

# Измерение малых значений коэффициента межфазного натяжения с помощью возбуждения капиллярных волн импульсом радиационного давления ультразвука в условиях микрогравитации

Л.М. Крутянский<sup>1,3</sup>, А.П. Брысев<sup>1,3</sup>, F. Zoueshtiagh<sup>2,3</sup>, P. Pernod<sup>2,3</sup>, Д.И. Макалкин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волновых исследований, лаборатория ультраакустики.*

*ул. Вавилова 38, 119991, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*University of Lille, CNRS, UMR 8520, Institut d'Electronique, Microélectronique et Nanotechnologie (IEMN), Groupe AIMAN-FILMS / Centrale Lille – CS20048 - Laboratoire International LIA LEMAC-LICS, Av. Poincare, CS 60069, 59652, Villeneuve d'Ascq Cedex, France*

<sup>3</sup>*Международная Ассоциированная Лаборатория критических и сверхкритических явлений в функциональной электронике, акустике и флюидике*

*E-mail: [dmitrymakalkin@yandex.ru](mailto:dmitrymakalkin@yandex.ru)*



**Цель работы:** разработка метода быстрого определения с достаточно высокой точностью малых значений коэффициента межфазного натяжения (КМН) в бинарных жидкостях.

Бинарные жидкости – такие пары жидкостей, взаимная растворимость и межфазное натяжение которых зависят от их процентного соотношения и температуры

**Возможные применения:**

- фармацевтика, топливо;
- экспериментальные исследования в области механики жидкостей (например, неустойчивость Фарадея)

*Как измерить малое\* поверхностное натяжение в бинарных жидкостях?*

**метод висячей капли**

- трудность в использовании игл малого диаметра
- вывод исследуемой системы из равновесного состояния

**метод вращающейся капли**

- вывод исследуемой системы из равновесного состояния

**метод бегущих волн**

\* порядка мН/м

# Методика измерения КМН

Дисперсионное соотношение для гравитационно-капиллярных волн малой амплитуды на границе не тонких слоев двух жидкостей (*Kumar K., Tuckerman L. J. Fluid Mech. 1994*):

$$\omega^2 = \frac{(\rho_1 - \rho_2)g}{\rho_1 + \rho_2} k + \frac{\sigma}{\rho_1 + \rho_2} k^3 - \left( 2 \frac{\eta_1 + \eta_2}{\rho_1 + \rho_2} \right)^2 k^4$$

$\eta_{1,2}$  – вязкости,  
 $\rho_{1,2}$  – плотности,  
 $g$  – ускор. своб. падения,  
 $\omega = 2\pi f$  – цикл. частота,  
 $k = \omega/V$  – волн. число,  
 $V$  – скорость волны

Для измеренной зависимости  $\omega(k)$ , пренебрегая вязкостью для низких частот, можно построить линейную регрессию относительно  $k^2$  вида  $y = a_0 + a_1 k^2$ , где  $a_1$  - искомое  $\sigma$



$$\omega^2 (\rho_1 + \rho_2) / k = \frac{(\rho_1 - \rho_2)g}{\rho_1 + \rho_2} + \frac{\sigma}{\rho_1 + \rho_2} k^2$$

Доминирующий на низких частотах гравитационный член увеличивает ошибку измерений



в случае невесомости зависимость упрощается

$$\omega^2 (\rho_1 + \rho_2) / k = \sigma k^2 \quad \text{т.е.} \quad y(k^2) = a_1 k^2$$



$\sigma = a_1$  - коэффициент линейной аппроксимации

# Методика измерения КМН

*Как создать невесомость?*

Полёт по параболической траектории  
на специальном самолете!

