

• **ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА**[2023 \(29\)](#) [Первое информационное
сообщение](#)[Второе информационное
сообщение](#)[Третье информационное
сообщение](#)[Четвертое
информационное
сообщение](#)[Программный комитет](#)[Организационный
комитет](#)[Местный оргкомитет](#)[Организаторы](#)[Спонсоры](#)[Полученные доклады](#)[Программа](#)[Программа \(.pdf\)](#)[Авторский указатель](#)[Организации-участники](#)[Труды](#)[Дополнительная
информация](#)[Родственные конференции](#)[Онлайн регистрация,
приём докладов и оплата
участия](#)[2022 \(28\)](#) [2021 \(27\)](#) [2020 \(26\)](#) [2019 \(25\)](#) [2018 \(24\)](#) [2017 \(23\)](#) [2016 \(22\)](#) [2015 \(21\)](#) [2014 \(20\)](#) [2013 \(19\)](#) [Главная](#) / [Оптика атмосферы и океана](#) / [2023 \(29\)](#) / Труды

XXIX Международный Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы"

26-30 ИЮНЯ 2023 ГОДА, МОСКВА**MOSCOW 2023****ATMOSPHERIC and OCEAN OPTICS. ATMOSPHERIC PHYSICS**

Труды

**Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы
XXIX Международного симпозиума.****Электронный ресурс**

Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2023. - 169 МВ. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: PC Pentium 1 или выше; Acrobat Reader 4.0 или выше.

ISBN 978-5-94458-196-9

© ИОА СО РАН, 2023

Содержание

1. [Конференция А. Молекулярная спектроскопия и распространение излучения в атмосфере и океане](#)
2. [Конференция В. Исследование атмосферы оптическими методами](#)
3. [Конференция С. Исследование океана оптическими методами](#)
4. [Конференция D. Физика тропосферы](#)
5. [Конференция Е. Физика средней и верхней атмосферы](#)

КОНФЕРЕНЦИЯ Е

**ФИЗИКА СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ
АТМОСФЕРЫ**

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА ВТОРИЧНЫХ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Ефимов М.М.¹, Гаврилов Н.М.¹, Кшевецкий А.В.², Коваль А.В.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

e-mail: matvey.efimov.96@mail.ru, n.gavrilov@spbu.ru, renger@mail.ru, a.v.koval@spbu.ru

Численно моделируется эволюция горизонтальных пространственных спектров первичных и вторичных акустико-гравитационных волн (АГВ) на фиксированных высотных уровнях в средней и верхней атмосфере в различные моменты времени. Показано, что через небольшое время после включения источника плоских волн на нижней границе модели спектр в основном состоит из пика, соответствующего первичной АГВ. Позднее в спектрах появляются пики вторичных волн на горизонтальных волновых числах кратных волновым числам первичной АГВ.

Акустико-гравитационные волны (АГВ) являются важной составляющей динамики средних и верхних слоев атмосферы. Генерируемые в нижних слоях атмосферы волны распространяются вверх в мезосферу и термосферу, перенося импульс и энергию в более высокие слои атмосферы. Благодаря диссипации и передаче импульса к среднему потоку, они могут формировать развороты зональной циркуляции в мезосфере/нижней термосфере (МНТ) и влиять на общую циркуляцию средней и верхней атмосферы.

В этой работе выполнено численное моделирование спектра первичных АГВ, генерируемых волновым источником на нижней границе модели и спектр вторичных АГВ, которые порождаются на разных уровнях средней и верхней атмосферы этими первичными волнами. Приведены примеры, показывающие постепенное формирование спектра вторичных волн после включения волнового источника в модели.

