

---

## 10.4 Филаментация в условиях водного аэрозоля

# Водный аэрозоль в атмосфере

дымка туман облака

Кучевые облака



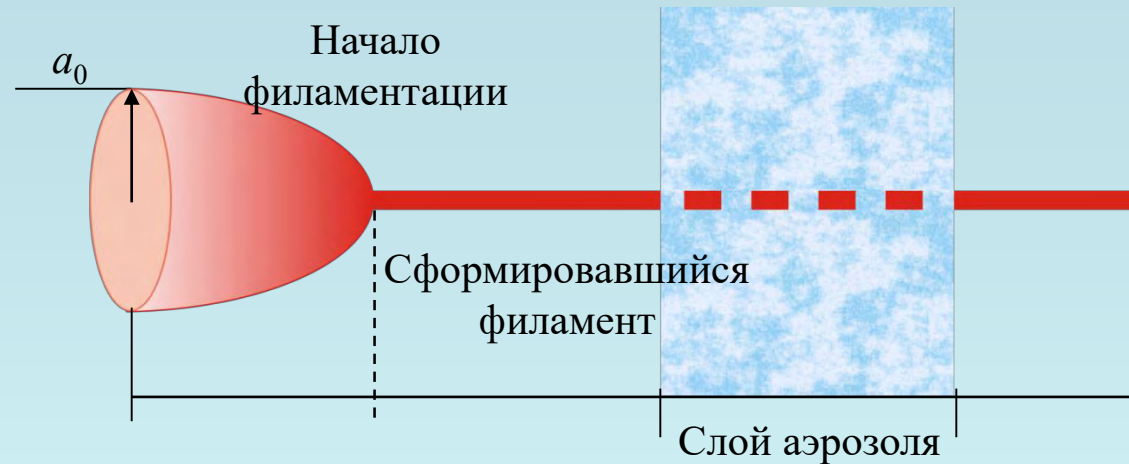
Водные частицы сферической формы

Показатель преломления  $n_w = 1,33$

Радиус частиц  $R = 2...15$  мкм

Концентрация частиц  $N = 50...10^3$  см<sup>-3</sup>

# Влияние слоя водного аэрозоля на развитый филамент



Эксперимент и теория: филамент быстро  
восстанавливается после прохождения капли.

Число филаментов уменьшается вследствие потерь  
энергии в плотном аэрозоле.

