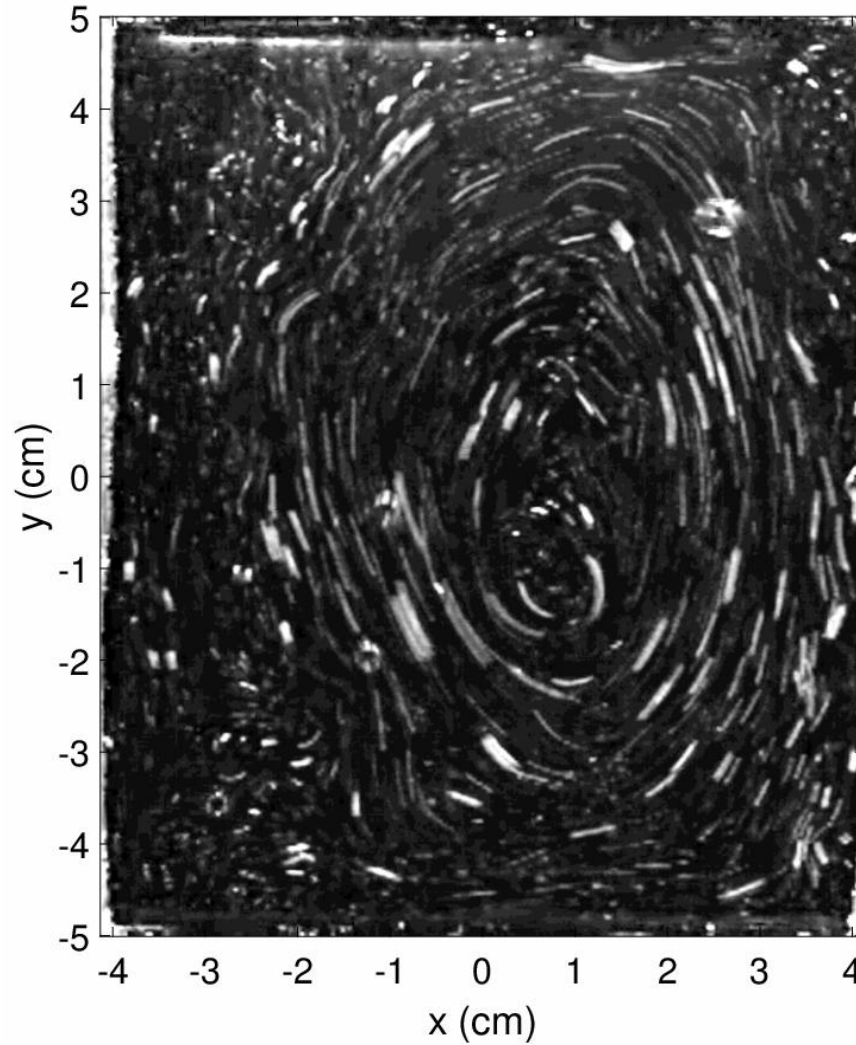


# Формирование крупномасштабного когерентного вихря в двумерной турбулентности

А.В. Орлов, М.Ю. Бражников, А.А. Левченко

ИФТТ РАН

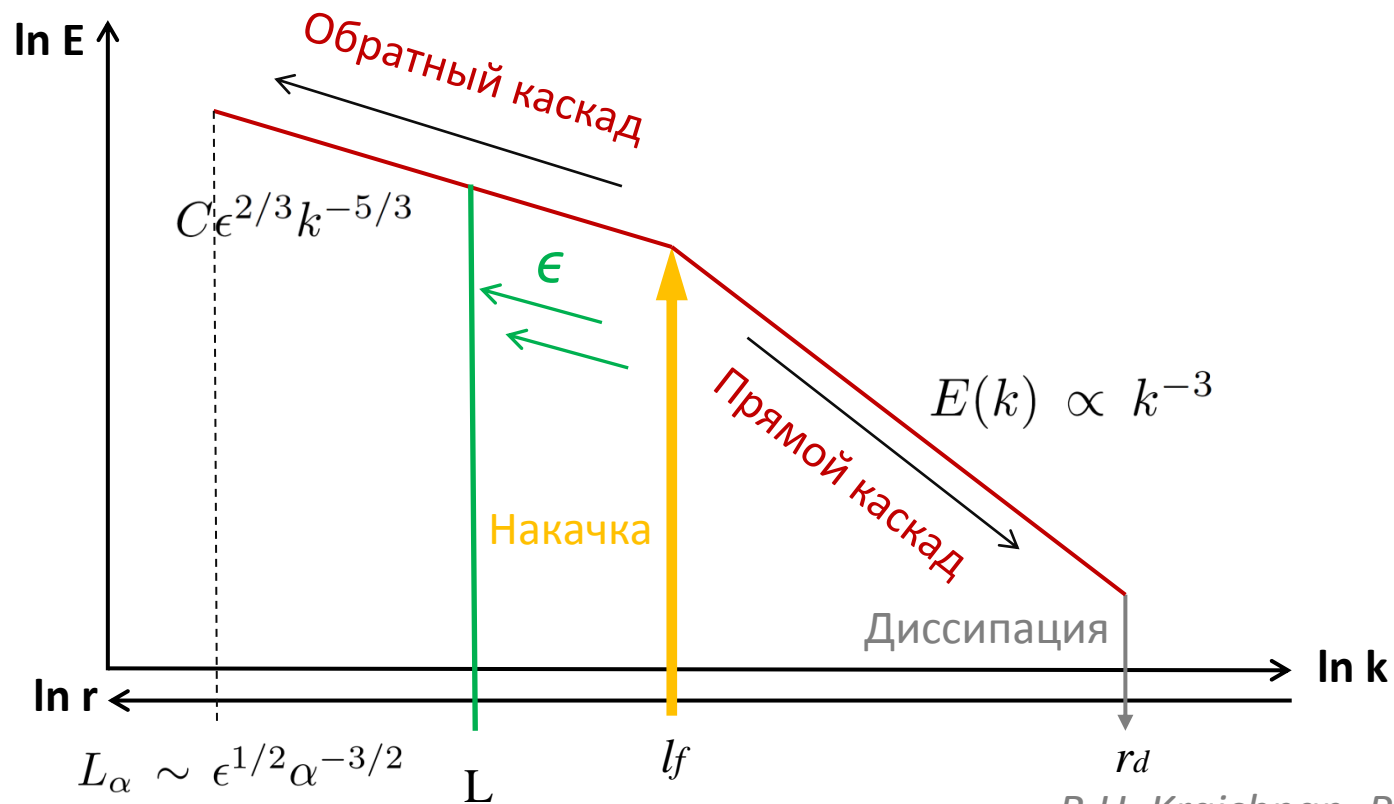
ИТФ им. Ландау РАН



# Двумерная турбулентность

$$v_{\text{верт.}} \ll v_{\text{гор.}}$$

$$h \ll L$$



**Спектральная конденсация!**  
**Формирование когерентных структур!**

*R.H. Kraichnan, Phys. Fluids 1967*

*C.E. Leith, Phys. Fluids 1968*

*G.K. Batchelor, Phys. Fluids 1969*



Антициклон у берегов  
Северной Америки



Ураган Офелия у берегов  
Великобритании (NASA)