Использована трехмерная численная модель высокого разрешения [1] для нелинейных атмосферных АГВ, которая использует плоскую геометрию и полные гидродинамические трехмерные уравнения [2]. Модель АтмоСим учитывает диссипативные и нелинейные процессы, влияющие на распространение АГВ. Профили фоновой температуры $T_0(z)$ для моделирования берутся из полуэмпирической атмосферной модели NRLMSISE-00. Фоновые коэффициенты динамической молекулярной вязкости и теплопроводности определяются с использованием формулы Сазерленда. Учитывается фоновая турбулентная вязкость и теплопроводность, имеющие максимумы около $10 \text{ м}^2/\text{с}$ в пограничном слое и в нижней термосфере и минимумы до $0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ в стратосфере [2]. На верхней границе $z = 600 \text{ км}$ заданы нулевые значения вертикальных градиентов температуры и горизонтальной скорости, а также

нулевая вертикальная скорость [2]. На высотах до 200 км, анализируемых в этой работе, влияние верхних граничных условий незначительно. Нижние граничные условия на поверхности Земли имеют следующий вид [2]:

$$(T')_{z=0} = 0, \quad (u)_{z=0} = 0, \quad (v)_{z=0} = 0, \quad (w)_{z=0} = W_0 \cos(\sigma t - \vec{k}_h \cdot \vec{r}), \quad (1)$$

где T' , u , v , w – волновые возмущения температуры и компонент скорости вдоль горизонтальных осей x , y и вертикальной оси z , соответственно. Последнее соотношение для вертикальной скорости на земной поверхности в (1) служит источником плоских АГВ в модели АтмоСим, причем W_0 и σ – амплитуда и частота возбуждения волны; $\vec{k}_h(k_x, k_y)$ и $\vec{r}_h(x, y)$ – горизонтальные волновой вектор и радиус-вектор. Плоские волновые моды можно рассматривать, как спектральные компоненты тропосферных конвективных, турбулентных и метеорологических процессов.

Момент $t = 0$ считается временем активации волнового источника в модели, причем при $t > 0$ амплитуда источника W_0 в (1) не изменяется. Следует ожидать, что при малых амплитудах источника волны в уравнении (1) численное решение в нижней и средней атмосфере должно стремиться при $t \gg 0$ к установившимся плоским АГВ, соответствующим стандартной линейной теории. В настоящем исследовании рассматриваются моды АГВ, распространяющиеся вдоль оси x , направленной на восток, и предполагается, что горизонтальный размер рассматриваемой атмосферной области равен длине широтного круга на широте 50° с. ш., что составляет $L_h \approx 27\,000$ км. На горизонтальных границах этого круга широты мы используем периодические граничные условия [2]. Моделирование проводится с использованием источника волн (1) с амплитудой АГВ $W_0 = 0,1$ мм/с.

Используемый диапазон горизонтальных фазовых скоростей $c_h \sim 50 - 200$ м/с соответствует АГВ с относительно большими вертикальными длинами волн, которые могут распространяться от земной поверхности до верхних слоев атмосферы. Использовано число длин волн вдоль круга широты, равное $n = 32$. Это соответствует горизонтальной длине волны $\lambda_h = L_h/n \approx 840$ км и периодам АГВ $\tau = \lambda_h/c_h \sim 4.7 - 1.2$ ч для диапазона значений c_h , указанного выше. Шаг между узлами горизонтальной сетки численной модели равен $\Delta x = \lambda_h/16$, а временной шаг вычислений был автоматически выбран равным $\Delta t \approx 2,9$ с. Вертикальная сетка модели охватывает высоты от земной поверхности до 600 км и содержит 1024 неравноотстоящих узла. Шаг вертикальной сетки изменяется от 12 м внизу до 3 км около верхней границы, поэтому около 70% узлов сетки расположены в нижних и средних слоях атмосферы.

На рис. 1 представлены спектры вертикальной скорости на различных высотах в средней и верхней атмосфере в момент модельного времени $t = 10$ ч после включения волнового источника (1). Видно, что вблизи волнового источника на высоте 0.1 км доминирует пик с $k_h = k_{h1} = 2\pi/\lambda_h$. На высотах мезосферы и термосферы в спектрах на рис. 1 кроме основного пика первичной АГВ с $k_h = k_{h1}$ имеются пики на кратных волновых числах $k_{h2} = 2k_{h1}$ и $k_{h3} = 3k_{h1}$. Эти пики соответствуют вторичным волновым модам, которые возникают из-за нелинейности уравнений гидродинамики.