*F. Courvoisier, et al., APL, 2003*

*N. Bochkarev, et al., Atmospher. Ocean. Opt., 2004*

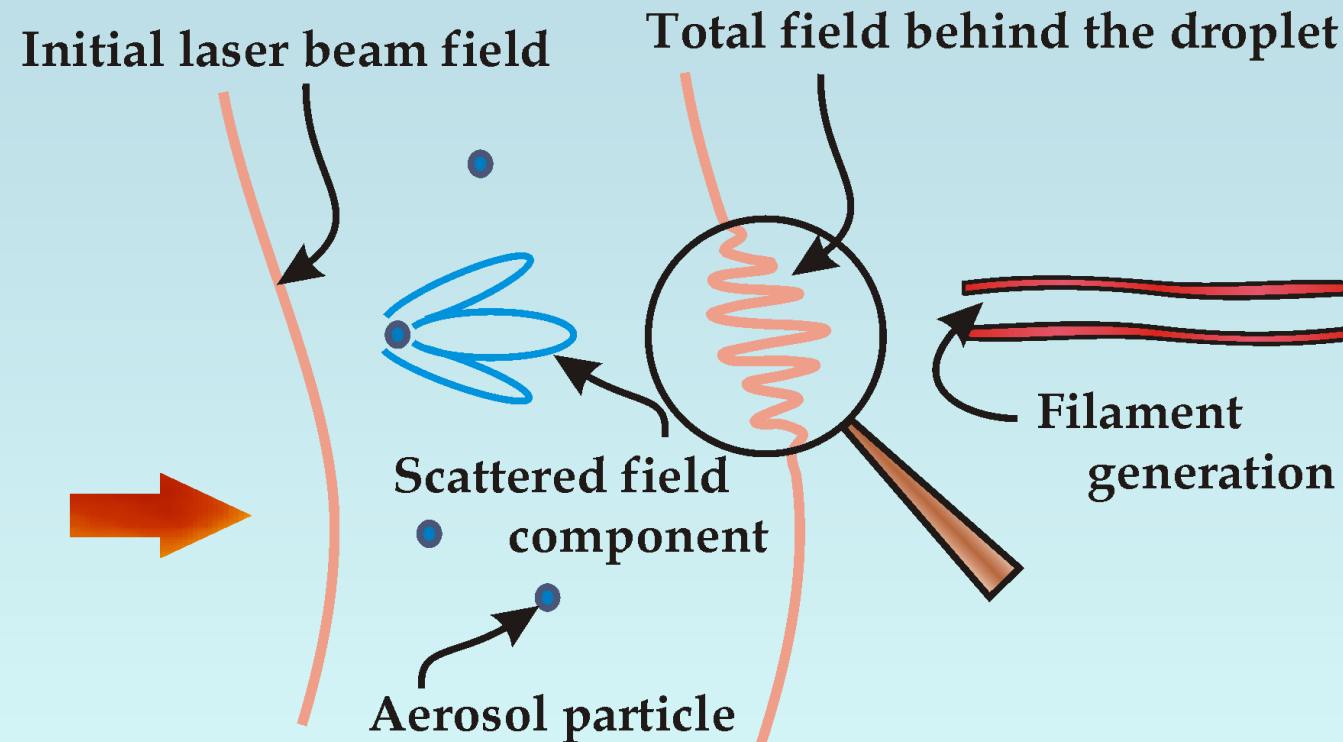
*G. Méchain et al., AP B, 2005*

*M. Kolesik, et al., OL, 2004*

*S. Skupin, et al., PRL, 2004*

*G. Mejean, et al., PR E, 2005*

# Влияние водного аэрозоля на филаментацию



Наряду с потерями, на начальной стадии формирования филаментов когерентное рассеяние на каплях воды может инициировать множественную филаментацию.

*V.P. Kandidov, et al., J. Russ. Laser Res., 2009*

# Распространение импульса в турбулентной атмосфере с водным аэрозолем: численный эксперимент

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \Delta_{\perp} A + \frac{2k^2}{n_0} \left( n_2 |A|^2 + \Delta n_p(\vec{r}, t) + \tilde{n}(\vec{r}) \right) A + \tilde{D}_{aer} A - ik\alpha_{ion} A$$

