

Влияние фонового ветра на волновые возмущения в верхней атмосфере

Курдяева Ю.А.¹, Карпов И.В.¹, Кшевецкий С.П.^{1,2,3}

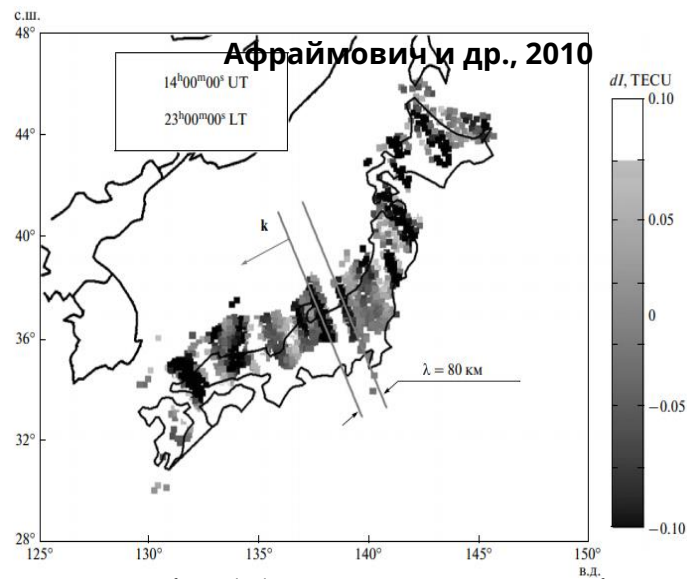
¹ Калининградский филиал Института Земного Магнетизма, Ионосферы и распространения радиоволн РАН

² Балтийский государственный университет им. И. Канта

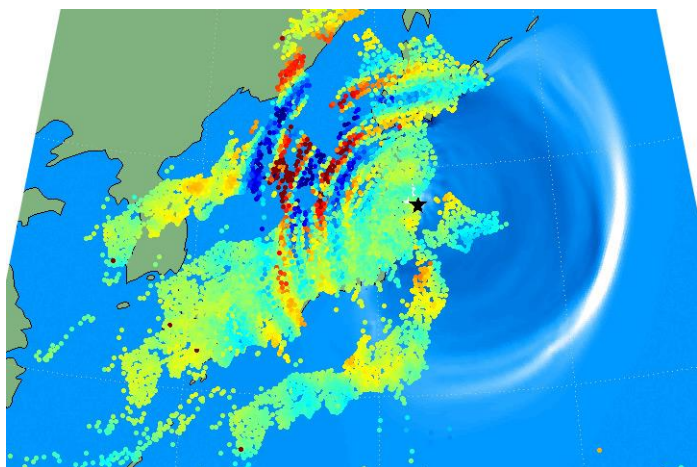
³ Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике
"ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОСМОСЕ И ОКОЛОЗЕМНОЙ СРЕДЕ"
XVII Конференция молодых ученых
"Взаимодействие полей и излучения с веществом" Иркутск, 5-10 сентября 2022 г.

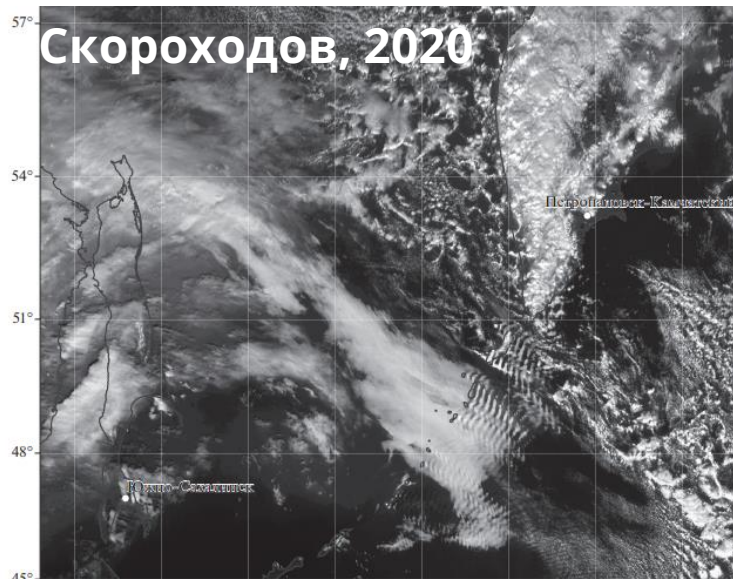
Источники атмосферных волн в тропосфере



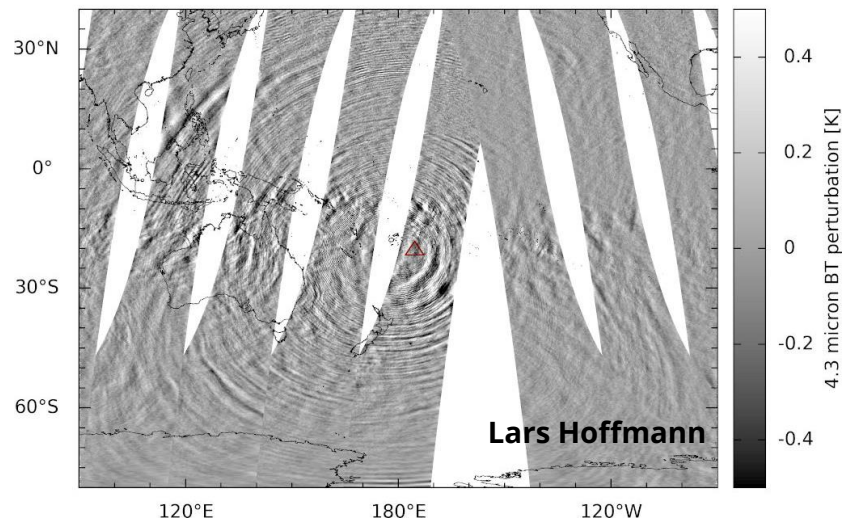
Structure of total electron content variations after passing through the solar terminator