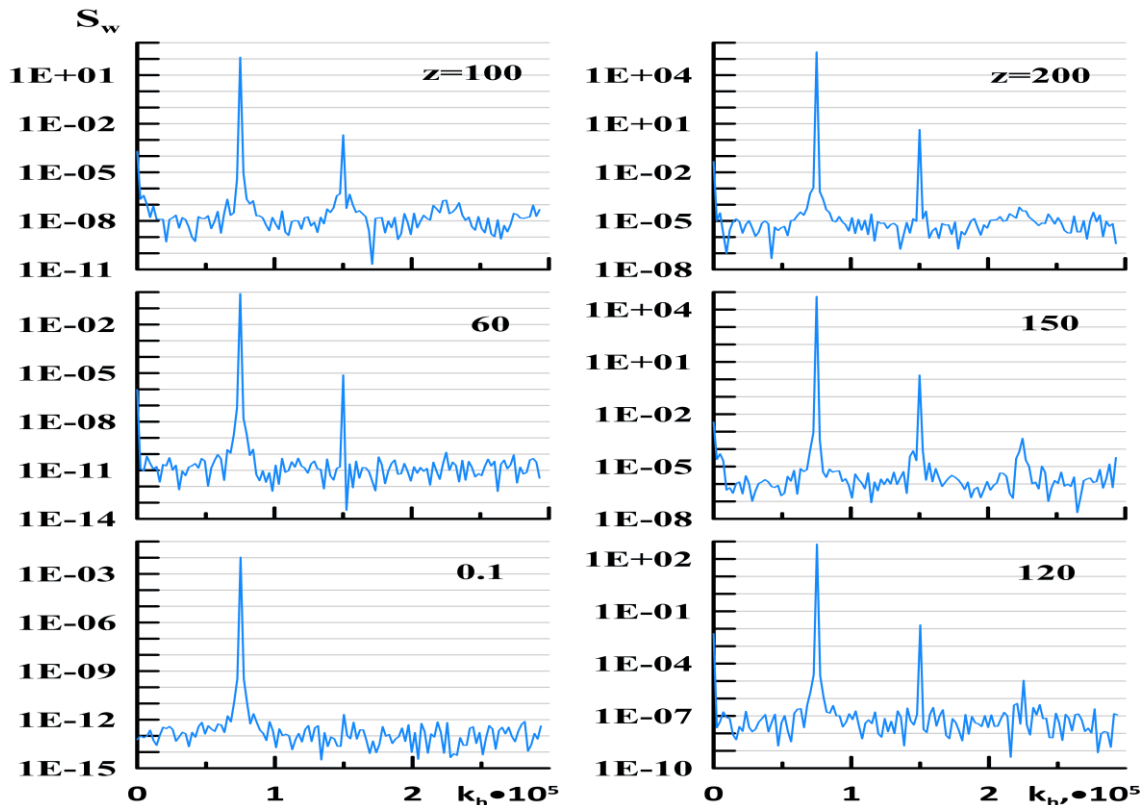


Рисунок 1 - Спектральная плотность модельных вариаций вертикальной скорости (в $\text{м}^3/\text{с}^2$) в зависимости от k_h (в м^{-1}) на горизонтальных плоскостях, расположенных на различных высотах (указаны цифрами в км) в момент времени $t = 10$ ч после включения волнового источника (1) на земной поверхности с $W_0 = 0.1$ мм/с и горизонтальной фазовой скоростью $c_h = 50$ м/с

Рис. 2 и 3 аналогичны рис. 1, но для более поздних моментов времени, соответственно, $t = 20$ ч и $t = 40$ ч после включения волнового источника. Последовательное рассмотрение рис. 1 – 3 показывает, что амплитуда пика, соответствующего первичной АГВ, возрастает по мере распространения волновой энергии на большие высоты после включения волнового источника на земной поверхности. Соответственно, возрастают спектральные пики вторичных АГВ.