Дифракция

Эффект Керра

Дефокусировка в лазерной плазме

Флуктуации показателя преломления

Когерентное рассеяние на частицах аэрозоля

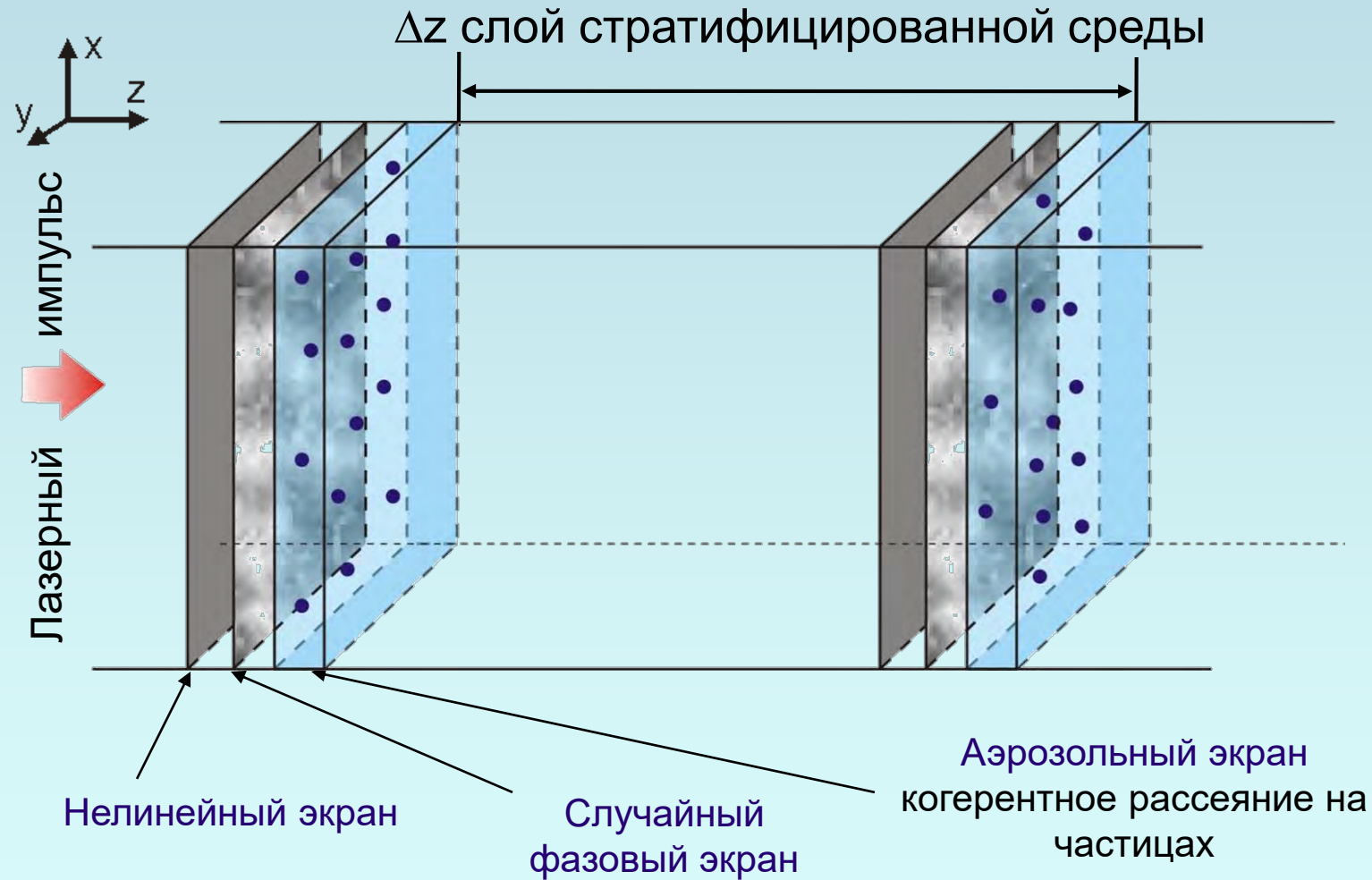
Потери на многофотонную ионизацию

$$\Delta n_p = -\frac{n_0 \omega_p^2}{2\omega^2} \quad \omega_p = \sqrt{4\pi e^2 N_e / m_e}$$

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = R(|A|^2)(N_0 - N_e)$$

$R$  - модель Переломова-Попова-Терентьева

# Стратифицированная модель филаментации лазерного импульса

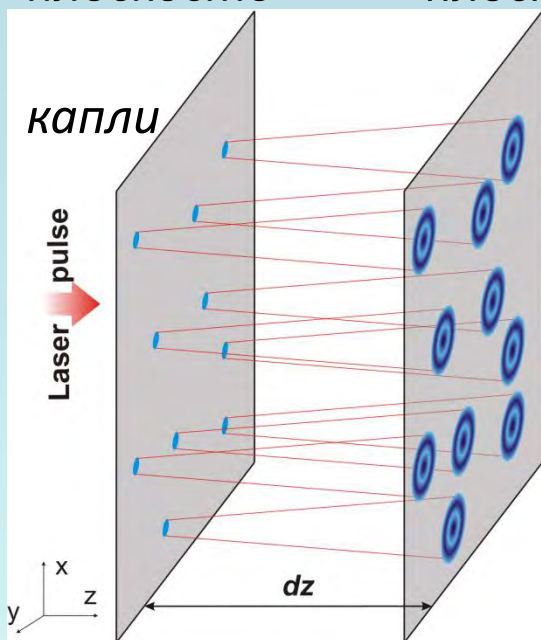


Милицин В.О., и др. Оптика атмосферы и океана, т. 18, 880 (2005).

# Аэрозольный экран

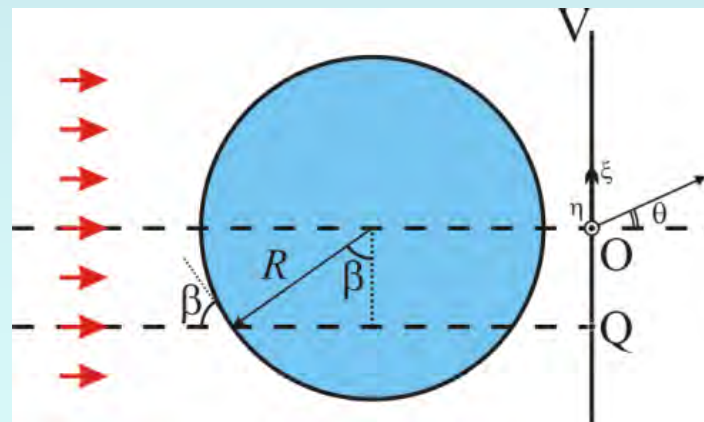
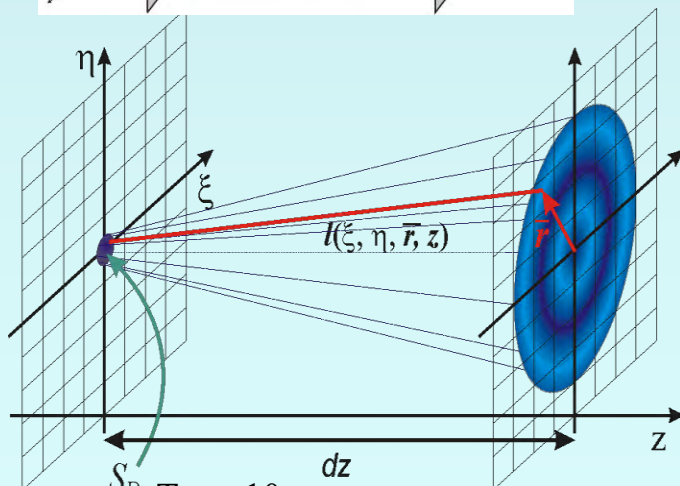
Первичная  
плоскость