Циклон Катарина над Южной  
Атлантикой



Большое красное пятно на  
Юпитере

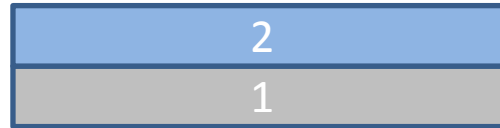
## Коэффициент трения о дно

- Однослойная жидкость:

$$\alpha = \pi^2 \nu / (4h^2)$$

$$h \ll L$$

- Двухслойная:

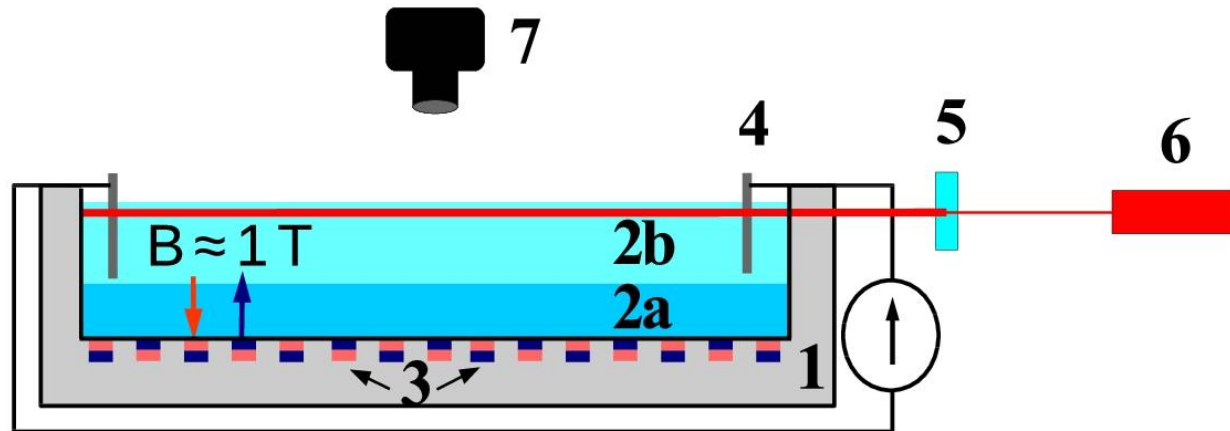


Минимальный корень равенства:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} \sqrt{\frac{\nu_1}{\nu_2}} = \tan \left( \frac{\sqrt{\alpha} h_1}{\sqrt{\nu_1}} \right) \tan \left( \frac{\sqrt{\alpha} h_2}{\sqrt{\nu_2}} \right)$$

В 7 раз

# Экспериментальная методика



1 – ячейка из оргстекла: 10 см × 10 см × 1.5 см

2a – перфтордекалин, 2b - 20%  $(\text{KNO}_3)_{\text{aq}}$

3 – шахматная решётка из магнитов  $10 \times 10$  :  $d_{\uparrow/\downarrow} = \sqrt{2}$  см ,  
 $d_{\text{маг}} = 0.5$  см

4 – Pt электроды, подключенные к источнику питания DC, 6.4 А

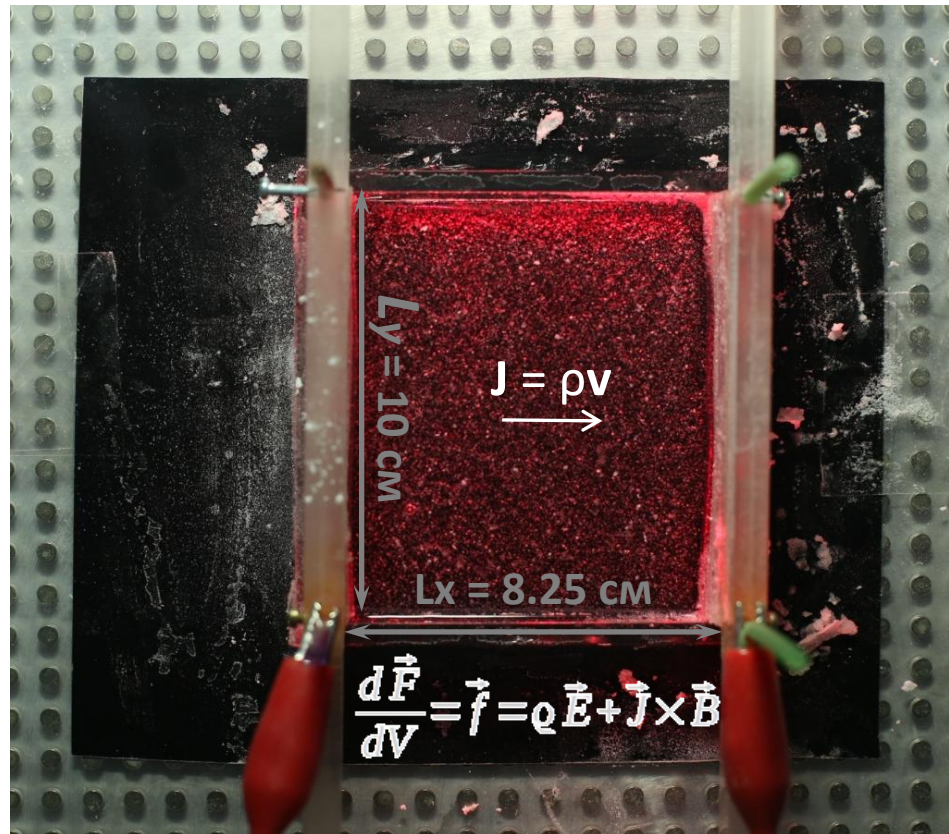
5 – цилиндрическая линза

6 – лазер

7 – видеокамера



# Регистрация течений



$d_{\text{полиамида}} \approx 30 \text{ мкм}$

$d_{\text{тр}} \approx 0.2-0.3 \text{ мм}$

$\rho_{\text{полиамида}} \approx \rho_{\text{эл.}}$

24 fps

Треки

PIV:

•  $v_x, v_y$

• Завихренность:

$$\Omega = \frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x}$$

•  $E(x, y)$

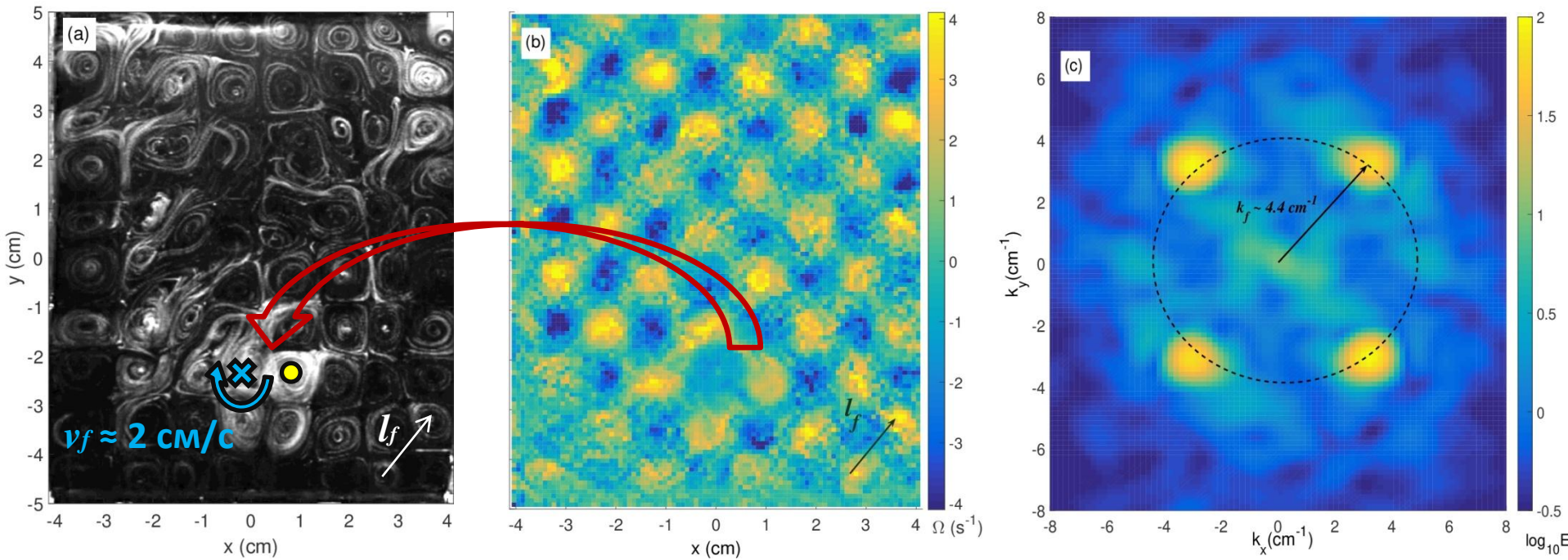
• Распределение энергии  $E(k_x, k_y)$

• Энергетический спектр  $E(k)$

$$E(k) = \frac{1}{2S\Delta k} \int_{k < q < k + \Delta k} \frac{d^2 q}{(2\pi)^2} [|\mathbf{v}_q|^2]$$

# Результаты и обсуждения

3 секунды накачки

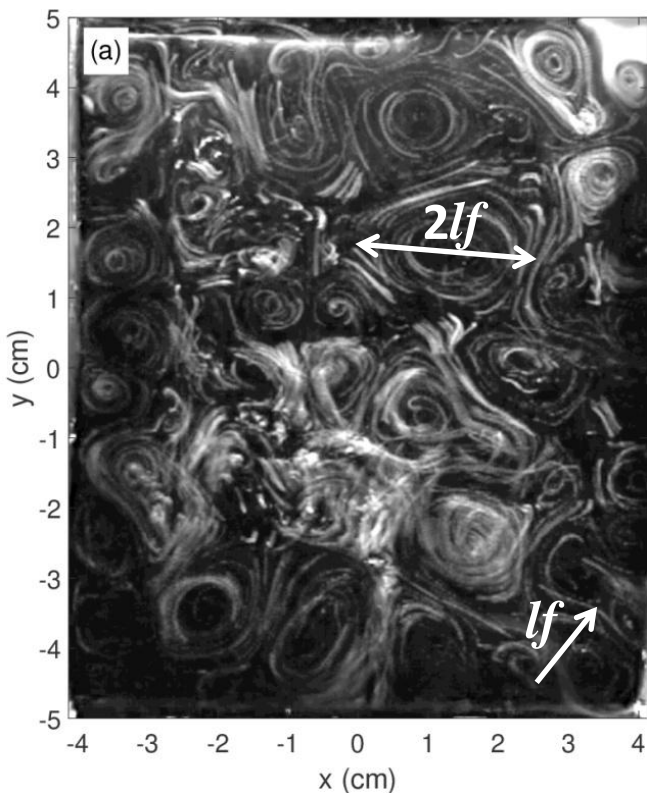


↓

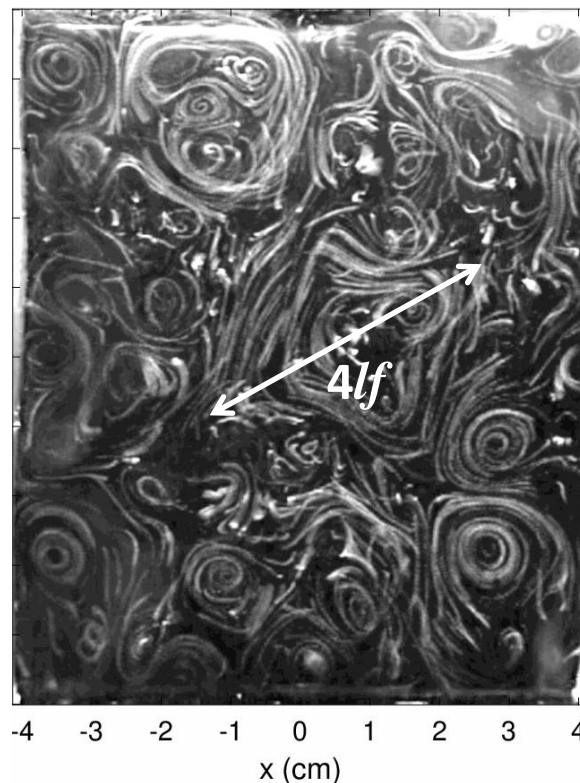
$$l_f = \frac{2\pi}{k_f} \approx 1.4 \text{ cm} \approx d_{\uparrow/\downarrow}$$
$$Re_f = \frac{v_f l_f}{\nu_2} \approx 300 \gg 1$$



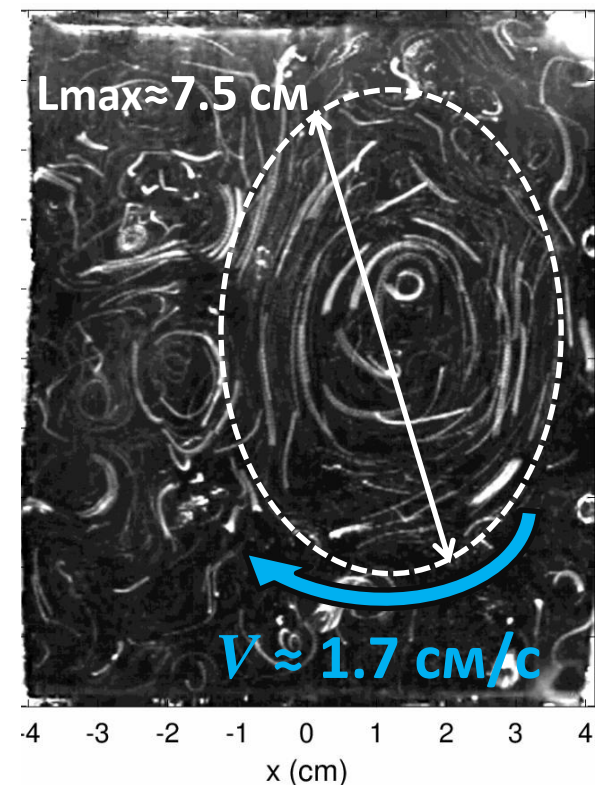
# Эволюция максимального характерного масштаба