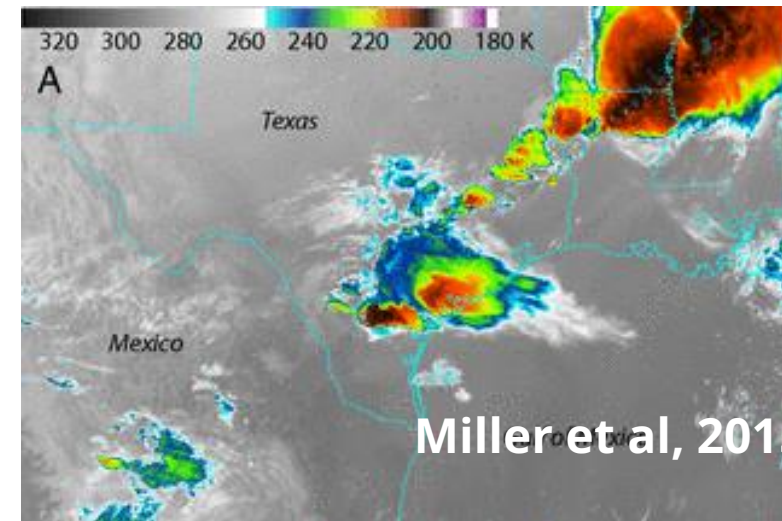
The Tohoku-Oki earthquake and the observed disturbances in the upper layers of the Earth's atmosphere
<https://photojournal.jpl.nasa.gov/animation/PIA14430>



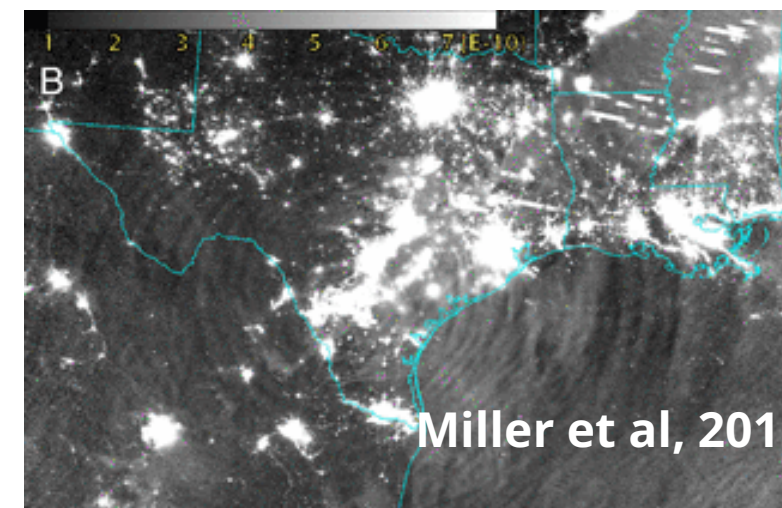
Cloud "print" of internal gravity waves over the northern islands of the Kuril Archipelago



Observations of the Aqua satellite by the AIRS atmospheric infrared probe during and after the eruption of the Tongo volcano



(A) Gravity waves caused by thunderstorms. The tops of the coldest clouds (red fading to black) indicate deep convection and clouds extending beyond the tropopause



(B) Corresponding image of the nightglow obtained with the day/night radiometer on the Suomi National Polar Orbiting Partnership satellite (nadir measurements)

Цели

Глобальные:

- Изучить особенности распространения атмосферных волн, генерируемых тропосферными источниками.

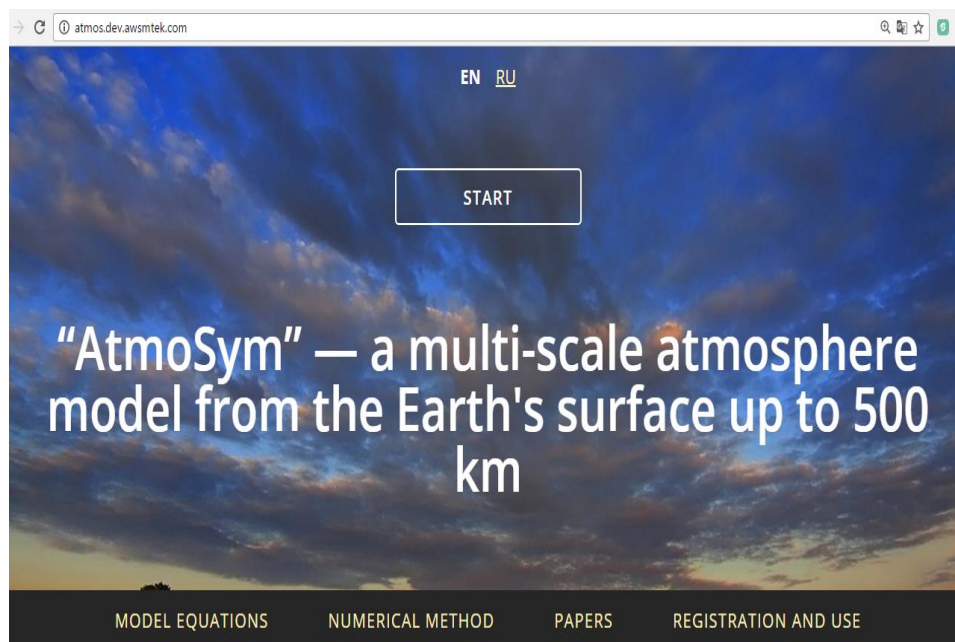
Ветер в атмосфере взаимодействует с атмосферными волнами разных масштабов и может определять их изменение характеристик практически на всем вертикальном масштабе

Эффекты взаимодействия фоновых ветровых структур и атмосферных волн влияют на их прохождение в атмосферу и ионосферу, возможное задержание в нижних слоях атмосферы.

