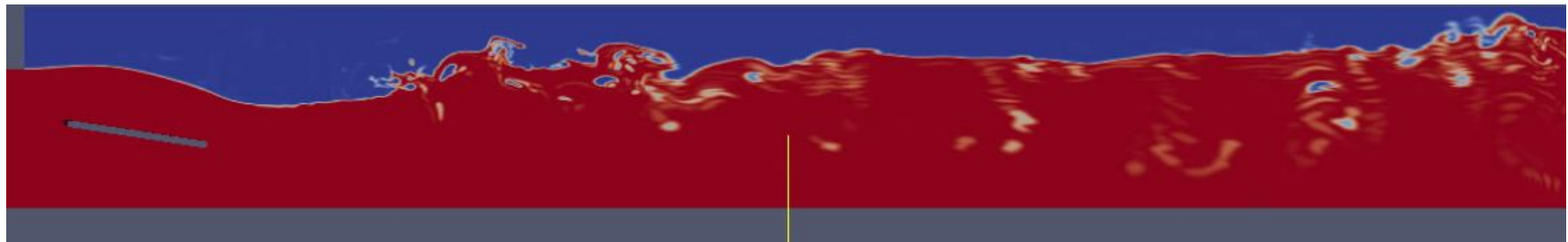


«Современные проблемы дистанционного зондирования
Земли из космоса», Москва, 14-18 ноября 2015

**Моделирование в пакете вычислительной
гидродинамики OpenFoam 2D обрушений и спектров
коротких гравитационно-капиллярных волн в
контексте задач дистанционного зондирования
океана**

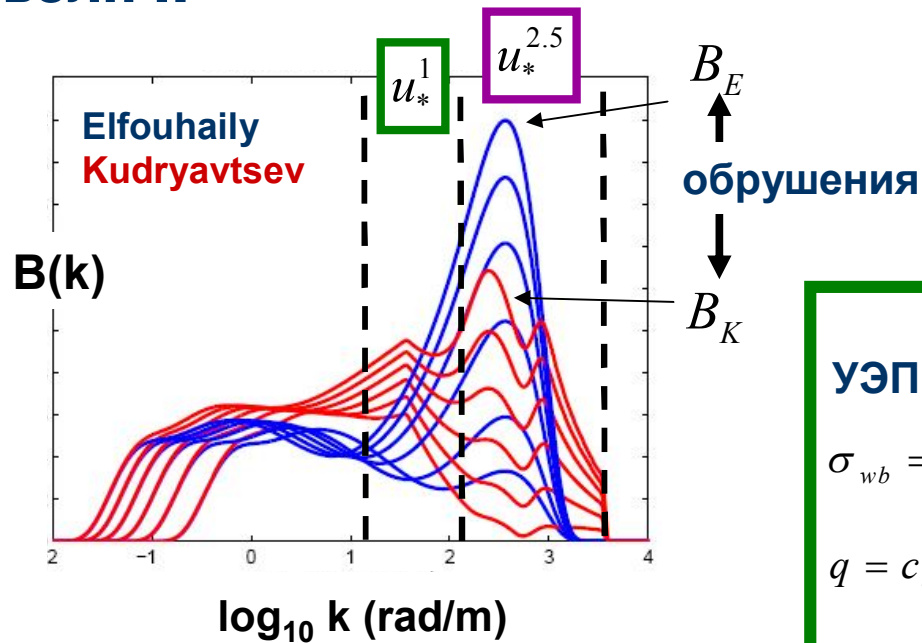


Дмитрий Ивонин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова, РАН

Предположение

Слабонелинейные спектральные модели пытаются включить в линейный спектр сильно нелинейные эффекты от обрушений волн !!



УЭПР обрушений

$$\sigma_{wb} = q \cdot \sigma_{0wb}(\theta)$$

$$q = c_q \int_{\varphi} \int_{k < k_{nb}} \Lambda(k, \varphi_1) d\varphi_1 dk \sim \left(\frac{u_*}{c_{nb}} \right)^{2+m_g}$$

$$\sigma_{0wb}(\theta) = \left(\sec^4 \theta / s_{wb}^2 \right) \exp \left(-\tan^2 \theta / s_{wb}^2 \right) + \varepsilon_{wb} / s_{wb}^2$$