5 с накачки



Минута накачки



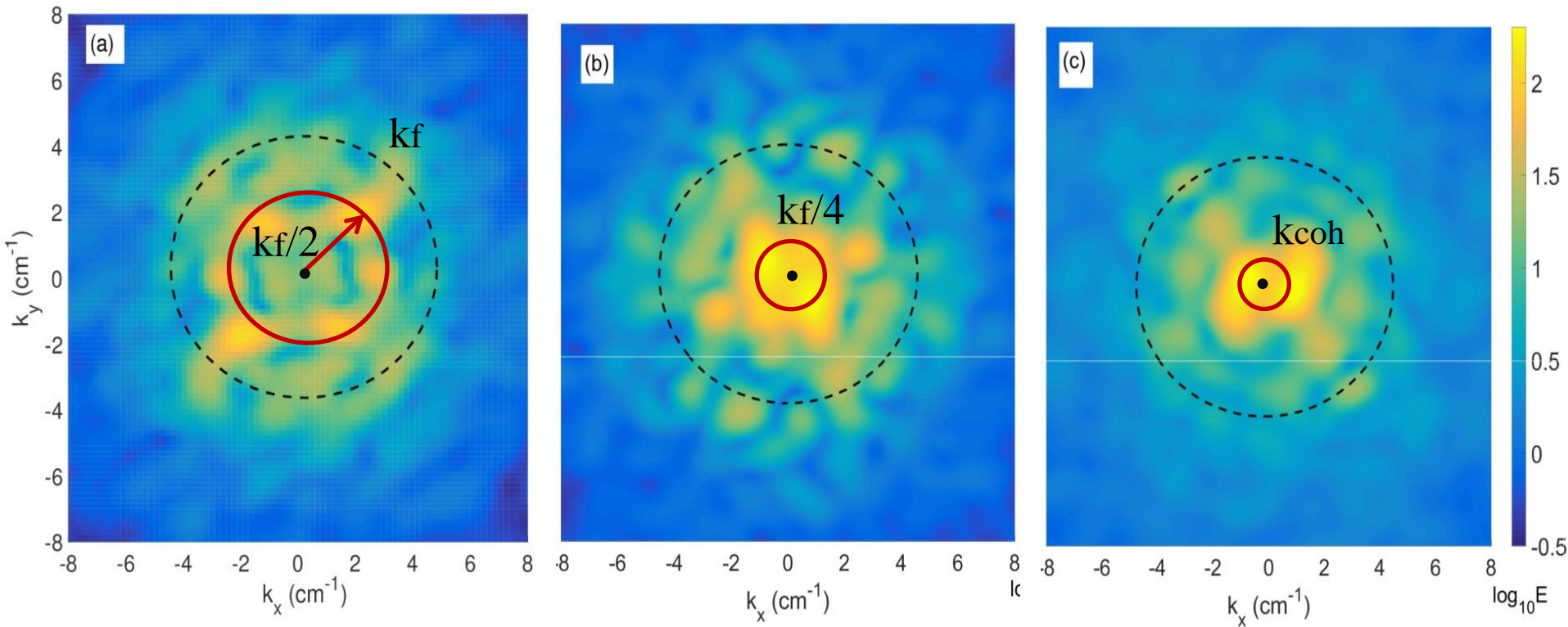
5 минут накачки

$$Re \approx 1100$$

$$k_{min} \approx \frac{2\pi}{L_{max}} \approx 0.85 \text{ cm}^{-1}$$



# Распределения энергии



5 с накачки,  $2lf$

1 минута накачки,  $4lf$

5 минут накачки

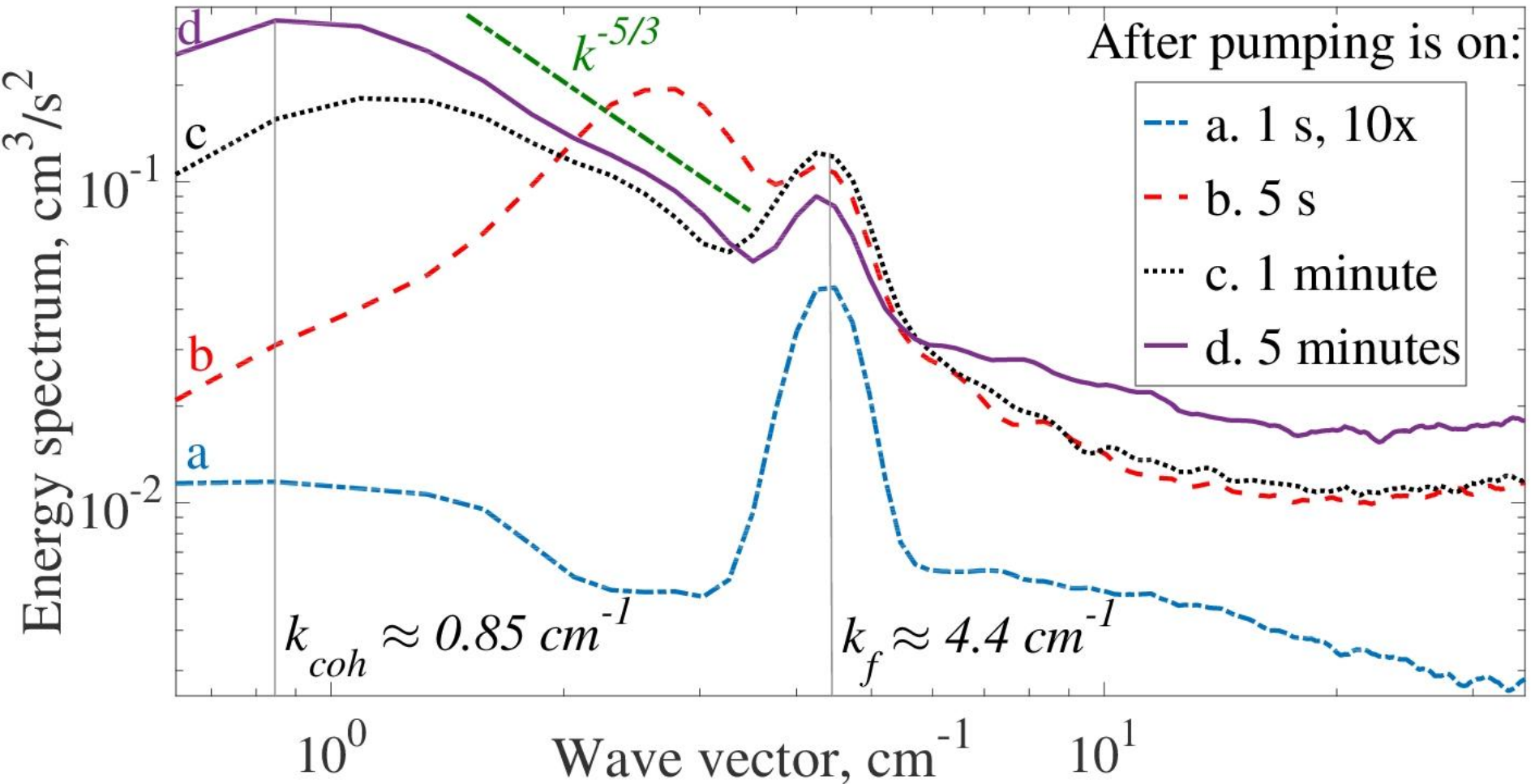
$$k_{coh} \approx 0.85 \text{ см}^{-1}$$