В рамках данного исследования:

- Изучить особенности влияния атмосферного ветра на вертикальное распространение ВГВ, генерируемых модельными тропосферными источниками.

AtmoSym



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0,$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \Delta u,$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nu \Delta v, \quad \rho \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g + \nu \Delta w,$$

$$\rho \frac{d}{dt} \frac{c_v}{\mu} T = -P \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + k \Delta T + \rho Q(x, y, z, t),$$

$$P = \frac{\rho R T}{\mu}.$$

Нижние граничные условия:

$$U(x, z = 0, t) = 0$$

$$W(x, z = 0, t) = 0$$

$$T(x, z = 0, t) = T_0(0)$$

Initial conditions:

$$u(x, z, t=0)=0$$

$$w(x, z, t=0)=0$$

$$\rho(x, z, t)=\rho_0(z)$$

$$T(x, z, t)=T_0(z)$$

Верхние граничные условия
(верхняя граница $h = 500$ km):

$$\frac{\partial T}{\partial z}(x, z = h, t) = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}(x, z = h, t) = 0,$$

$$w(x, z = h, t) = 0$$

Граничные условия
на горизонтальных границах:

$$u(x=L_x, y, z, t)=u(x=0, y, z, t)$$

$$w(x=L_x, y, z, t)=w(x=0, y, z, t)$$

$$p(x=L_x, y, z, t)=p(x=0, y, z, t)$$

$$\rho(x=L_x, y, z, t)=\rho(x=0, y, z, t)$$

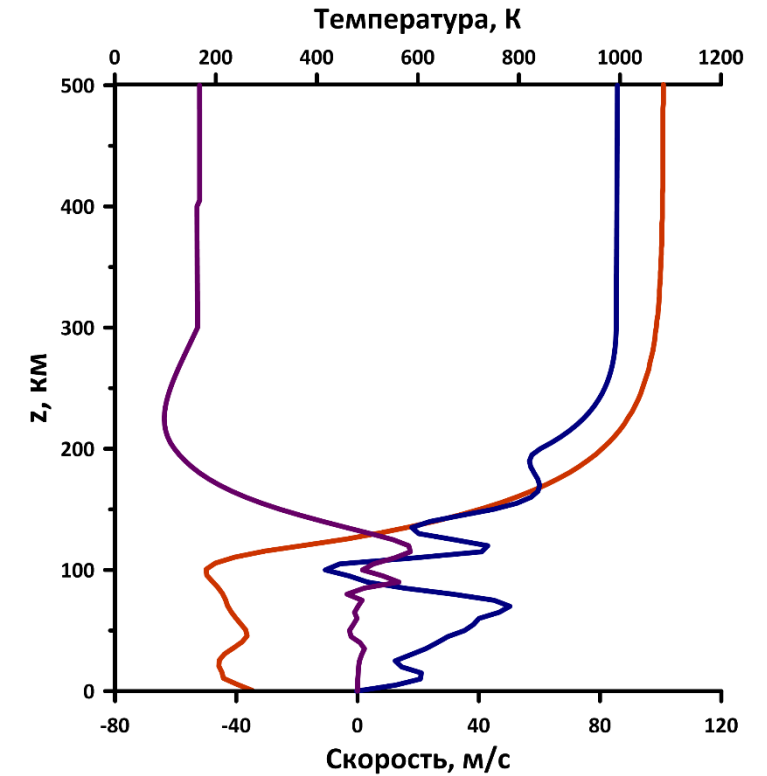
$$T(x=L_x, y, z, t)=T(x=0, y, z, t)$$

Моделирование

В численных расчетах модельный тропосферный источник тепла, отражающий конвективные процессы в тропосфере, аппроксимируется гауссовой функцией:

$$f(x, z, t) = A \exp \left(- \left(\frac{x - x_0}{D_x} \right)^2 - \left(\frac{z - z_0}{D_z} \right)^2 \right) (1 - e^{t/\tau}) \sin(\omega t)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{900\text{с}}, \omega = \frac{2\pi}{1800\text{с}}$$