Вторичная  
плоскость



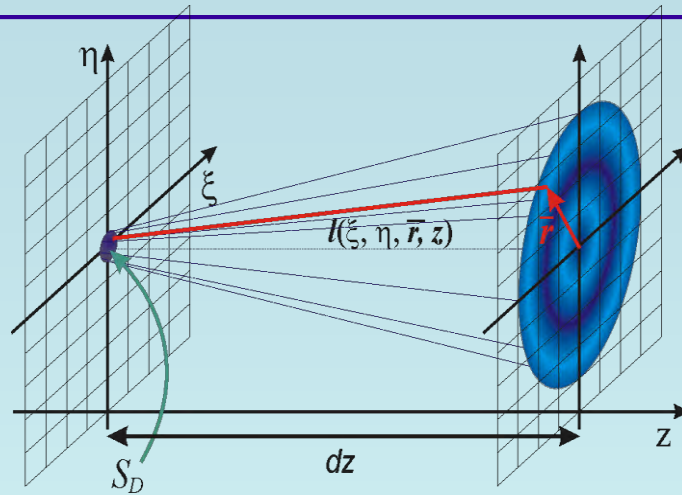
Интерференция  
рассеянной и  
невозмущенной  
волн

1. Капли **хаотично** расположены в узлах сетки (первичная плоскость)
2. Набег фазы  $\varphi(\xi, \eta)$  рассчитывается в приближении **аномальной дифракции**



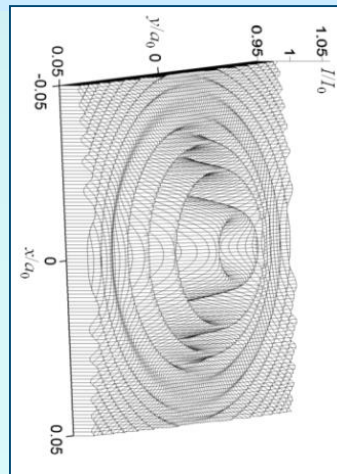
$$\varphi(\xi, \eta) = k \cdot 2R \cdot \sin \beta(\xi, \eta) \cdot (n_q - 1)$$

# Аэрозольный экран - 2



3. Рассеянное поле  $E(x, y, z)$  - интеграл Френеля-Киргофа (вторичная плоскость)

$$E(x, y, z) = -\frac{i}{\lambda} \iint_{S_D} (\exp^{-i\varphi(\xi, \eta)} - 1) \exp^{-ik \cdot l(\xi, \eta, x, y, z)} \frac{E_0(\xi, \eta)}{l(\xi, \eta, x, y, z)} d\xi d\eta$$