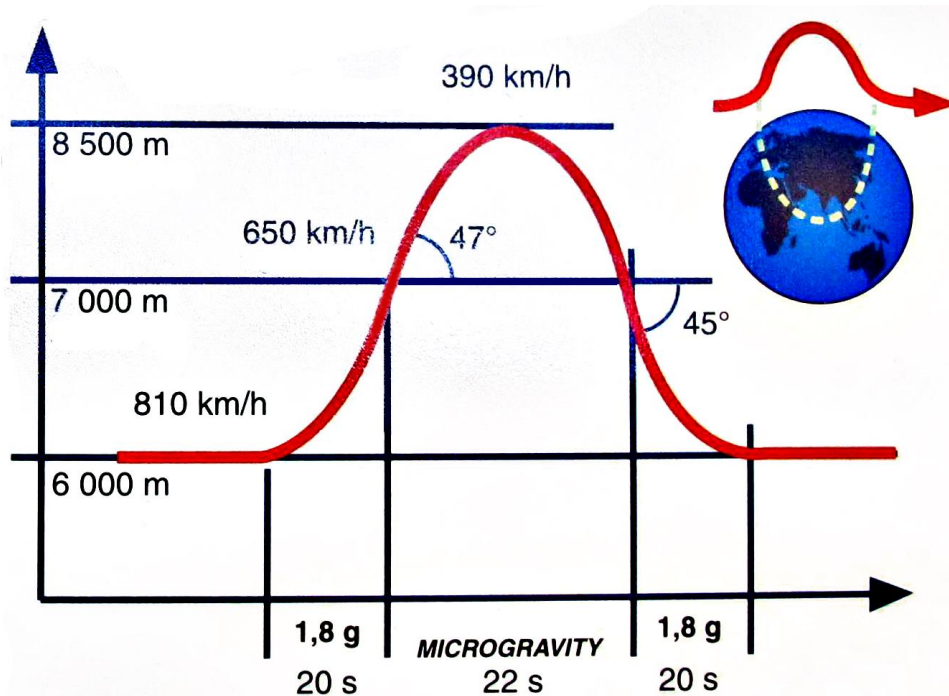


Рис.2. Траектория самолета ZERO-G A300



Рис.1. Самолет ZERO-G A300



Рис.3. Внутри ZERO-G A300.  
Экспериментальная установка

# Методика измерения КМН

*Как возбудить капиллярные волны?*

Возбуждение капиллярных волн ультразвуком\*

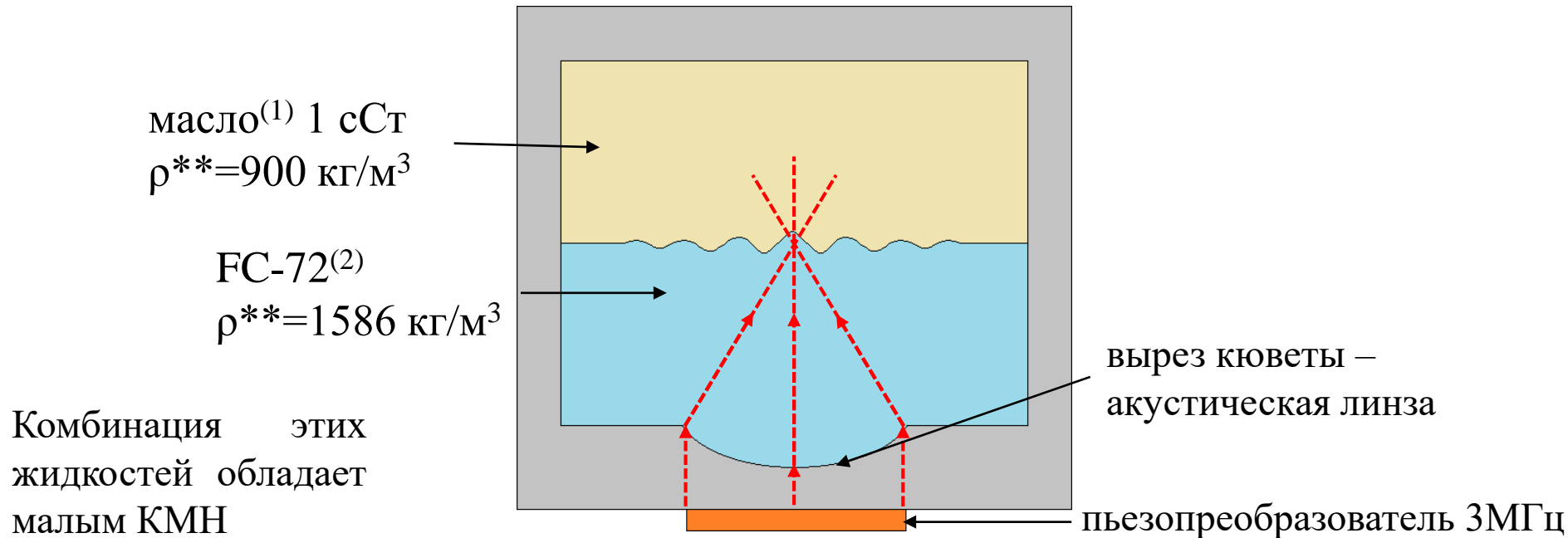


Рис.4. Часть экспериментальной установки  
- кювета 35×28×4 мм

<sup>1</sup>силиконовое масло – декаметилтетрасилоксан, <sup>2</sup>перфторогексан