относительное количество обрушений

Композитная береговая модель

$$\sigma^V = \sigma_{sp}^{KA}(mss) + \sigma_B(B_E)$$

$$\sigma^H = \sigma_{sp}^{KA}(mss) + P_B \sigma_B(B_E)$$

Полное УЭПР (Kudryavtsev, 2003)

$$\sigma^V = \sigma_{sp}^{KA} + \sigma_B(B_K) + \sigma_{wb}$$

$$\sigma^H = \sigma_{sp}^{KA} + P_B \sigma_B(B_K) + \sigma_{wb}$$

Резюме из анализа УЭПР обрушений Кудрявцева (2003)

Эти “зеркально отражающие” участки поверхности могут быть заменены некоторыми когерентными структурами

УЭПР обрушений

$$\sigma_{wb} = q \cdot \sigma_{0wb}(\theta)$$

Относительное количество обрушений

$$q = c_q \int_{\varphi} \int_{k < k_{nb}} \Lambda(k, \varphi_1) d\varphi_1 dk \sim \left(\frac{u_*}{c_{nb}} \right)^{2+m_g}$$

“зеркально отражающие” участки поверхности

$$\sigma_{0wb}(\theta) = \left(\sec^4 \theta / s_{wb}^2 \right) \exp\left(-\tan^2 \theta / s_{wb}^2 \right) + \varepsilon_{wb} / s_{wb}^2$$