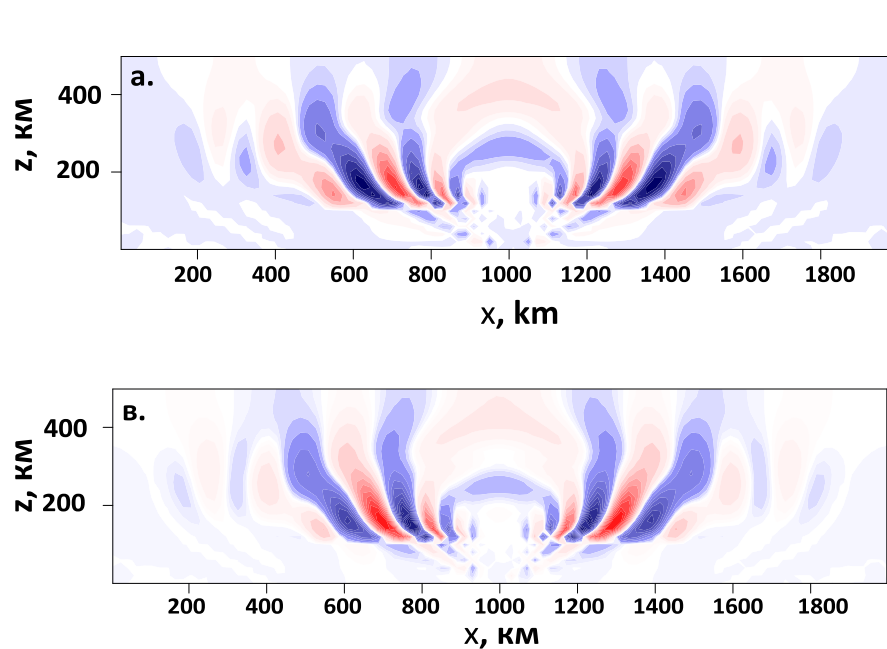
Фоновые значения температуры (оранжевая линия) и зональной (синяя линия) и меридиональной (фиолетовая линия) компонент скорости

Моделирование

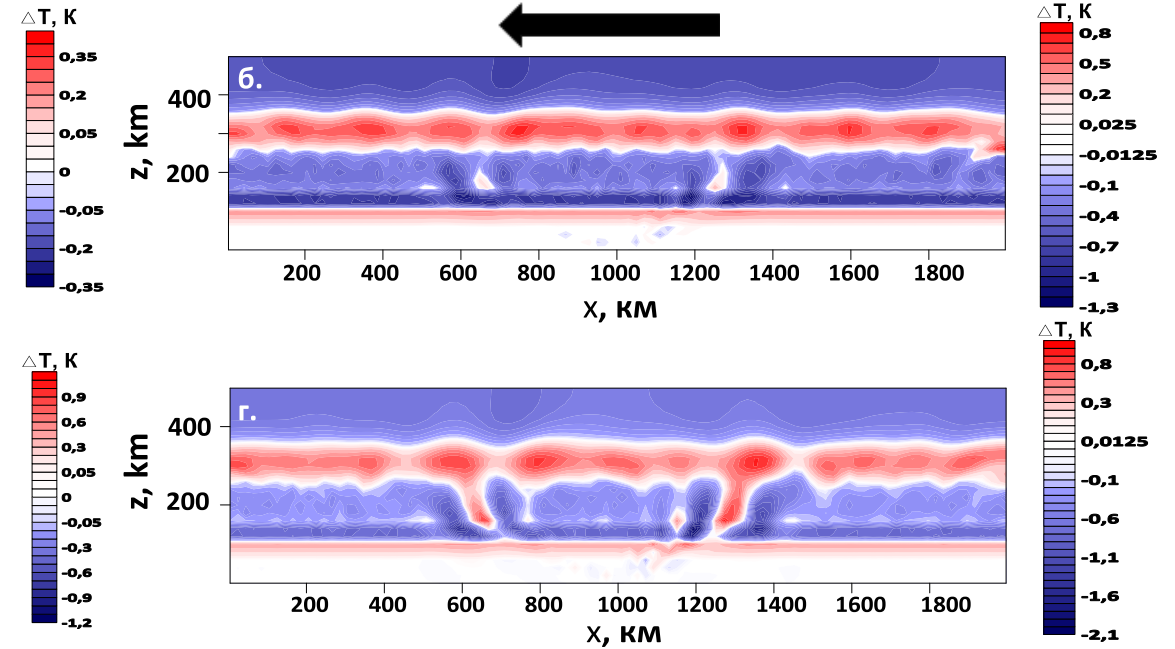
$$\omega = \frac{2\pi}{1800\text{с.}}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{900c.}$$

