

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
НЕЛИНЕЙНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН  
В НАГРЕВАЕМОЙ СОЛНЕЧНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ АТМОСФЕРЕ**

**К. В. Краснобаев**

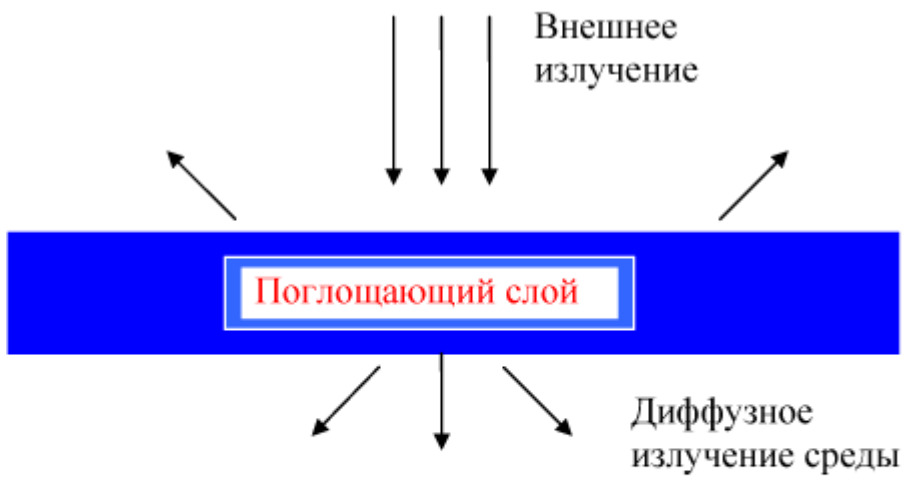
МГУ им. М. В. Ломоносова, ИКИ РАН

**Исследуется:** распространение акустических волн конечной амплитуды  
в газо-пылевой среде в поле внешнего излучения ;

**Цель:** формулировка условий роста (усиления) возмущений,  
определение закона изменения амплитуды волны с  
расстоянием от источника возмущения, оценка вклада  
неустойчивых возмущений в наблюдаемые турбулентные  
движения в нижней термосфере.

## СХЕМА

### взаимодействия внешнего излучения со средой



Поглощающий слой (волокно, сферический объем, ...) в поле внешнего излучения

## МОДЕЛЬ СРЕДЫ

**СОСТАВ:** молекулы  $N_2, O_2$  (распределены по высоте согласно модели стандартной атмосферы Земли), пыль (массовая концентрация  $\sim 10^{-2}$ , радиус пылинки  $\sim 10^{-5}$  см, вещество пылинок - диэлектрик с небольшой примесью металлов).

**ПОТОК ВНЕШНЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ** в диапазоне  $1000 - 3000 \text{ \AA} \sim 5 \cdot 10^3 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

**ТЕМПЕРАТУРА СРЕДЫ**  $\sim 200 - 500 \text{ K}$ .

**ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЫЛИ** : поглощается внешнее излучение, эмиссия в инфракрасном диапазоне; малая часть ( $\sim 10^{-1}$ ) поглощаемой энергии передается путем столкновений газу.

**СЛЕДСТВИЕ** : температура вещества пылинок  $T_g \approx \text{const}$  и слабо зависит от движения среды.

**ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ГАЗА** : нагрев при столкновениях с пылинками, потери энергии за счет высвечивания и (или) в результате турбулентного перемешивания .

## ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0,$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \operatorname{grad} p = 0,$$

$$\frac{dE}{dt} + \frac{p}{\rho} \operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{\mathcal{G} - \mathcal{L}}{\rho},$$

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + \varepsilon_\nu,$$

$$E = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho}, \quad \mathcal{G} = \int_0^\infty \int_{4\pi} \alpha_\nu I_\nu d\nu d\omega, \quad \mathcal{L} = 4\pi \int_0^\infty \varepsilon_\nu d\nu.$$

Искомые функции пространственных координат  $(x, y, z)$  и времени  $t$  :

плотность  $\rho$ , скорость  $\mathbf{v}$ , давление  $p$ , интенсивность излучения  $I_\nu$  ( $\nu$  - частота квантов,  $\omega$  - телесный угол,  $\alpha_\nu$  и  $\varepsilon_\nu$  - соответственно коэффициенты поглощения и излучения,  $s$  - расстояние вдоль траектории фотона).