4. Интерференция рассеянной и невозмущенной волн на вторичной плоскости



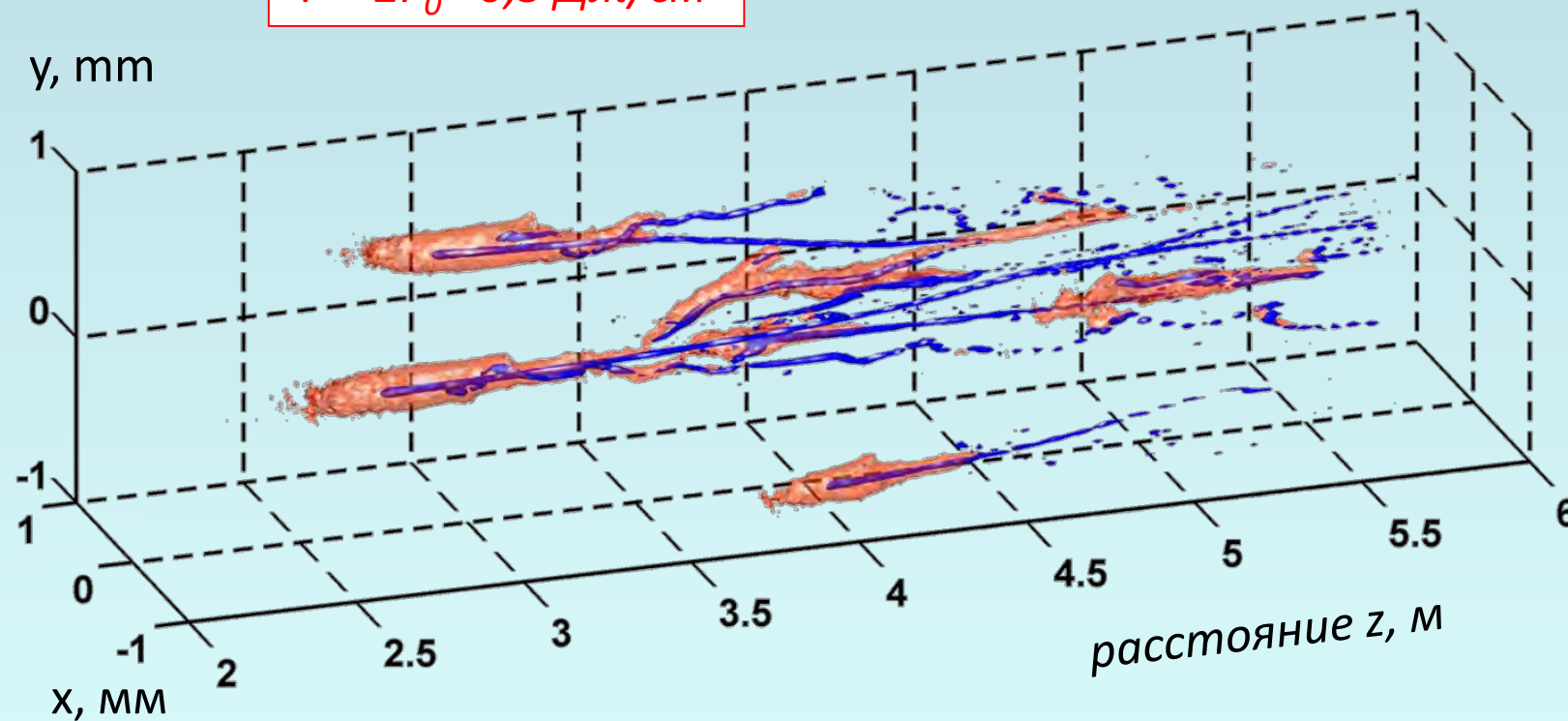
# Множественная филаментация в аэрозоле

Аэрозоль:  $N = 100 \text{ см}^{-3}$ ,  $R = 15 \text{ мкм}$

Импульс:  $P_0 = 200 \text{ ГВт}$ ,  $a_0 = 2.5 \text{ мм}$ ,  $\tau_0 = 140 \text{ фс}$

Флюенс

$$F = 2F_0 = 0,5 \text{ Дж/см}^2$$

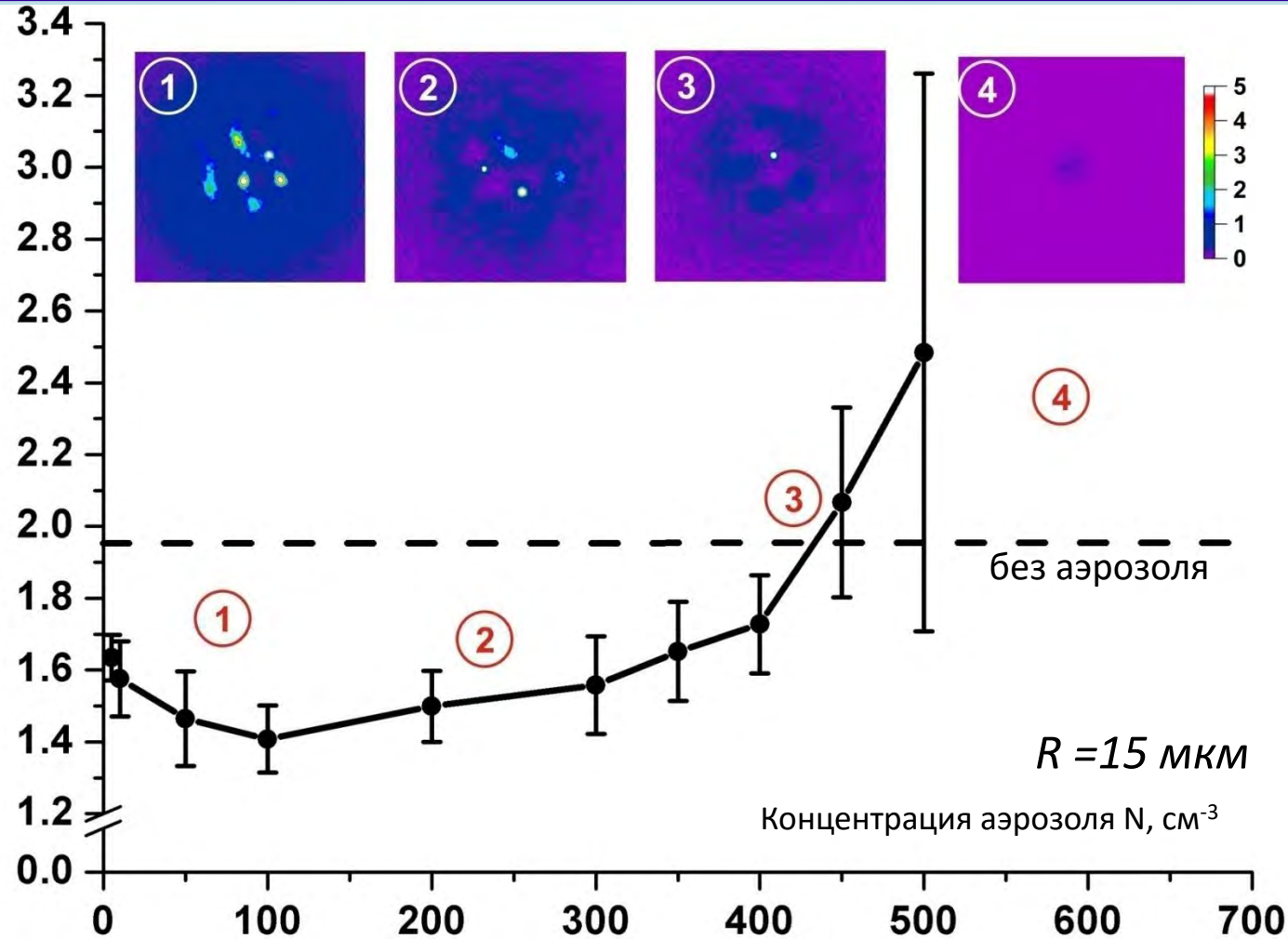


Плотность электронов  
 $N_e = 5 \cdot 10^{-4} N_0 = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