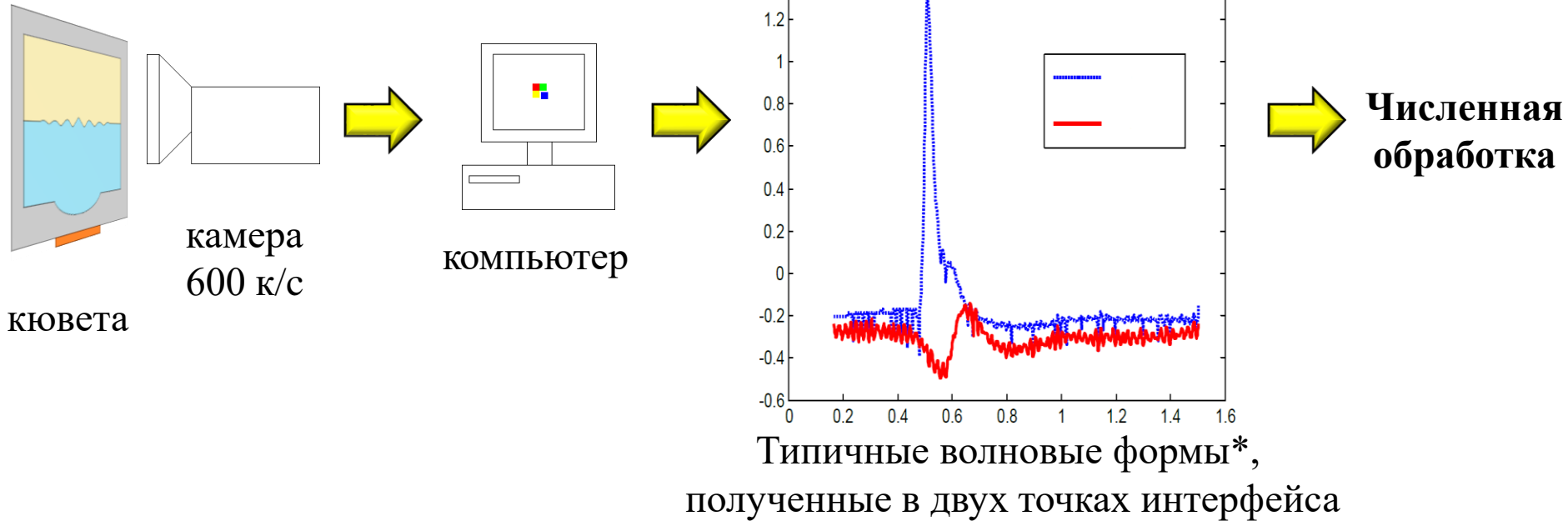
\* посредством радиационного давления уз

\*\* при 20° С

# Методика измерения КМН

Как получить дисперсионную зависимость быстро?

Широкополосное измерение за 1 опыт: возбуждение капиллярных волн коротким импульсом ультразвука



**Численная обработка:** БПФ, фазовый спектр, восстановление полной фазы (*unwrapping*, -англ.) в пространстве частот, нахождение разности полных фаз в двух точках пространства – фазовый сдвиг  $\Delta\varphi(\omega)$ , скорости волн  $V(\omega) = -\omega \cdot d / \Delta\varphi(\omega)$ , волновые числа  $k(\omega) = \omega / V(\omega)$ .

\* ВФ - зависимость колебаний вертикальной координаты точки поверхности от времени