Без ветра

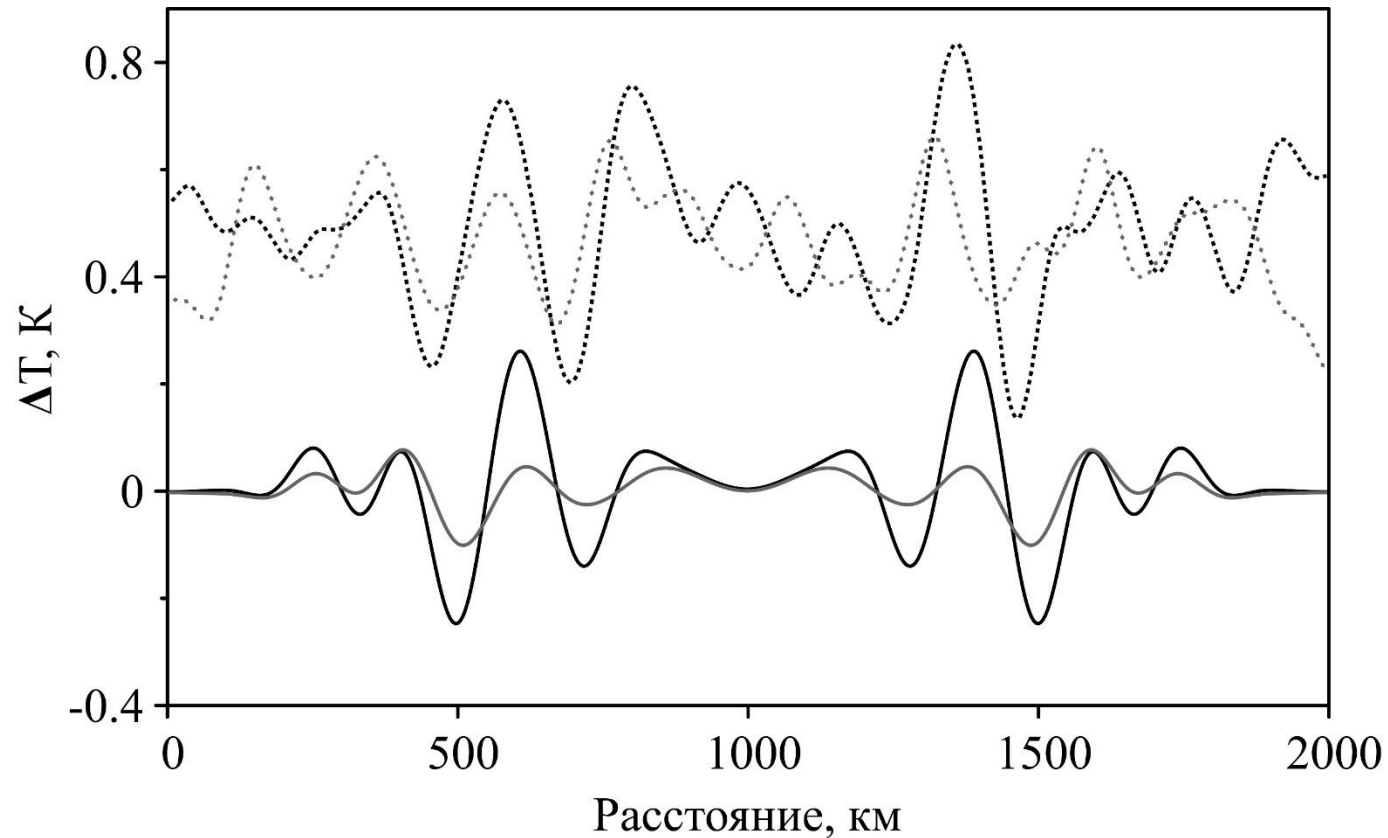


С ветром

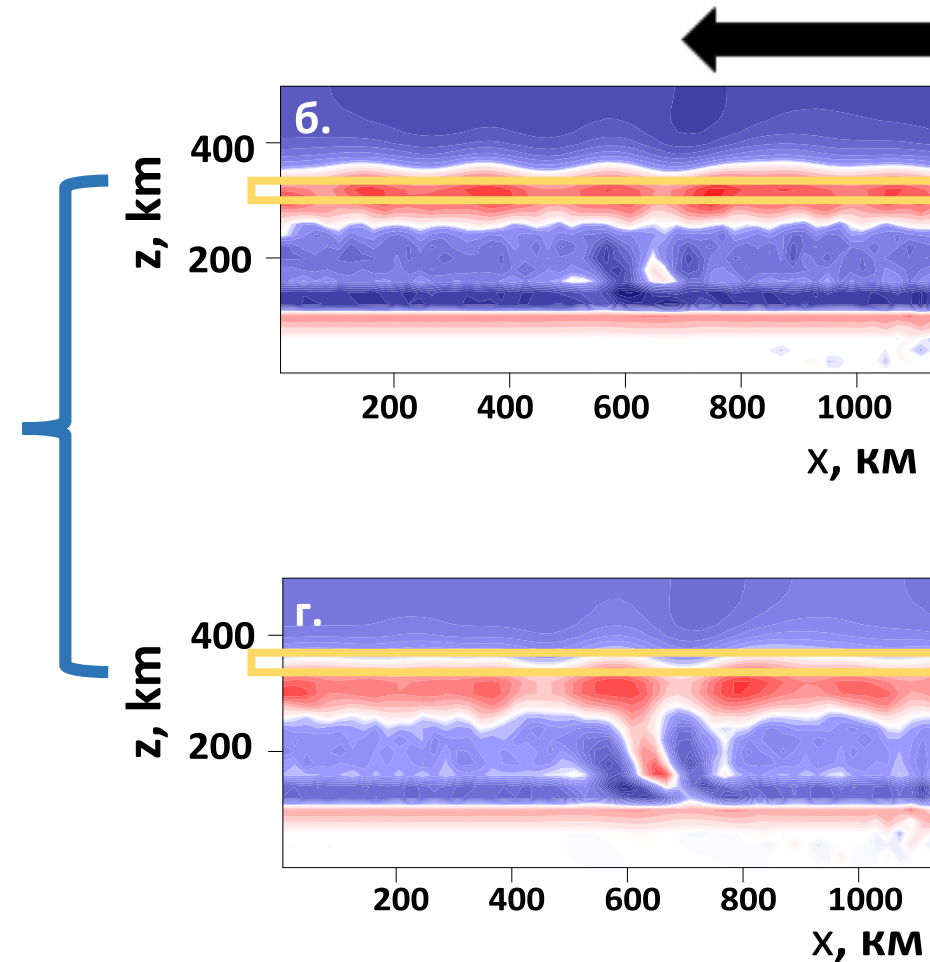


Распределение волновой добавки к температуре при работе тропосферного источника тепла через 30 минут после начала расчета