В общем случае система уравнений РГД включает вязкость и теплопроводность, а также уравнения кинетики фотохимических реакций.

## ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ БЕГУЩИХ ВОЛН

Критерии неустойчивости стационарного  $((\mathcal{G} - \mathcal{L}) \equiv -\rho Q = 0)$  состояния (Дж. Филд, 1965):

$$T_0 Q_T - \rho_0 Q_\rho < 0,$$

(конденсационная мода),

$$T_0 Q_T + \frac{1}{\gamma - 1} \rho_0 Q_\rho < 0$$

(квазиизэнтропические  
бегущие волны).

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + \left(a_0 + \frac{\gamma + 1}{2} u'\right) \frac{\partial u'}{\partial x} = \mu^* u' + \nu^* \frac{\partial^2 u'}{\partial x^2}, \quad (1)$$

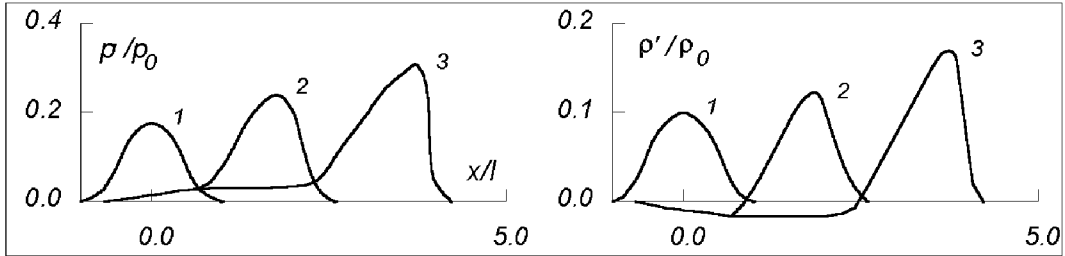
$$\mu^* = -\frac{\gamma - 1}{2} \left(Q_p + \frac{1}{a_0^2} Q_\rho\right) \rho_0, \quad a_0^2 = \frac{\gamma p_0}{\rho_0},$$

**ОБОБЩЕНИЯ** : цилиндрические и сферические волны ; неоднородная движущаяся среда ; учет процессов релаксации . В общем случае возмущение скорости имеет вид:

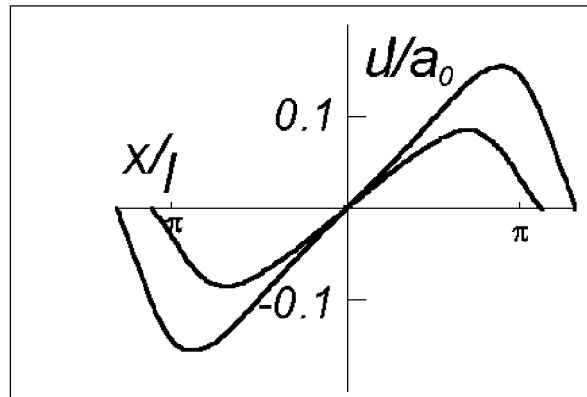
$$u' = u'(t_0) \left(\frac{r_0}{r}\right)^{\frac{d-1}{2}} \exp\left(\frac{\mu^*(r - r_0)}{a_0}\right)$$

( $r$  - пространственная координата,  $d$  -размерность задачи).

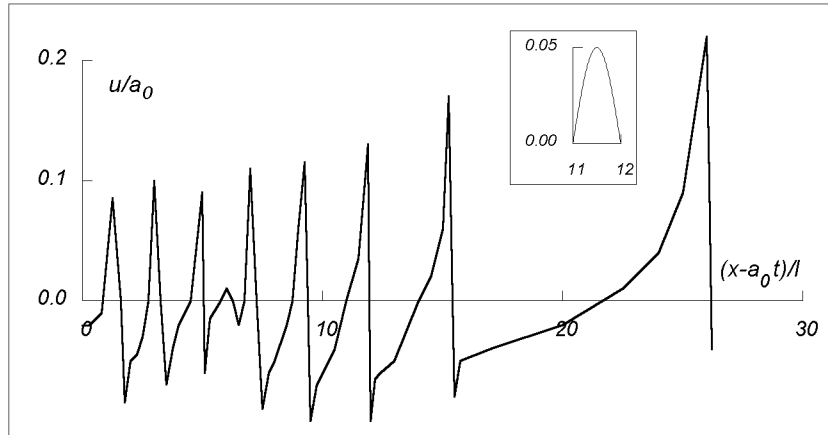
**РЕЗУЛЬТАТЫ** : выведены условия опрокидывания волн ; обосновано введение газодинамических разрывов ; выявлено возникновение протяженного энтропийного следа за фронтом волны ; определена структура стационарных волн .