$$L_{coh} \approx 7.5 \text{ см}$$

$$l = 2\pi/k$$

# Спектры



# Оценки

## Коэффициент трения о дно $\alpha$

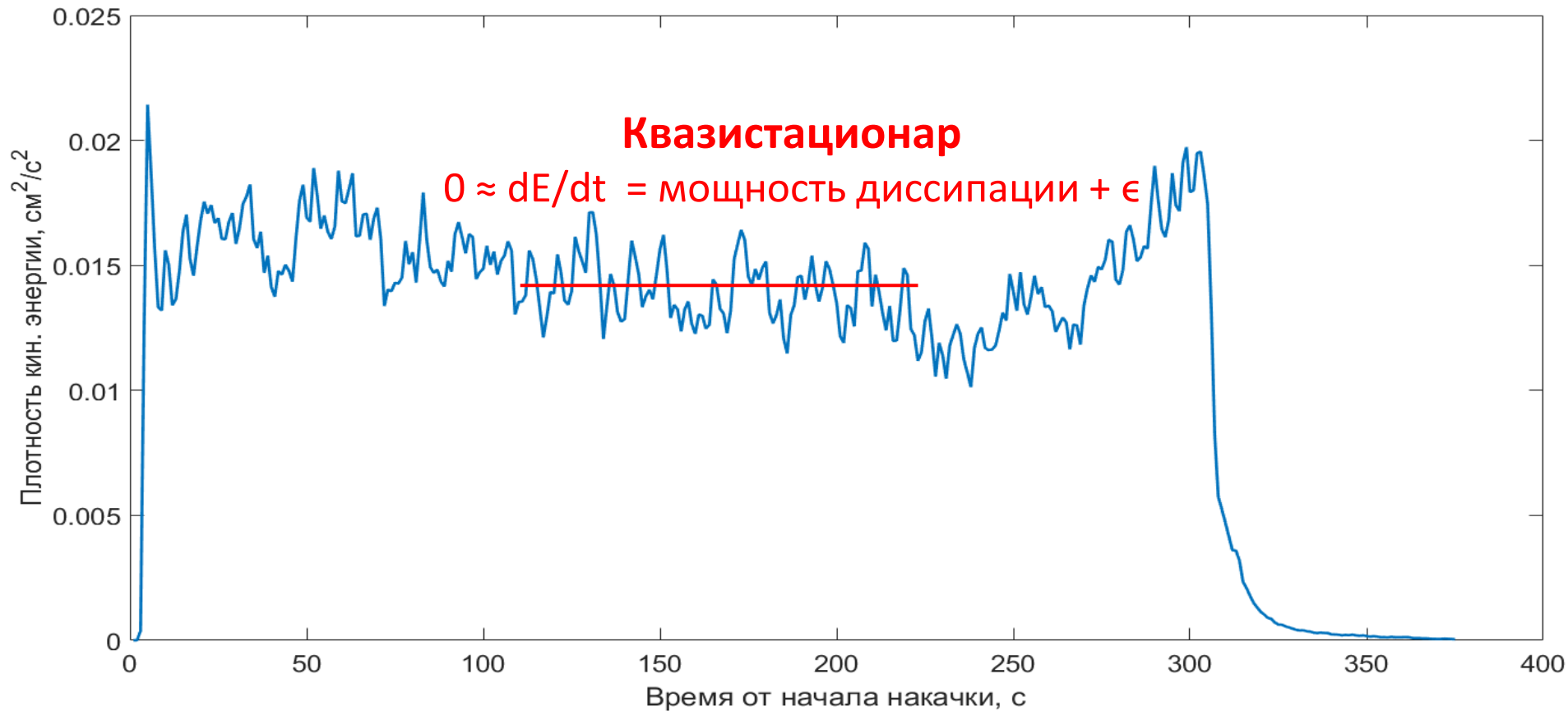
$$\text{ПФД: } h_1 = 0.45 \text{ см, } \rho_1 = 1.95 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}, \nu_1 = 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$$

$$\text{Электролит: } h_2 = 0.85 \text{ см, } \rho_2 = 1.15 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}, \nu_2 \approx 1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} \sqrt{\frac{\nu_1}{\nu_2}} = \tan \left( \frac{\sqrt{\alpha} h_1}{\sqrt{\nu_1}} \right) \tan \left( \frac{\sqrt{\alpha} h_2}{\sqrt{\nu_2}} \right)$$

$$\alpha \approx 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$$

# Поток энергии в обратном каскаде $\epsilon$ Ограничивающий масштаб $L_\alpha$



$$\epsilon \sim \int_{k_{min}}^{k_f} (2\nu_2 k^2 + \alpha) E(k) dk = (3.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}^3$$

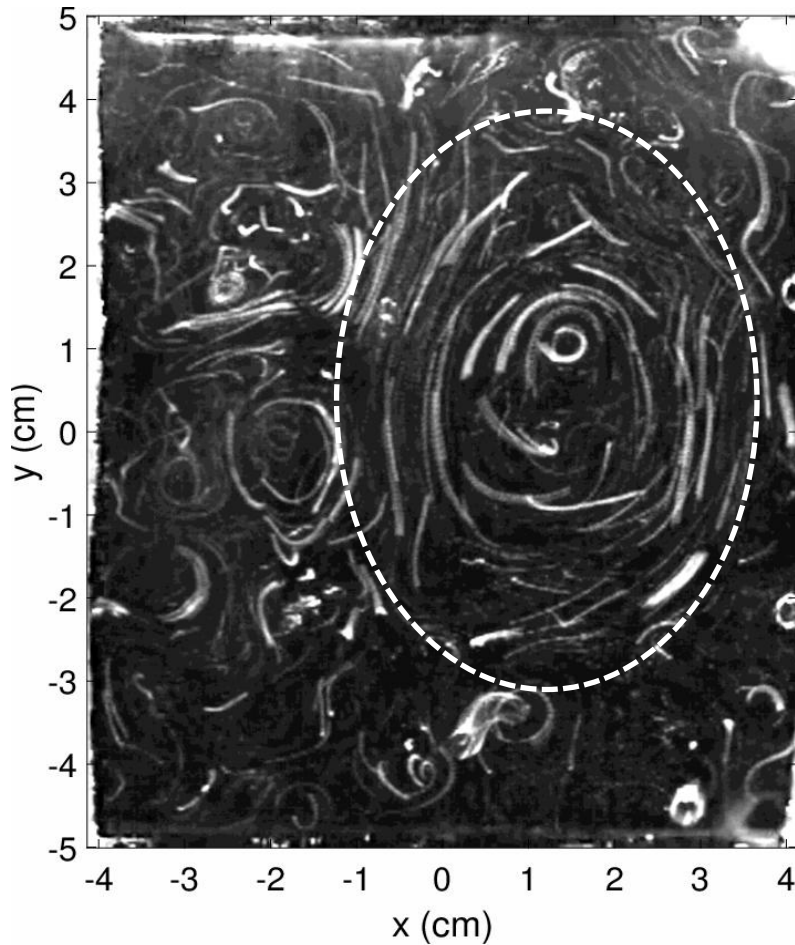
$$L_\alpha \sim \epsilon^{1/2} \alpha^{-3/2} \approx 70 \text{ см} \gg L = 10 \text{ см}$$