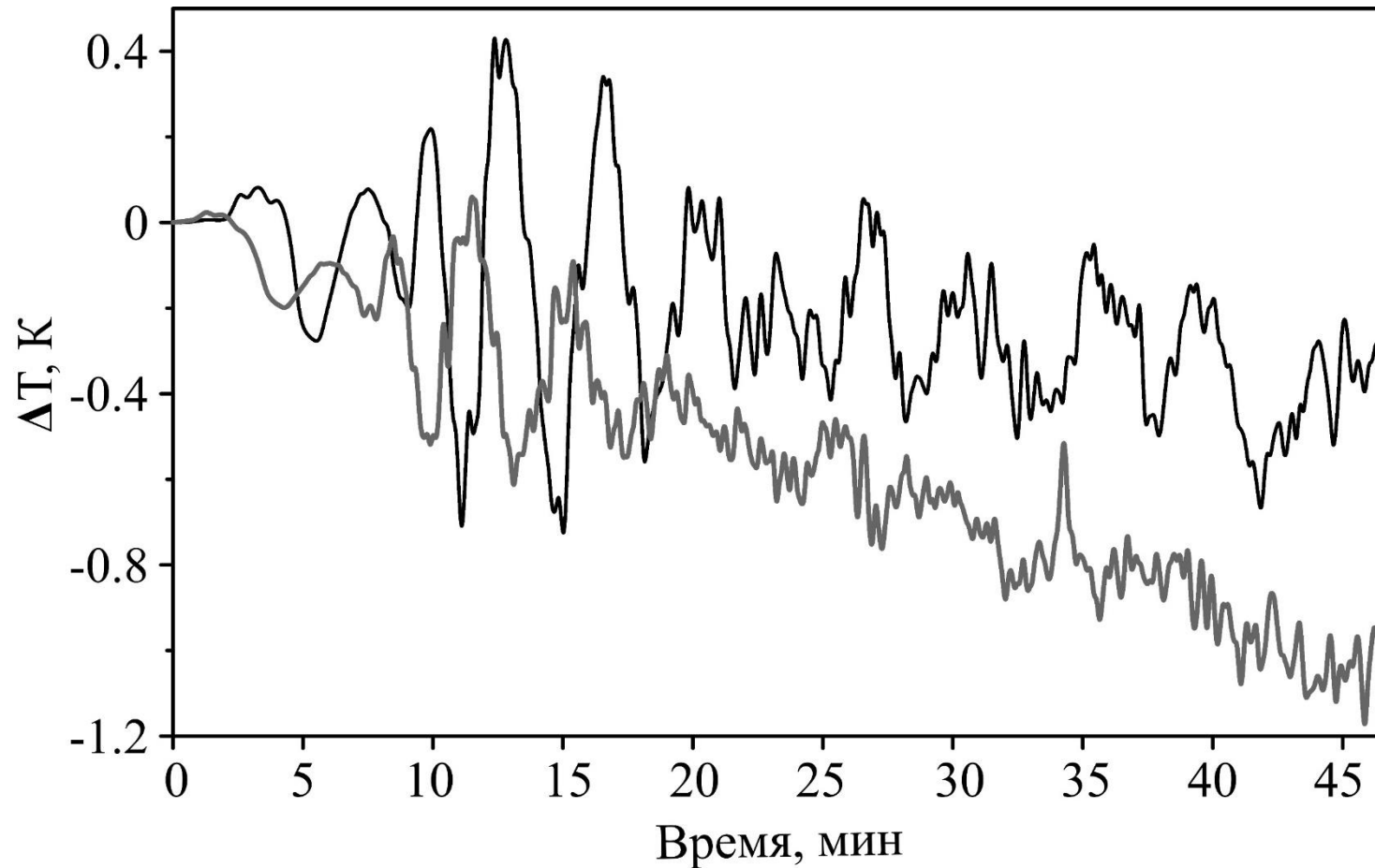
Моделирование



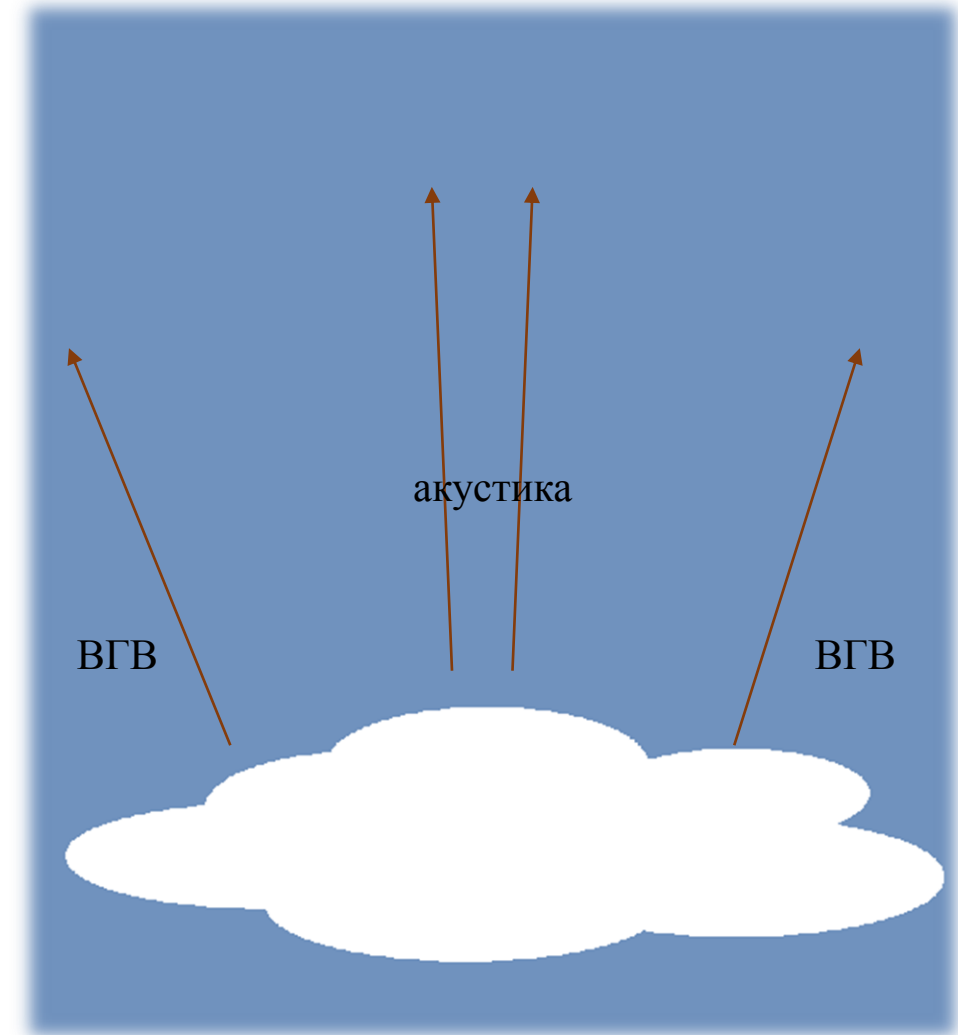
Вариации температуры вдоль горизонтальной оси при работе тропосферного источника тепла на высоте 350 км через 30 минут после начала расчета с периодом $T=15$ минут без учета ветра (черная линия) и с учетом ветра (черная штриховая линия), с периодом $T=30$ минут без учета ветра (серая линия) и с учетом ветра (серая штриховая линия).