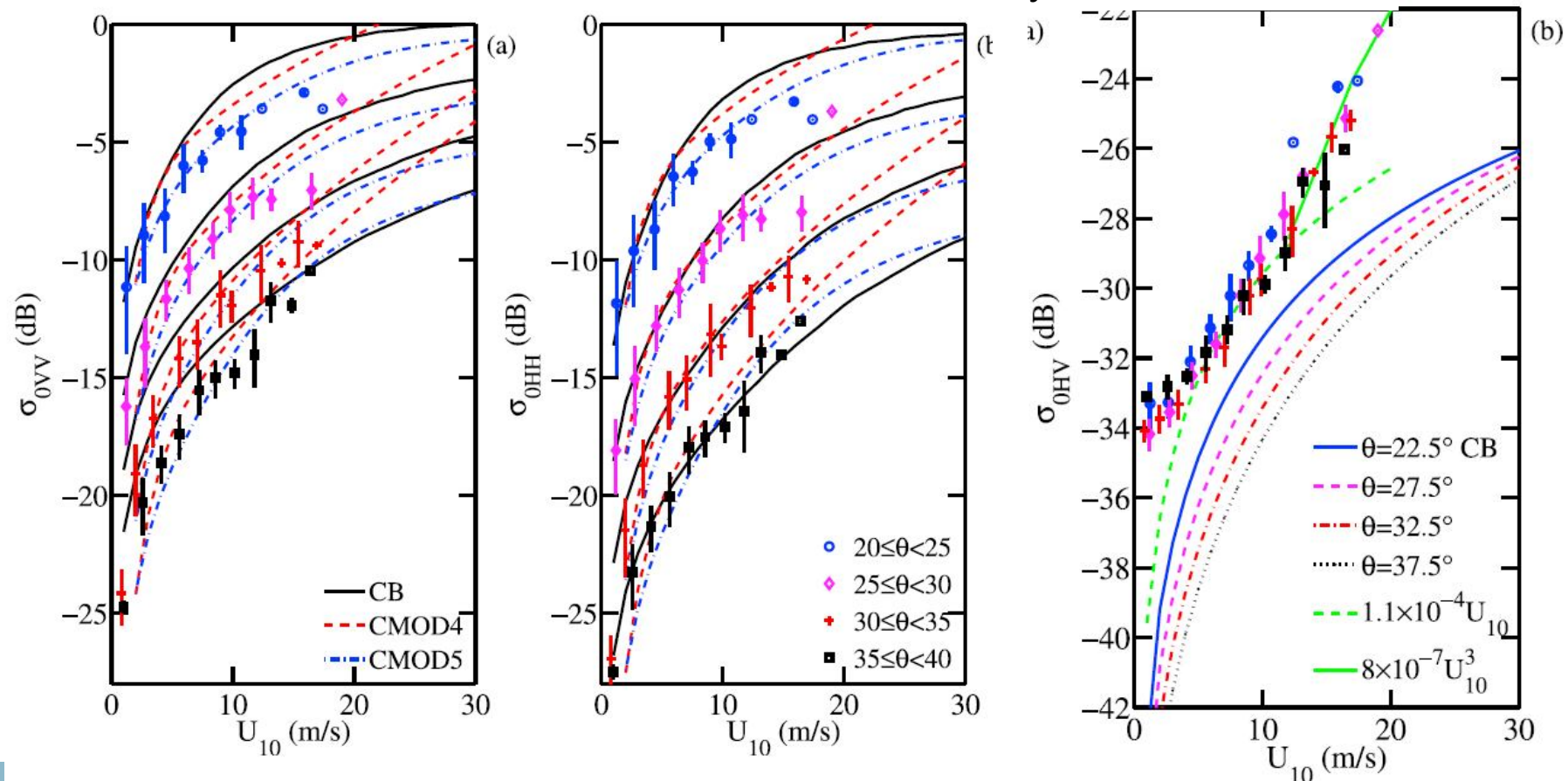


$$s_{wb} = 0.44$$

уклоны обрушений, чтобы подогнать модель Кудрявцева (2003) под данные

Результаты композитная брегговская модели (3-10х разница VH)

RADARSAT - 2 данные, совмещенные с буями



Hwang, P. A., Zhang, B., Toporkov, J. V., & Perrie, W. (2010). Comparison of composite Bragg theory and quad - polarization radar backscatter from RADARSAT - 2: With applications to wave breaking and high wind retrieval. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C8).



Факт: для VH поляризации

Только 3D когерентные структуры могут помочь объяснить поведение сигнала на VH поляризации (Voronovich & Zavorotny, 2011)

Цель и задачи работы

- численно воспроизвести результаты лабораторных экспериментов, связанных с измерениями параметров ГК волн
- посмотреть статистику параметров, влияющих на расчет ЭМ рассеяния
- реализация расчетов с помощью открытых программных средств

Эксперименты с короткими гравитационно-капиллярными (ГК) волнами

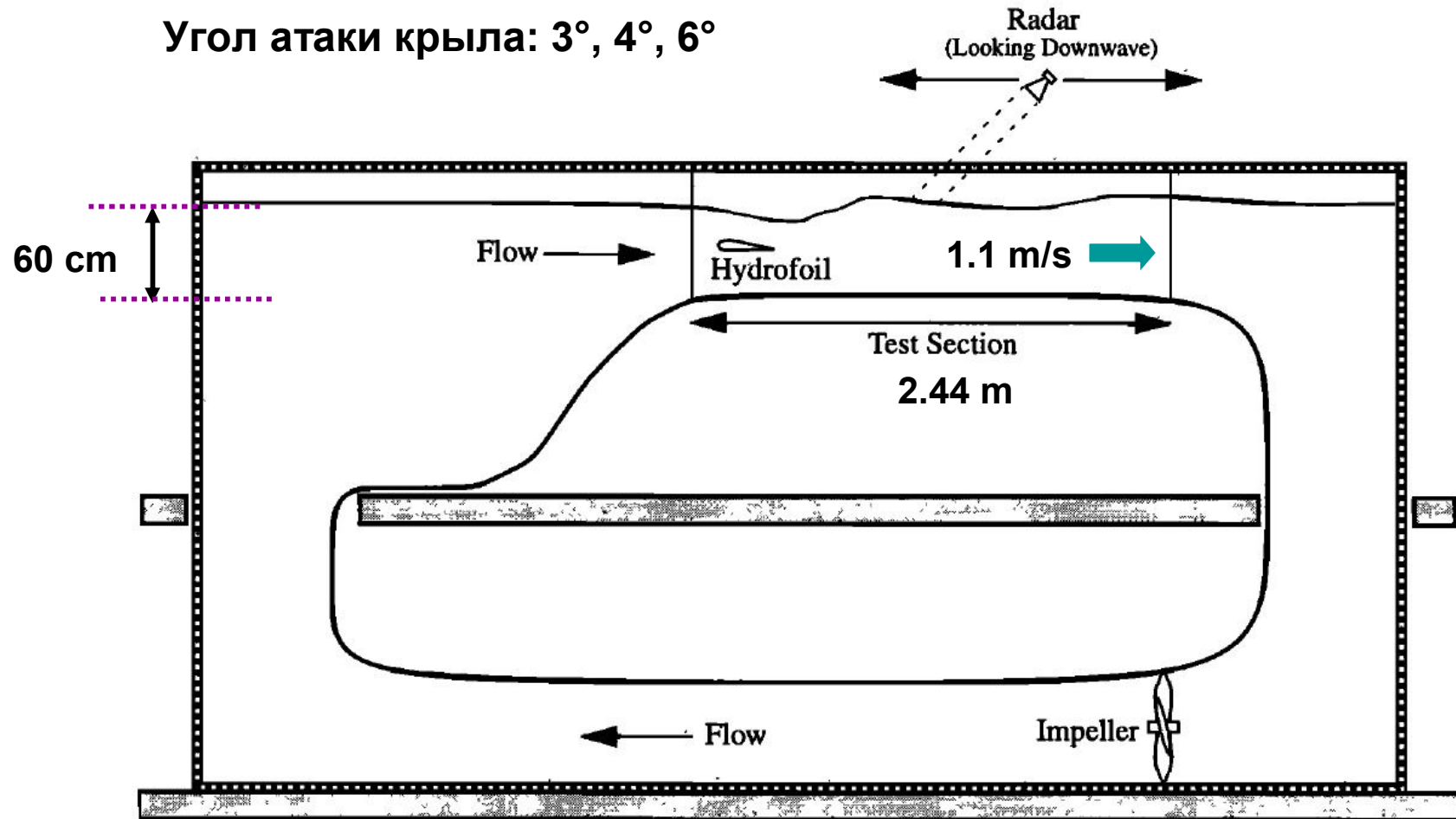
- Ericson et al., 1999:

стационарно обрушающиеся ГК волны в волновом лотке

- Jahne & Riemer, 1990:

короткие ГК волны в ветро-волновом лотке

Эксперимент для стационарных обрушающихся волн (Ericson et al., 1999)



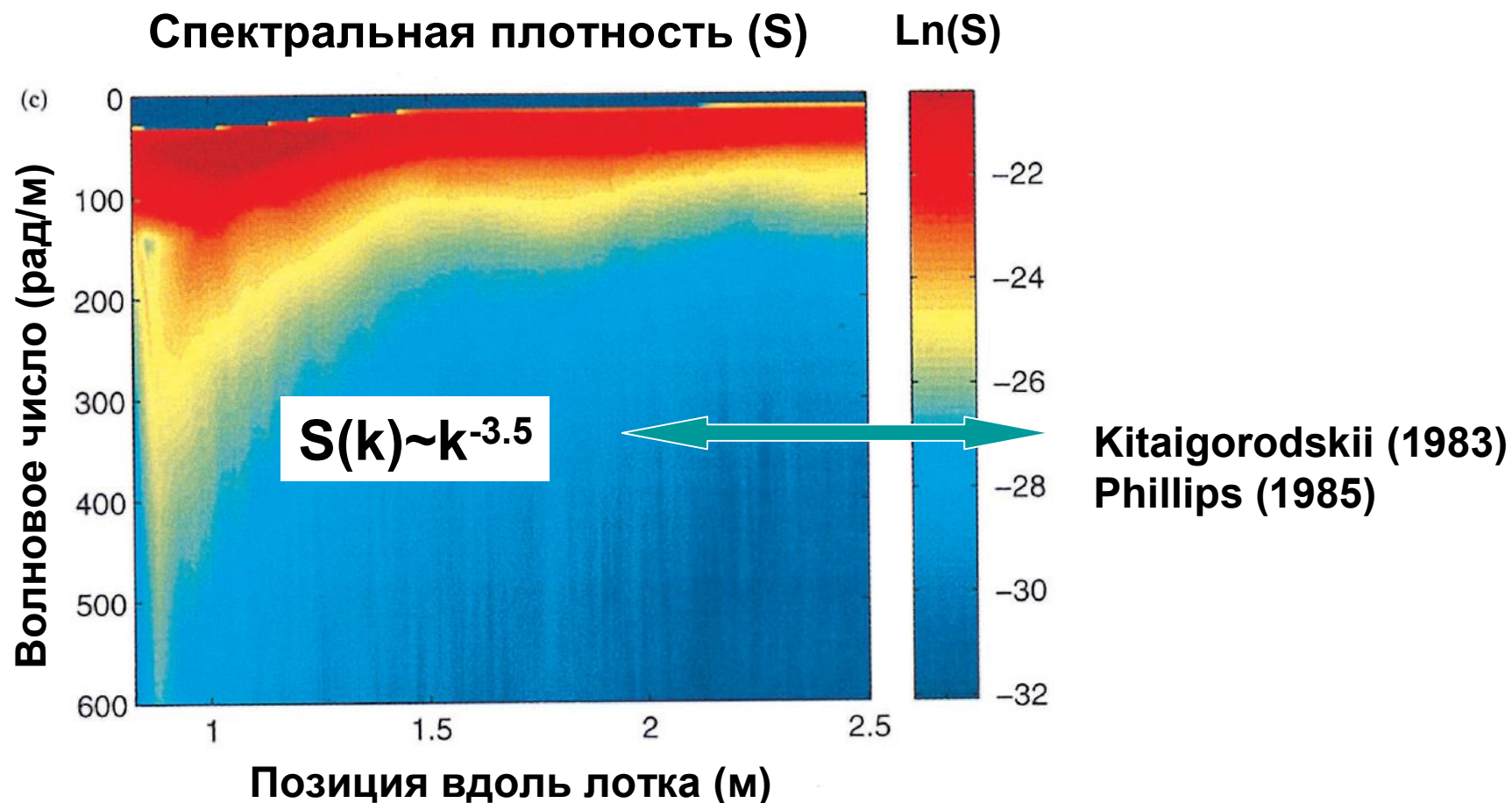
Radar backscatter from stationary breaking waves