# Результаты эксперимента

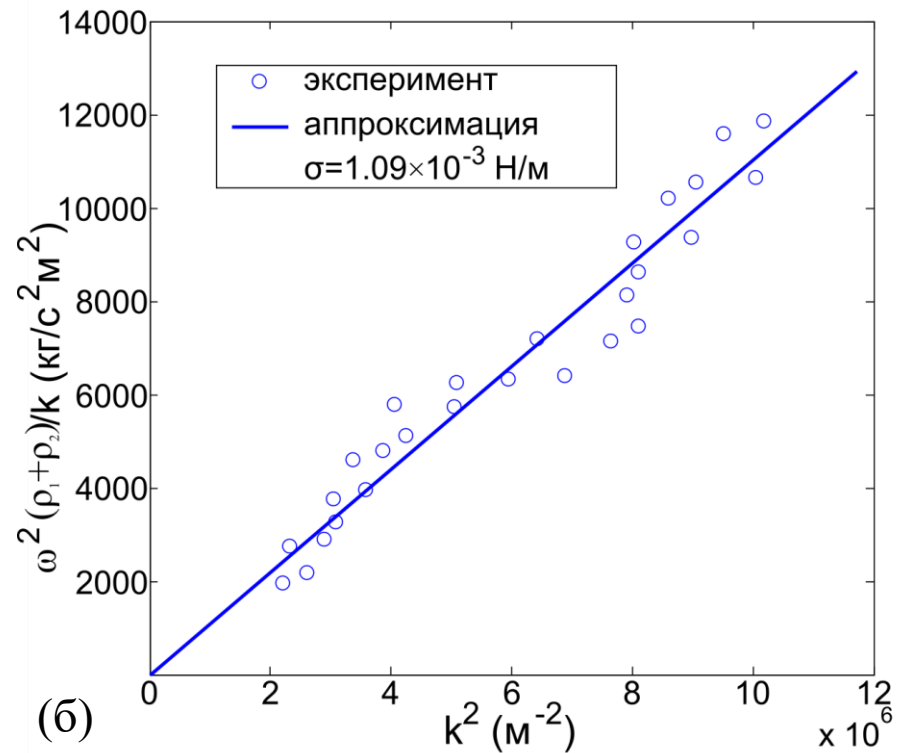
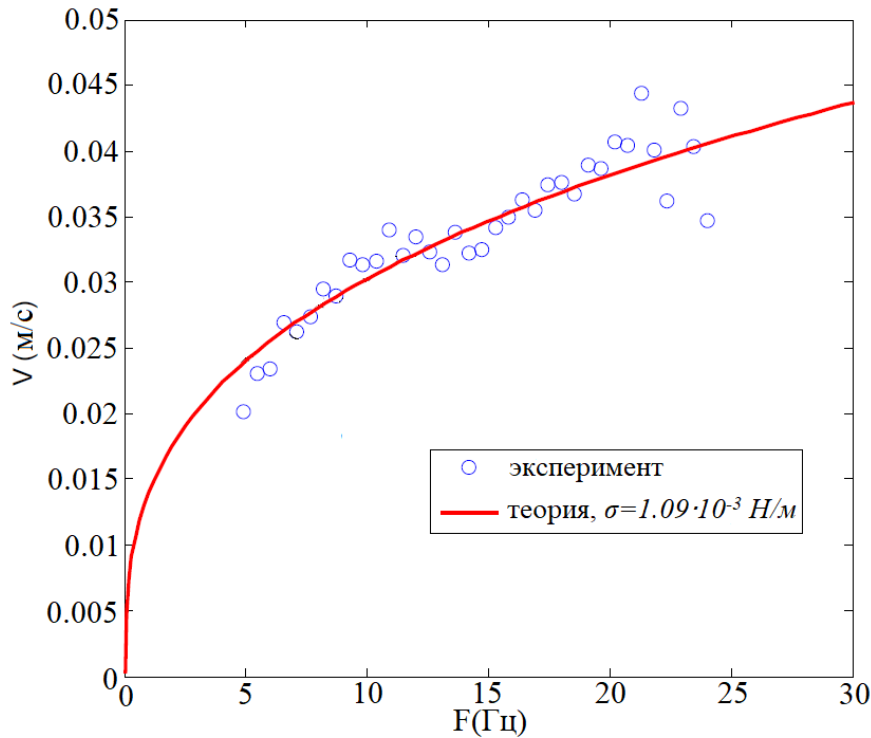


Рис. 5 Измерения в условиях микрогравитации FC-72 / 1 сСт силиконовое масло.

(а) – дисперсия фазовой скорости, точки - эксперимент, линия - теория.

(б) - график функции  $\omega^2(\rho_1+\rho_2)/k$  от  $k^2$  (точки) и ее линейная аппроксимация (линия).

$$\sigma = (1.09 \pm 0.02) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

Измерения КМН в условиях с нормальной гравитацией дают  $\sigma = (1.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$  Н/м



# Заключение

Предложенный метод, характеризующийся импульсным ультразвуковым возбуждением капиллярных волн в условиях микрогравитации, пригоден для быстрого измерения достаточно малых значений коэффициента межфазного натяжения.

Метод обеспечивает проведение измерений КМП в бинарных жидкостях:

- в случае малых значений КМП;
- сравнительно быстро и доступно;
- результаты согласуются с результатами других экспериментов и данными из литературы.