Моделирование

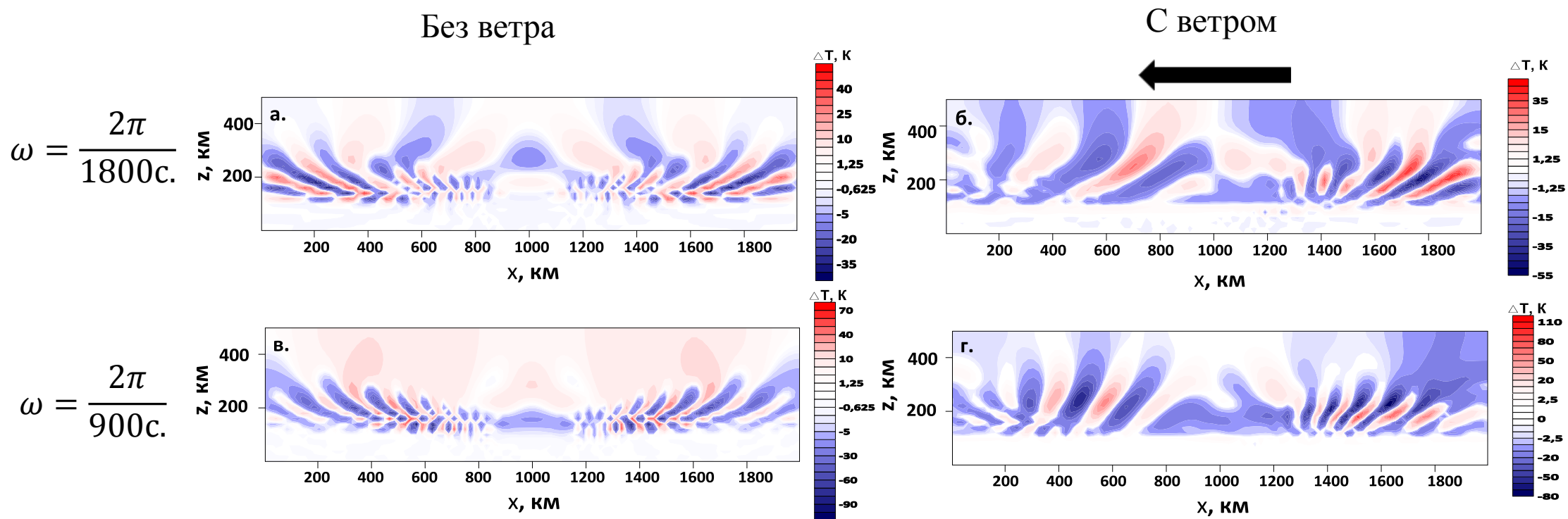


Зависимость вариаций температуры от времени над тропосферным источником на высотах ~145 км (серая линия) и ~190 км (черная линия) с периодом $T=15$ минут.