# Влияние концентрации аэрозоля на расстояние до начала филаментации

$$I_0 = 2 \cdot 10^{12} \text{ Вт/см}^2, P = 400 \text{ ГВт}, a_0 = 2,5 \text{ мм}, P = 100 P_{cr}$$

$\langle Z_{fil} \rangle, \text{ м}$

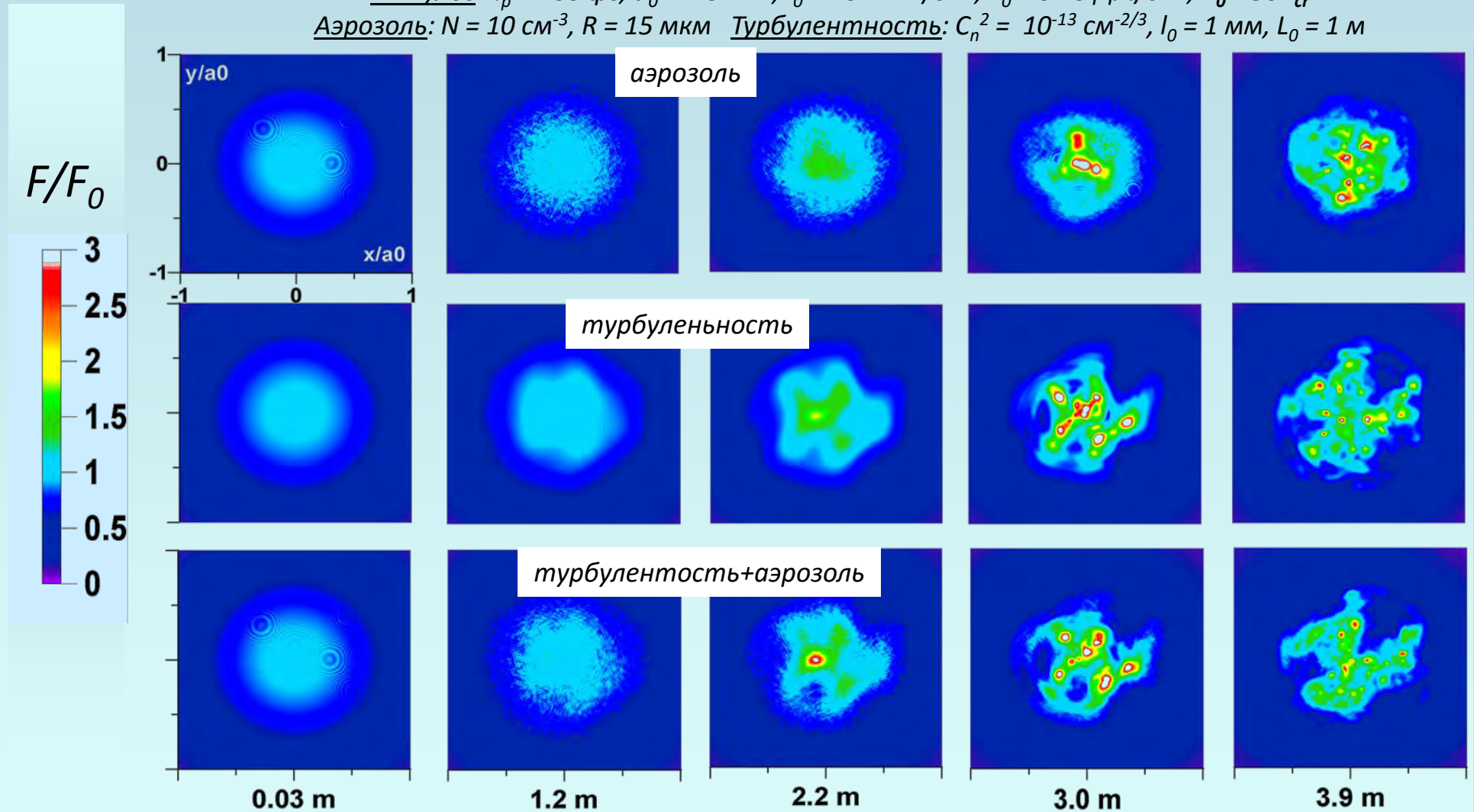


- 1 } Случайные возмущения доминируют
- 2 } Влияние потерь
- 3, 4 } Потери доминируют

# Сравнение возмущений, вызванных турбулентностью и аэрозолем

Импульс:  $\tau_p = 280$  фс,  $a_0 = 2.5$  мм,  $I_0 = 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $F_0 = 0.25$  Дж/см<sup>2</sup>,  $P_0 = 50P_{cr}$