Спасибо

# Результаты эксперимента

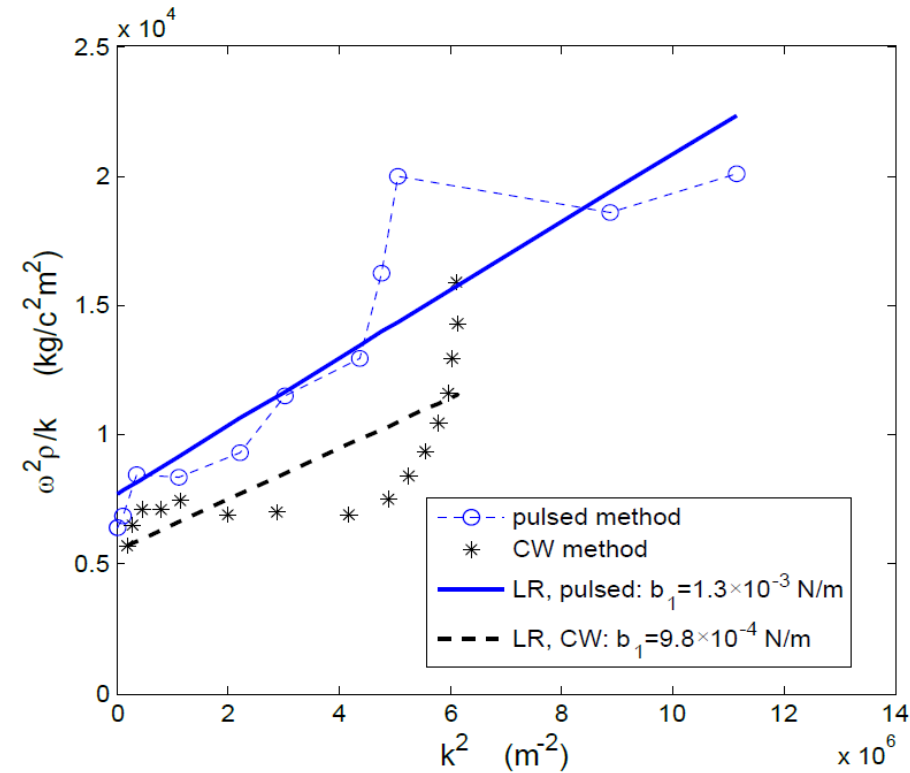
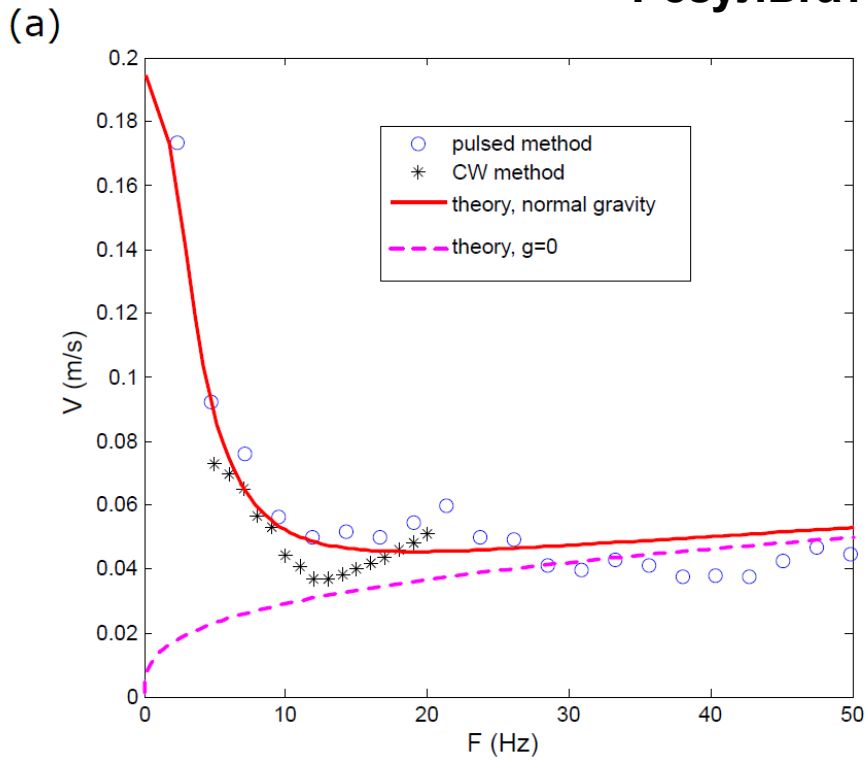


Рис. 6. Измерения для FC-72 / 1 сСт силиконовое масло при нормальной гравитации. (a) – дисперсия фазовой скорости. Сплошная линия – теория при отсутствующей невесомости, пунктирная линия – теория при невесомости. Значение  $\sigma = 1.3 \cdot 10^{-3}$  Н/м взято из теории.

(b) - полученные  $\omega^2(\rho_1+\rho_2)/k$  от  $k^2$  зависимости (точки) и линейная аппроксимация (LR, прямые линии).