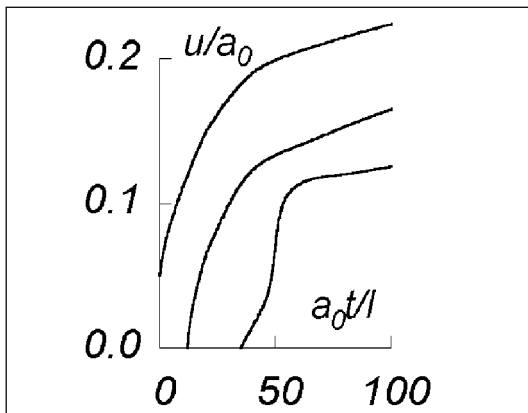
Эволюция возмущений давления и плотности  
в термически неустойчивой среде ( $\mu^* t =$   
0; 0.25; 0.5 для кривых 1-3 соответственно )



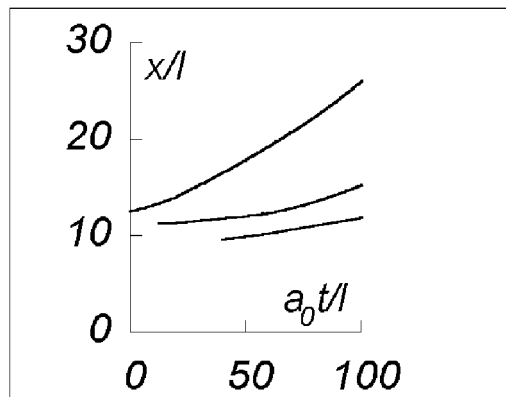
Профиль скорости в  
стационарной волне  
(  $a_0 = 10\sqrt{\mu^* v^*}$  )



Распределение скорости в момент времени  $a_0 t/l = 100$  (на врезке - распределение скорости при  $t = 0$ ).



Зависимость  $u(t)$  для трех первых максимумов скорости.



Траектории трех первых максимумов скорости.



## ОЦЕНКИ ДЛЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ (ОБЛАСТЬ НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ)

Тепловой баланс пылинок :

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_g &= n_g \sigma_g H = \\ \mathcal{L}_g &= 1,23 \cdot 10^{-17} \varepsilon n_g T_g^5 \text{ [эрг см}^{-3} \text{с}^{-1}] \implies \\ \implies T_g &= (0,81 \cdot 10^{17} \sigma_g H \varepsilon^{-1})^{1/5}. \end{aligned}$$

Тепло, передаваемое газу :

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_a &= \frac{1}{2} n_a n_g \sigma_g v_T k (T_g - T), \\ v_T &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{2kT}{m_a} \right)^{1/2}, \\ \Delta &= \frac{\mathcal{G}_a}{\mathcal{G}_g} = \frac{n_a v_T k (T_g - T)}{2H}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_g &= 10^{-5} \text{ см}^2, \quad H = 5 \cdot 10^3 \text{ эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}, \\ n_a &= 10^{12} \text{ см}^{-3}, \quad T = 250 \text{ K}, \quad T_g = 420 \text{ K}, \\ \Delta &\sim 10^{-1}, \quad \mu^* = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}, \\ &(t_{inst} = 6,9 \text{ часа}). \end{aligned}$$

## ВЫВОДЫ

■ Применительно к условиям в верхней атмосфере сформулированы критерии развития тепловой неустойчивости акустических волн.

■ Аналитически и численно исследована эволюция возмущений и выявлен эффект самопроизвольного возникновения последовательности волн конечной амплитуды.

■ Показано, что развитие неустойчивости может происходить на высотах  $\sim 120$  км и служить одним из источников турбулентных движений в нижней термосфере.

■ Присутствие в верхней атмосфере термически неустойчивой области способно уменьшать затухание возмущений, генерируемых в нижних слоях атмосферы, создавая тем самым более благоприятные условия для исследования метеорологических и сейсмических явлений, проблем загрязнения атмосферы.