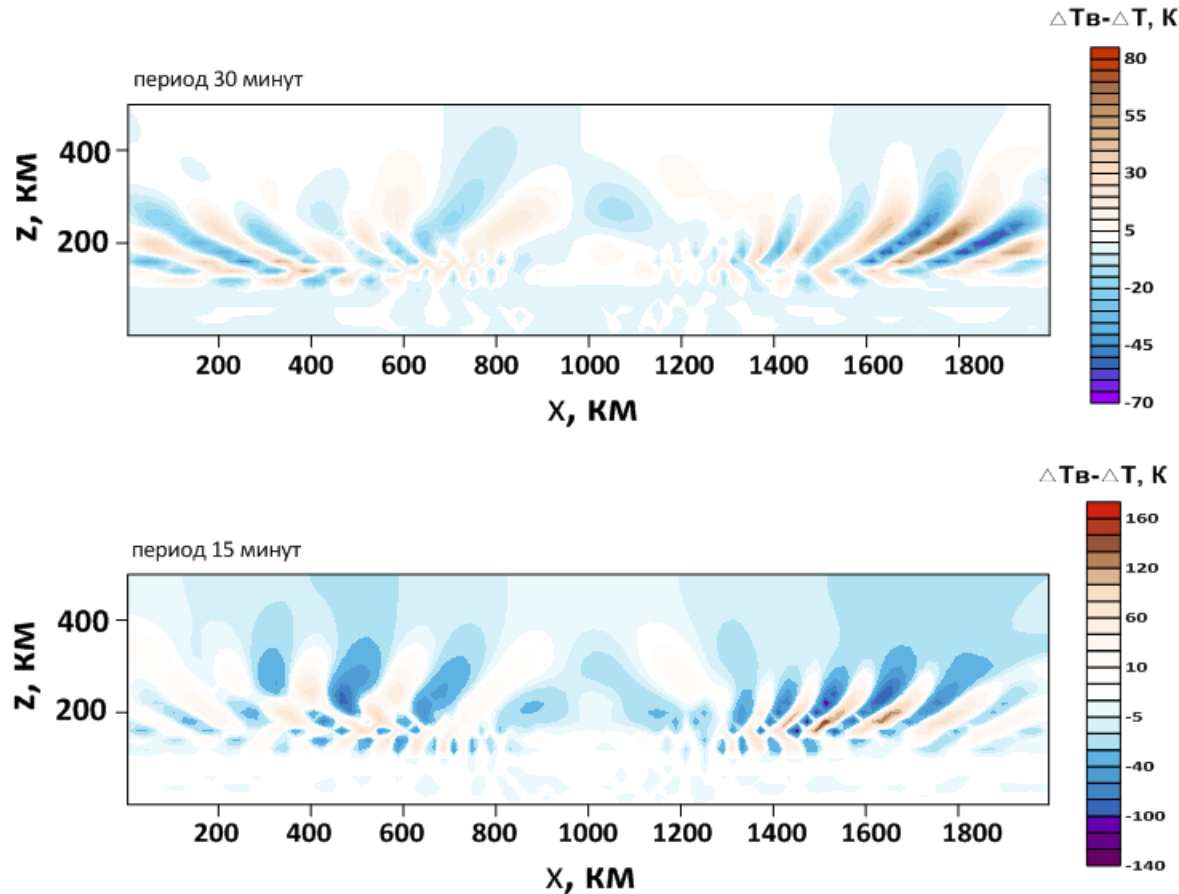
Кшевецкий С.П., Курдяева Ю.А., Куличков С.Н. Исследование особенностей распространения атмосферных волн, генерируемых тропосферными источниками и вариациями приземного давления // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 37-51.

Моделирование



Распределение волновой добавки к температуре при работе тропосферного источника тепла через часа после начала расчета

Интерпретация эффекта «фильтрации»



$$m^2 = k^2 \left(\frac{N^2}{(\omega - kU)^2} - 1 \right)$$

m, k – вертикальная и горизонтальная компоненты волны
 N – частота Вайсзеля – Брента
 U – горизонтальная компонента термосферного ветра.

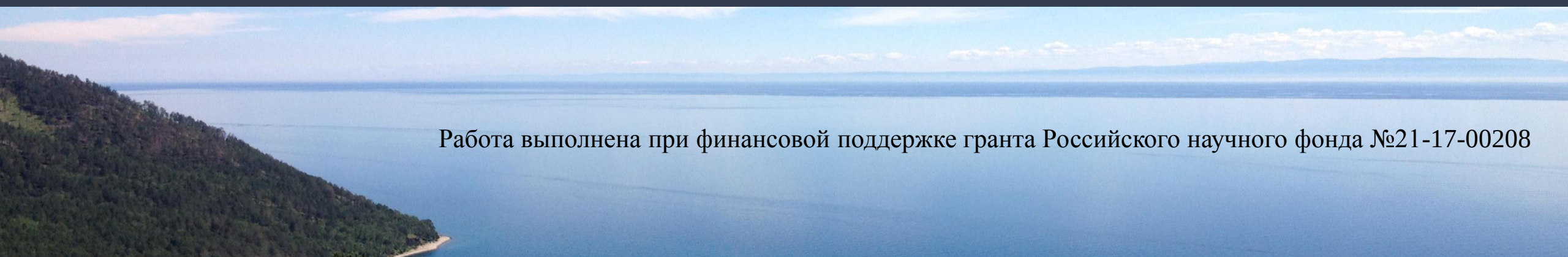
Положительные значения m^2 соответствуют волнам, распространяющимся по вертикали, а отрицательные значения соответствуют затухающим волнам. Частотные характеристики волн, захватываемых в волновод Доплера, определяются скоростью ветра и горизонтальной компонентой волнового вектора.

Разность между вариациями температуры с учетом ветра и без учета ветра через 2 часа после начала расчета при работе тропосферного источника тепла

Выводы

Результаты численных экспериментов показывают, что ВГВ, возбуждаемые тепловыми источниками в тропосфере, достигают высот термосферы и существенно влияют на пространственные и временные вариации атмосферных параметров. Волновые возмущения в термосфере возникают достаточно быстро (течения 30 мин). Это обусловлено распространением и диссипацией в термосфере инфразвуковых волн, которые генерируются совместно с ВГВ тепловыми тропосферными источниками. Существенное влияние на пространственно-временную структуру волновых возмущений термосферы оказывает термосферный ветер. Это влияние проявляется в следующем:

1. Распространение волн с малыми пространственными масштабами (менее 100 км) на высотах менее 150 км носит волноводный характер. Возникновение такого волновода определяется вертикальной структурой ветра в нижней термосфере.
2. В верхней термосфере отмечается повышение амплитуд и уменьшении пространственных масштабов волн, распространяющихся против термосферного ветра. Для волн, распространяющихся в направлении термосферного ветра отмечается понижение амплитуд и увеличение пространственных масштабов.



Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №21-17-00208