Eric A. Ericson^{1,2} David R. Lyzenga and David T. Walker

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 104, NO. C12, PAGES 29,679–29,695, DECEMBER 15, 1999

Данные для стационарных обрушающихся волн

(эксперимент Ericson et al., 1999)



Radar backscatter from stationary breaking waves

Eric A. Ericson^{1,2} David R. Lyzenga and David T. Walker

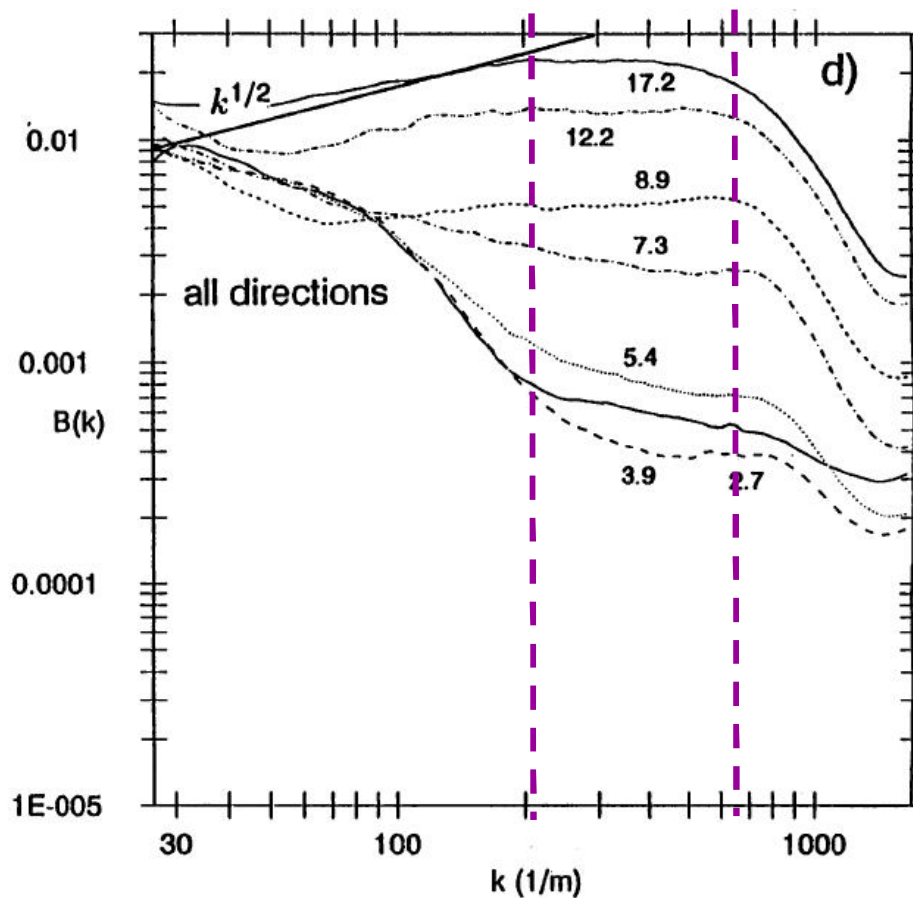
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 104, NO. C12, PAGES 29,679–29,695, DECEMBER 15, 1999