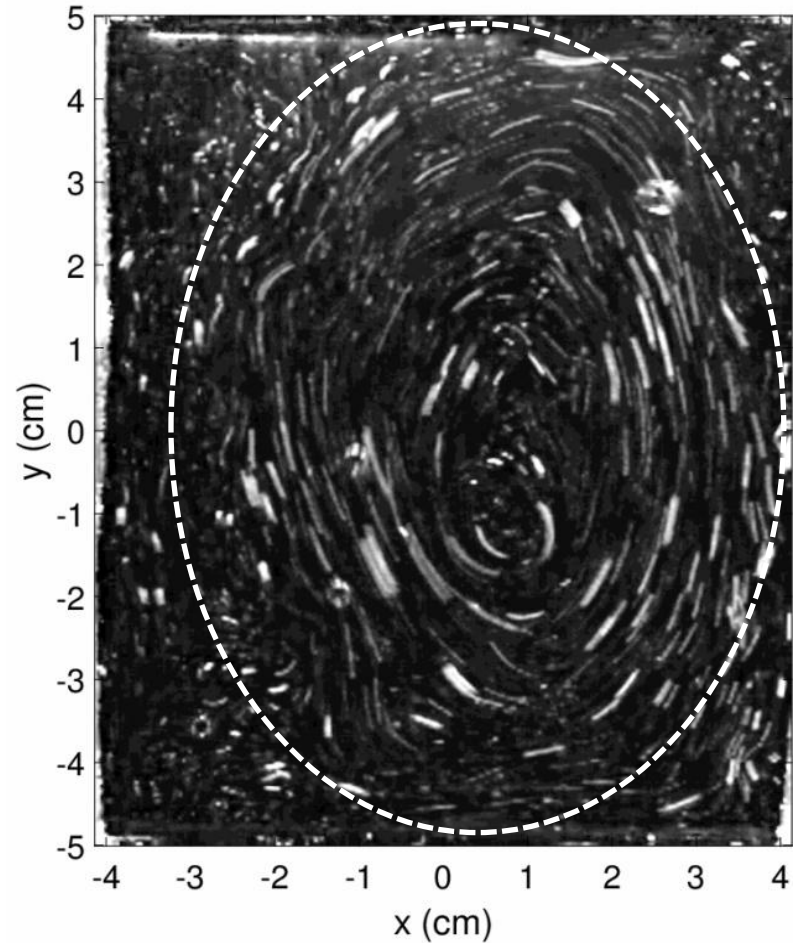
# Отключение накачки

Коэффициент затухания за счёт вязкости:  $\gamma_k = 2\nu_2 k^2$

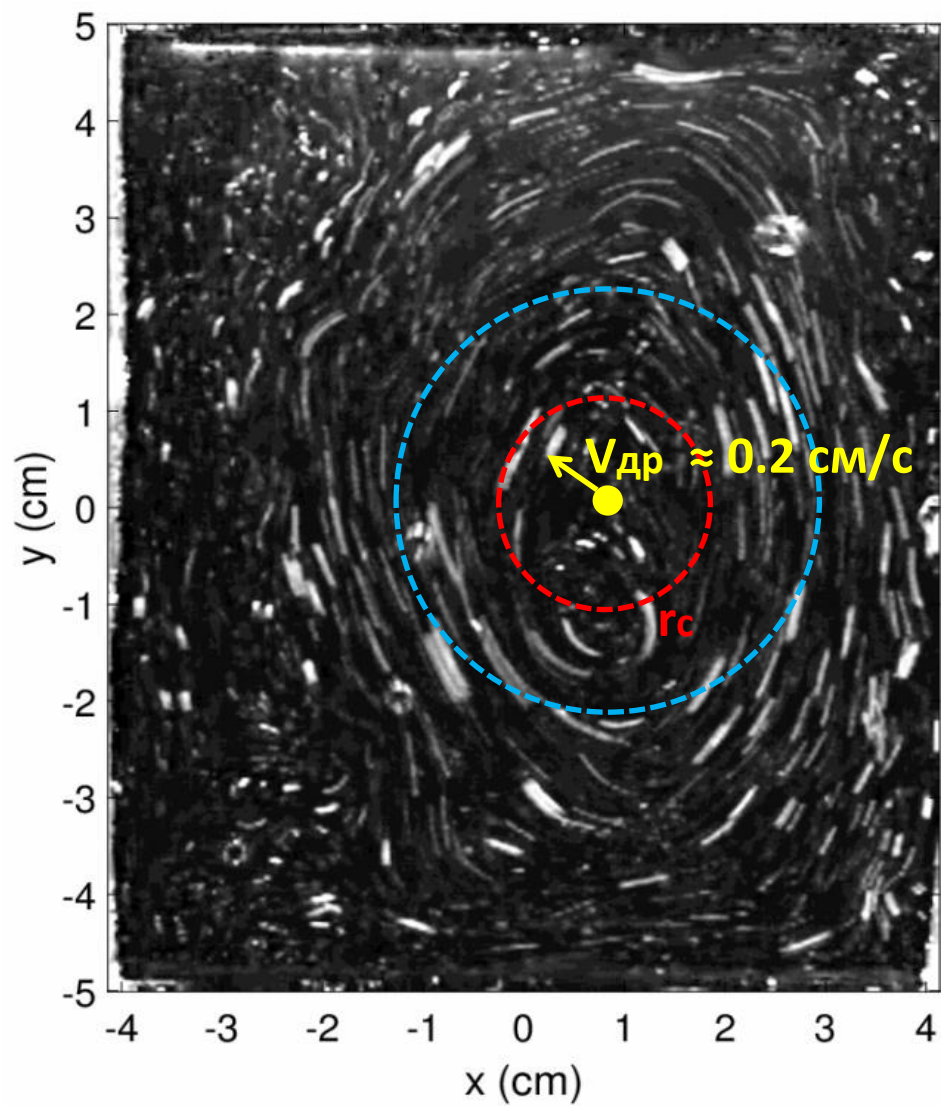
$$k \geq k_f: \gamma_k \geq \gamma_{k_f} \approx 0.4 \text{ c}^{-1} \gg 2\alpha \approx 0.05 \text{ c}^{-1}$$



