьшается вследствие разбегания и затухания быстрых волновых мод, не участвующих в формировании анизотропных тонких структур.

Результаты расчетов



Модельные поля горизонтальной скорости для двух более поздних моментов времени. Сравнение показывает малое изменение волнового поля за интервал 0.6 ч. Это подтверждает квазистационарный характер моделируемых анизотропных тонкослоистых структур. Видно, что толщины слоев составляют 1.5- 2.5 км.

Для моделирования более тонких слоистых структур была использована более мелкая сетка с шагом по вертикали $\Delta z = 55$ м на высоте 100 км. Такая сетка позволяет воспроизводить возмущения с вертикальной длиной до 220 м. Анализ показывает, что толщины слоев в тонкой структуре стали менее 1 км.

Показанные волновые поля анизотропны. При построении волновых источников для моделирования тонких структур использовались соотношения линейной теории волн малой амплитуды в атмосфере.

Предложен метод численного моделирования тонких анизотропных структур в атмосфере с использованием нелинейной модели высокого разрешения AtmoSym. В основе разработанного подхода лежит использование экспериментальных данных о пространственно-временной изменчивости тонкой структуры верхней атмосферы и линейной теории внутренних гравитационных волн. Это позволяет построить гидродинамические поля, аппроксимирующие реальные неоднородности. Поля вводятся в источники нелинейной модели для возбуждения собственных атмосферных волновых колебаний с требуемыми параметрами.

Расчеты показали, что моделируемые анизотропные тонко-слоистые структуры имеют квазистационарный характер. Время их жизни примерно совпадает со стабильностью тонких структур в экспериментальных наблюдениях, а масштабы и формы соответствуют существующим экспериментальным данным. Нелинейные взаимодействия различных составляющих волнового спектра тонких структур могут приводить к генерации вторичных волновых мод, что, в свою очередь, может вызывать постепенное изменение и эволюцию тонко-слоистых структур в атмосфере. Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего теоретического и численного изучения тонких структур в атмосфере и для изучения влияния тонких анизотропных структур на распространение атмосферных волн или на ионосферу.