Аэрозоль:  $N = 10$  см<sup>-3</sup>,  $R = 15$  мкм Турбулентность:  $C_n^2 = 10^{-13}$  см<sup>-2/3</sup>,  $l_0 = 1$  мм,  $L_0 = 1$  м



# Множественная филаментация в турбулентной атмосфере с аэрозолем

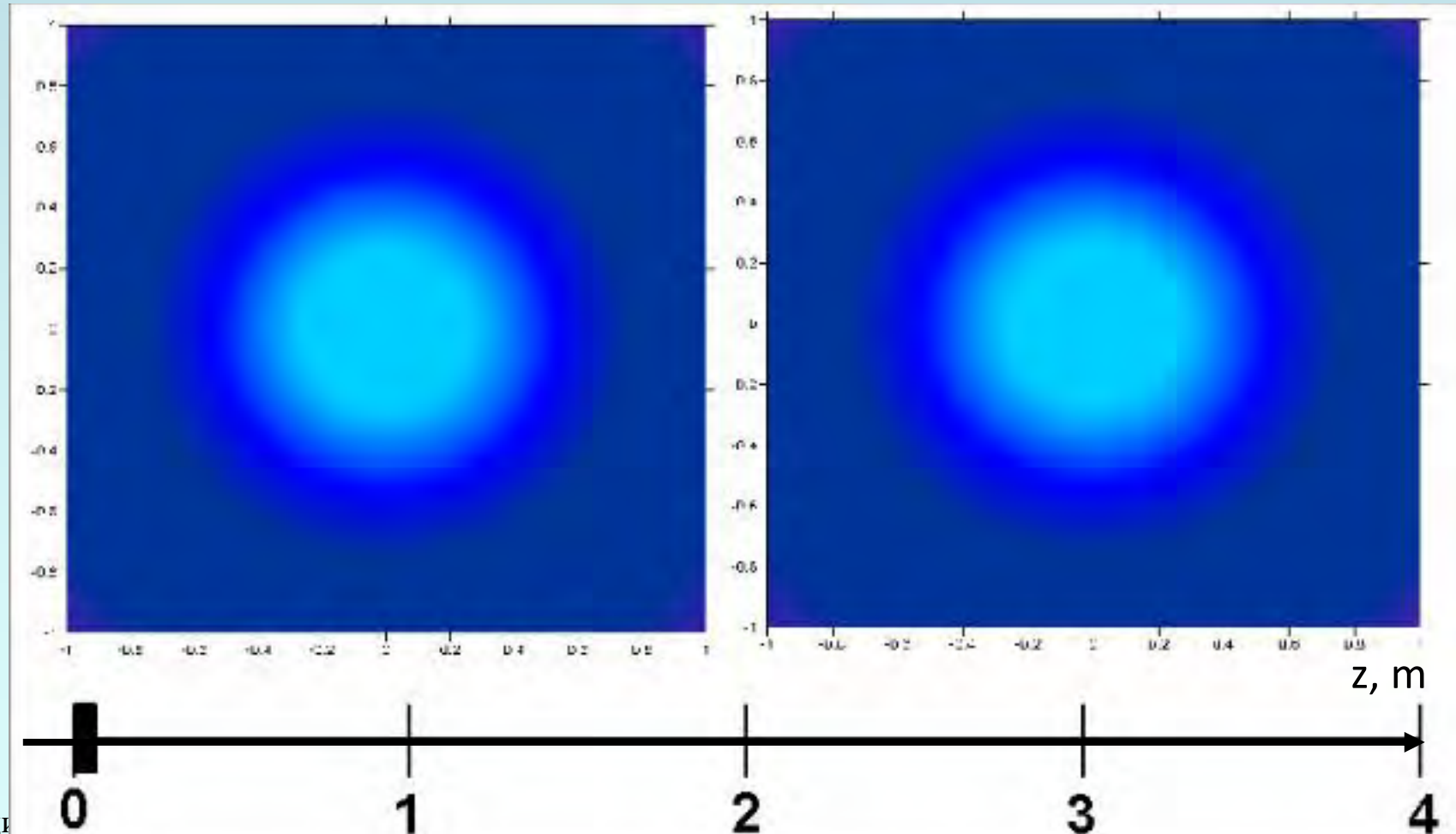
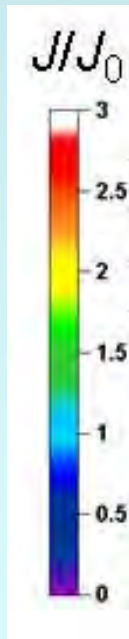
$$P_0 = 50P_{cr},$$
$$a_0 = 2,5 \text{ мм},$$
$$\tau_p = 280 \text{ фс}$$