Перед отключением накачки

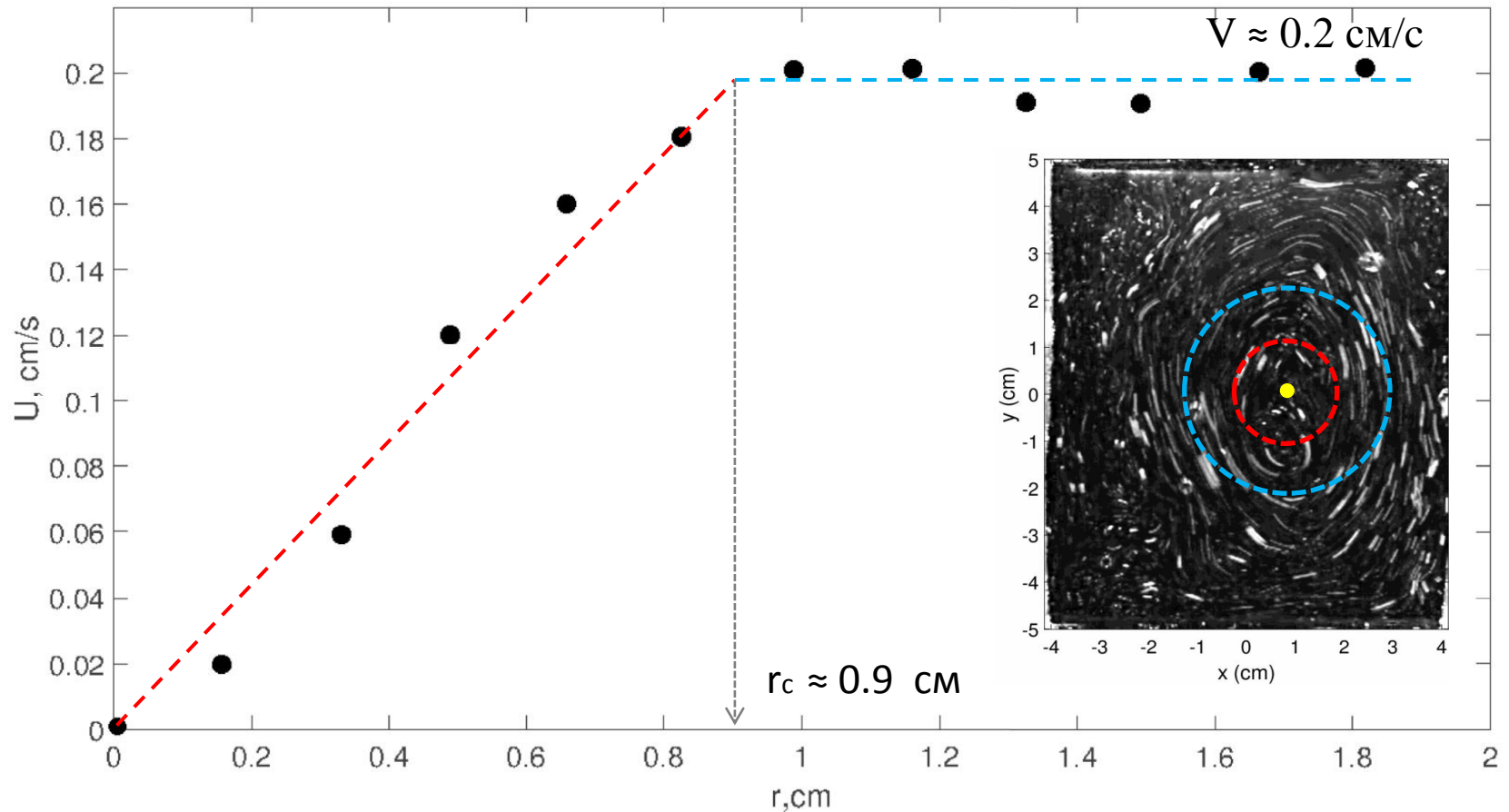


13 секунд после отключения накачки



Центр вихря –  $\max|\Omega|$

# Радиальный профиль азимутальной скорости в системе центра вихря



## Теоретические оценки

## Эксперимент

Накачка включена:

Накачка выключена

С учётом затухания:

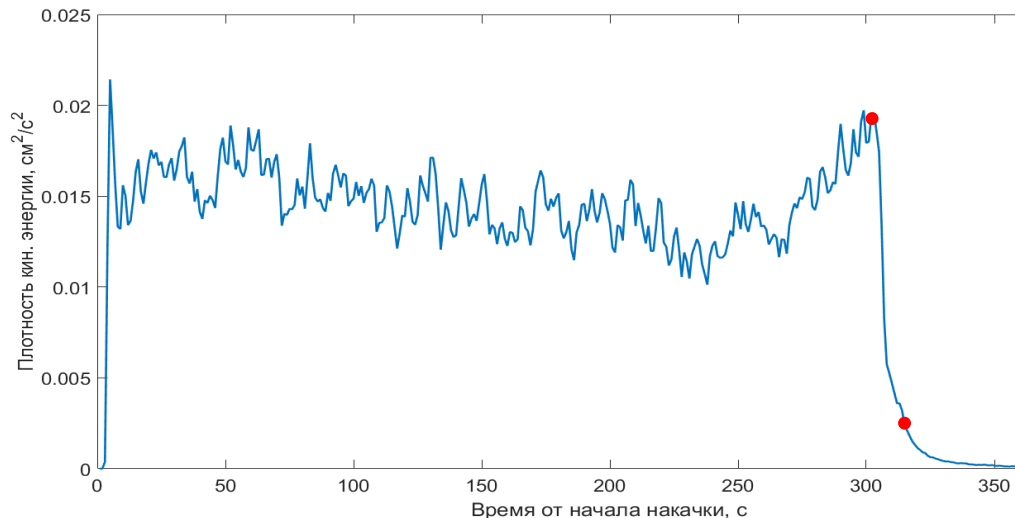
$$V \approx \sqrt{\frac{3\epsilon}{\alpha}} \approx 2 \text{ см/с}$$