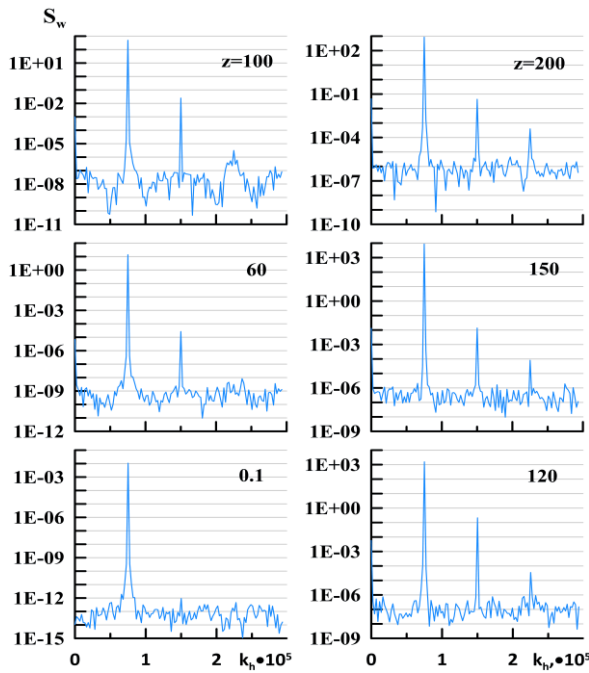


Рисунок 2 - Спектральная плотность модельных вариаций вертикальной скорости для $t = 20$ ч.

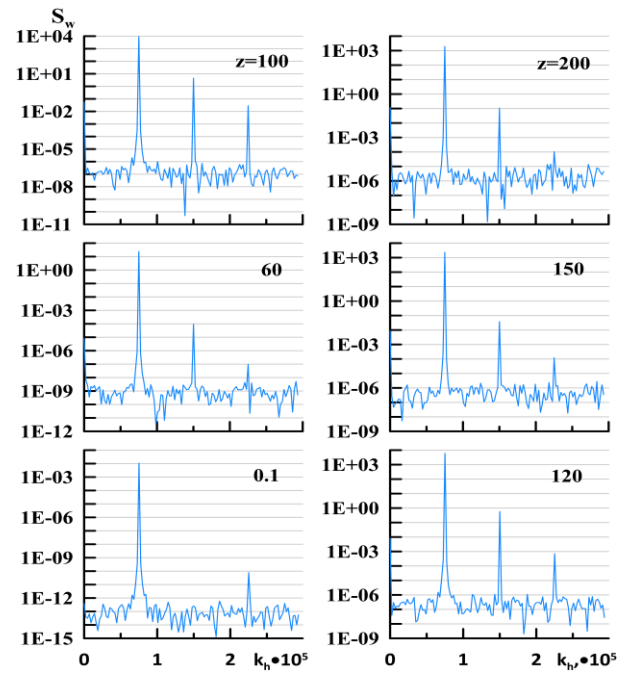


Рисунок 3 - Спектральная плотность модельных вариаций вертикальной скорости для $t = 40$ ч.

В частности, пики третьей гармоники с $k_h = 3k_{h1}$ относительно малы на рис. 1 и увеличиваются на рис. 2 и рис. 3. Это показывает постепенное развитие спектра вторичных АГВ в результате непрерывных нелинейных взаимодействий в процессе распространения атмосферных АГВ от поверхности Земли до высот термосферы.

Ограниченные вычислительные мощности позволили в данной работе провести моделирование только с достаточно большим шагом горизонтальной сетки и проанализировать только первичную волну и два первых спектральных пика вторичных мод. В будущем требуется проведение аналогичного моделирования с более мелким шагом, чтобы изучить особенности формирования спектра вторичных АГВ в более широкой области волновых чисел.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-27-00171).

1. АтмоСим. 2017. Многомасштабная модель атмосферы от поверхности Земли до 500 км, URL: <http://atmos.kantiana.ru/language/ru/> (последнее посещение 15.02.2023)

2. Гаврилов Н.М., Киевецкий С.П. Численное моделирование распространения нелинейных акустико-гравитационных волн в средней и верхней атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 76-83.