Турбулентность

$$C_n^2 = 10^{-13} \text{ см}^{-2/3}, l_0 = 1 \text{ мм}, L_0 = 1 \text{ м}$$

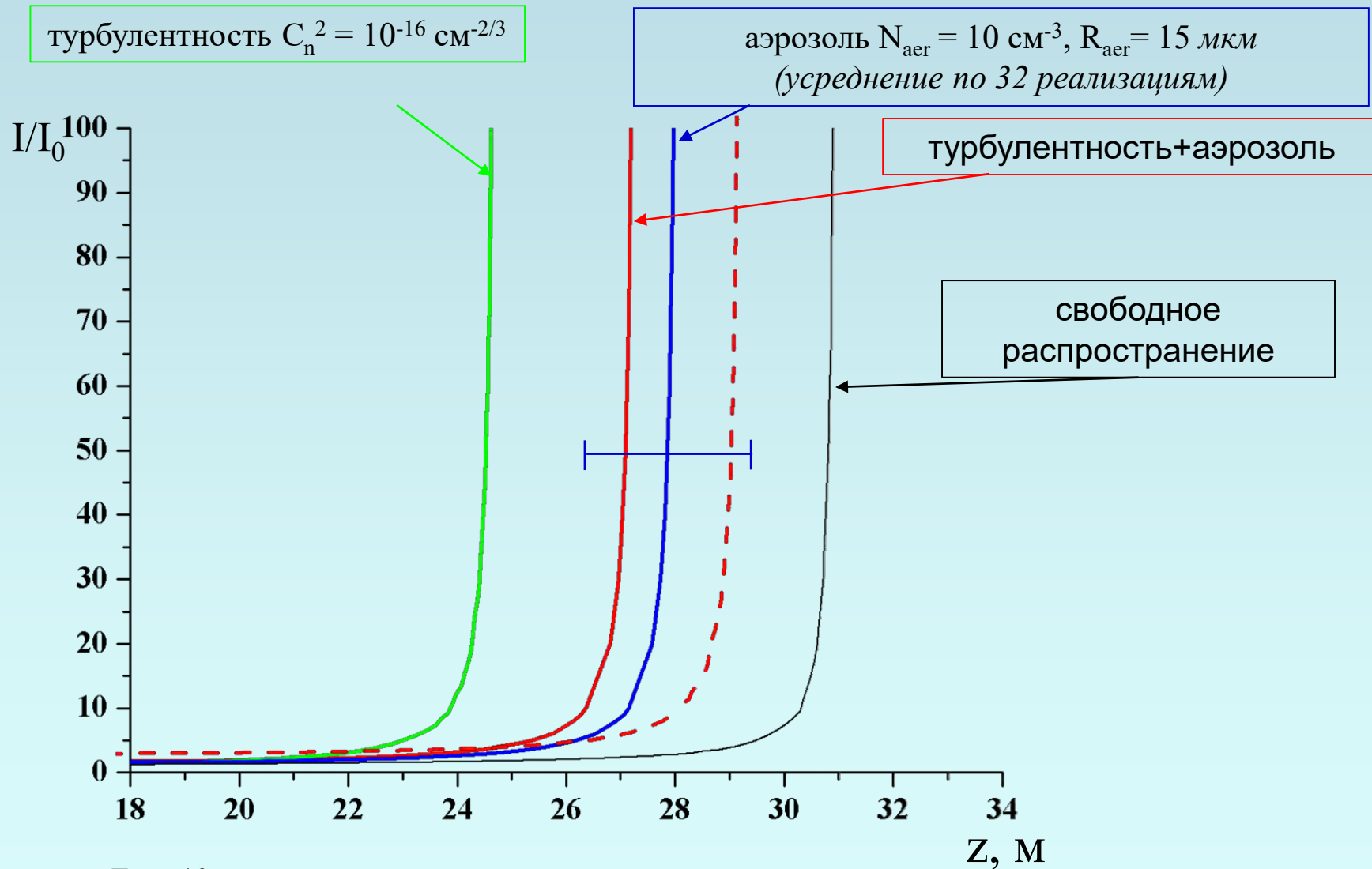
Турбулентность+аэрозоль

$$N_{aer} = 10 \text{ см}^{-3}, R_{aer} = 15 \text{ мкм}$$



# Начало множественной филаментации

$$I_0 = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2, a_0 = 1 \text{ см}, P = 100 P_{\text{ср}}$$



# Ограничивается ли влияние атмосферного аэрозоля вносимыми потерями ?

Слой аэрозоля с  $R, N$ :  $\alpha_{aer} = K_p \pi R^2 N$

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \Delta_{\perp} A + \Delta n_{nl}(|A|^2) A + \hat{D}_{aer} A$$

$$\hat{D}_{aer} A \neq 0 \quad \text{внутри слоя}$$

Линейная среда с ослаблением (непрерывная)  $\alpha_{cont} = \alpha_{aer}$

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \Delta_{\perp} A + \Delta n_{nl}(|A|^2) A - i k \alpha_{aer} A$$

# Начало множественной филаментации

$$I_0 = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2, a_0 = 1 \text{ см}, P = 100 P_{\text{cr}}$$

турбулентность  $C_n^2 = 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$

аэрозоль  $N_{\text{aer}} = 10 \text{ см}^{-3}$ ,  $R_{\text{aer}} = 15 \text{ мкм}$   
(усреднение по 32 реализациям)