$$(0.25 \pm 0.07) \text{ см/с}$$

$$0.2 \text{ см/с}$$

$$r_c \approx \sqrt{\frac{v}{\alpha}} \approx 0.7 \text{ см}$$

$$0.9 \text{ см}$$



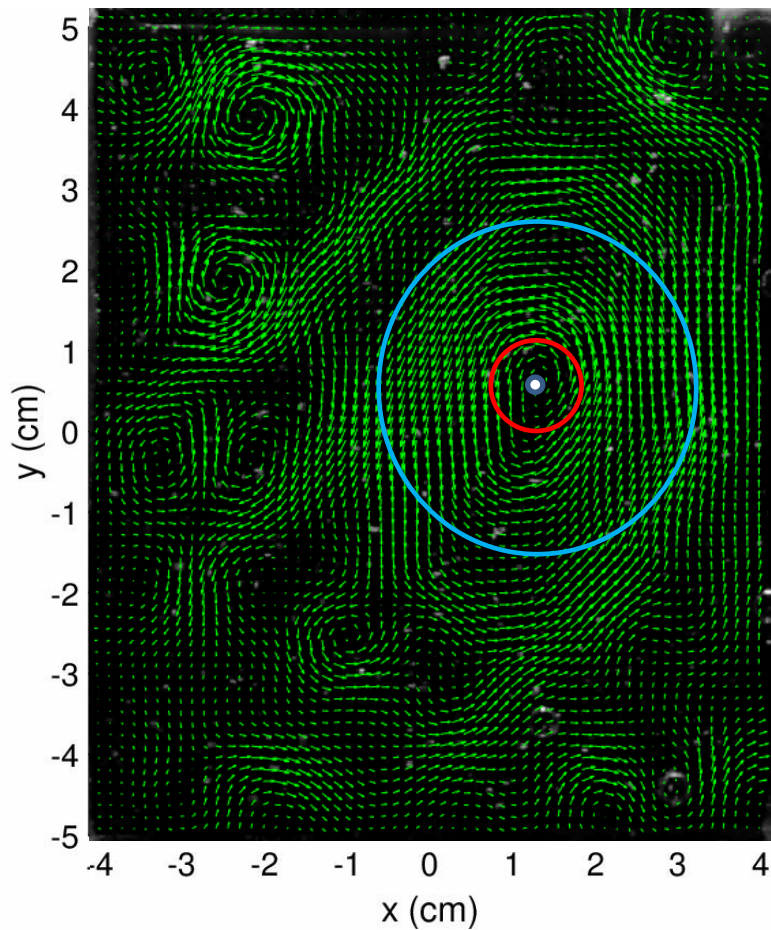
*J. Laurie et al., PRL 2014*

*I.V. Kolokolov and V.V. Lebedev, PRE 2016*

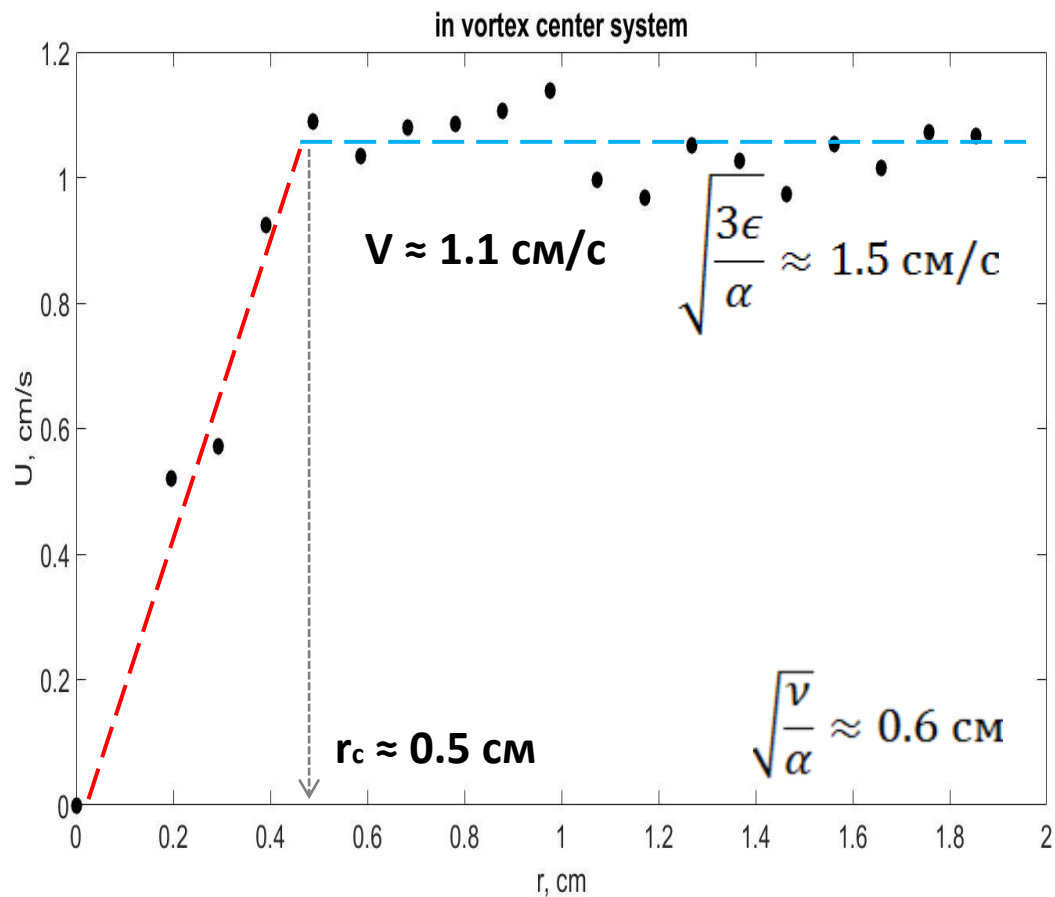
*I.V. Kolokolov and V.V. Lebedev, J. Fluid Mech. 2016*



# Перед отключением накачки



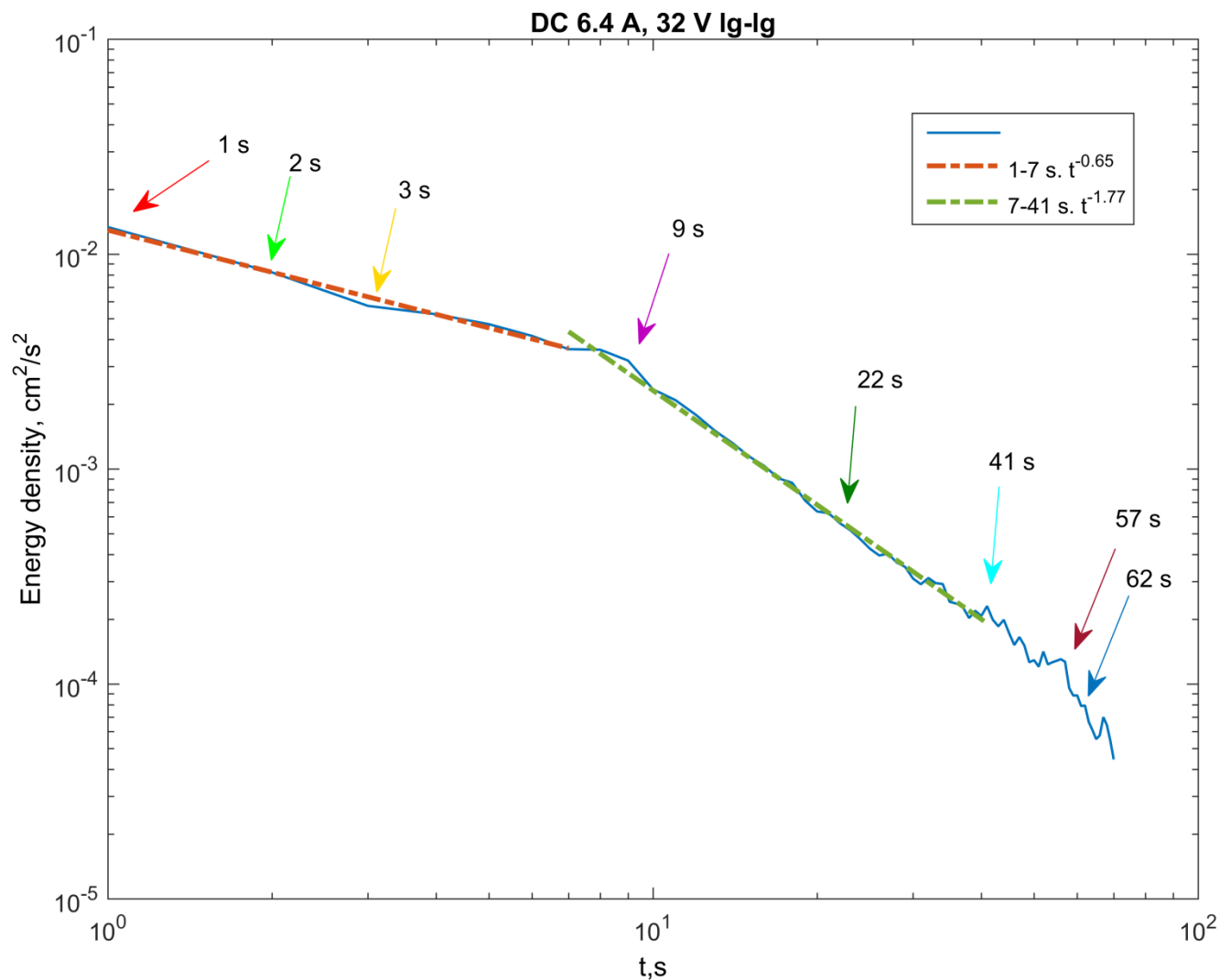
Усреднённое поле скорости перед отключением накачки



Распределение азимутальной скорости

- Наблюдено слияние мелкомасштабных вихрей вследствие нелинейного взаимодействия между ними и образование более крупномасштабных вихрей
- Наблюдено формирование обратного каскада с близкой к теоретически предсказанной зависимостью  $E(k)$
- Наблюдено явление спектральной конденсации энергии и формирование когерентного вихря за счёт того, что максимальный масштаб ограничивался размерами ячейки
- Обнаружен дрейф центра когерентного вихря
- Впервые измерен радиальный профиль азимутальной скорости в системе центра когерентного вихря: в сердцевине скорость растёт линейно, вне сердцевины - близка к постоянной
- Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями

# После отключения накачки: три режима затухания



# Трение о дно