Данные ветро-волнового лотка Jahne & Riemer (1990):

Two-Dimensional Wave Number Spectra of Small-Scale Water Surface Waves

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 95, NO. C7, PAGES 11,531–11,546, JULY 15, 1990

Ненаправленный спектр кривизны $B(k)$



$$B(k) = \beta g^{-1/2} f(\Theta) u_* k^{1/2}$$

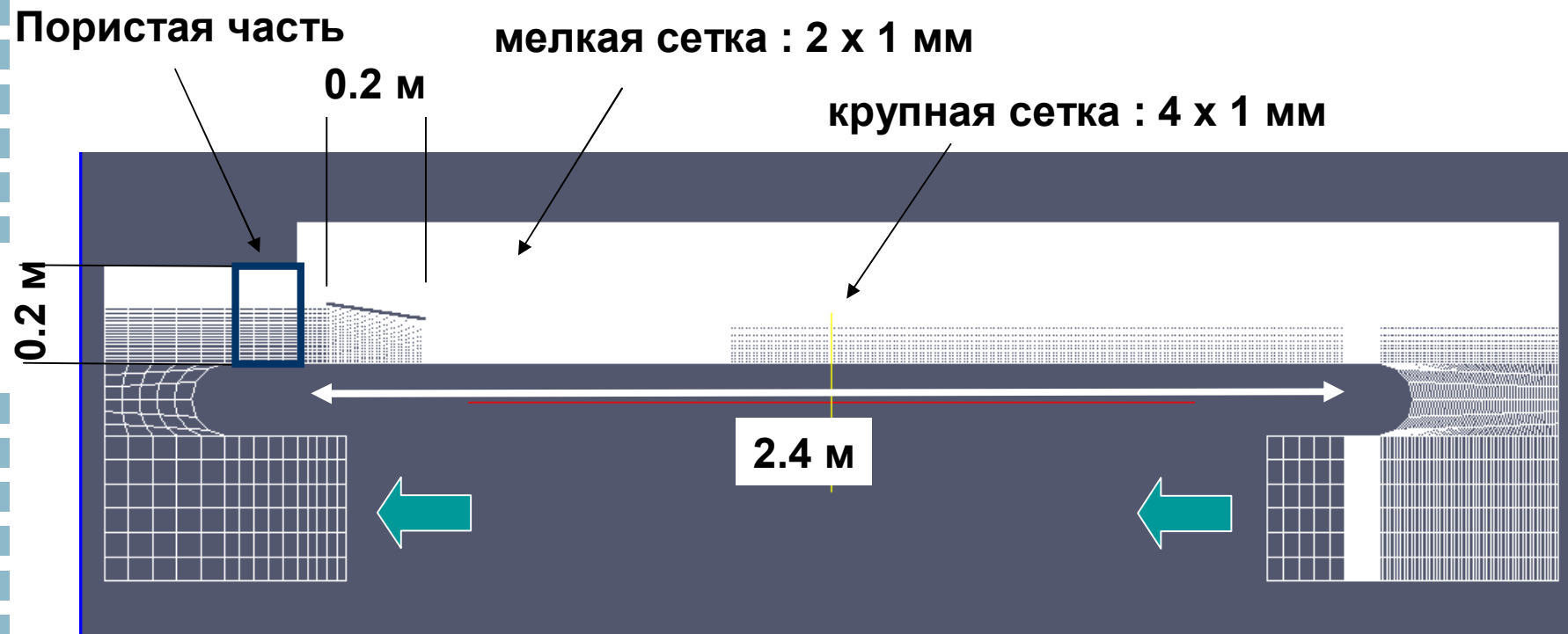
Kitaigorodskii (1983)
Phillips (1985)



Описание модели (CFD OpenFoam)

OpenFoam: геометрия и сетка

- геометрия и сетка были сгенерированы *blockMesh* утилитой
- рассматривался угол крыла в 3° , 4° , 6°



Количество узлов = ~120 000

PC CPU время для 80 сек с шагом 0.020 сек = ~ 3-4 дня

VOF (Volume of Fluid) уравнения в модели

Уравнение движения

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1$$

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0$$

Кривизна поверхности

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{n}$$

Уравнение силы поверхностного натяжения

$$F_{\text{vol}} = \sigma_{ij} \frac{\rho \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)}$$

Нормаль к поверхности

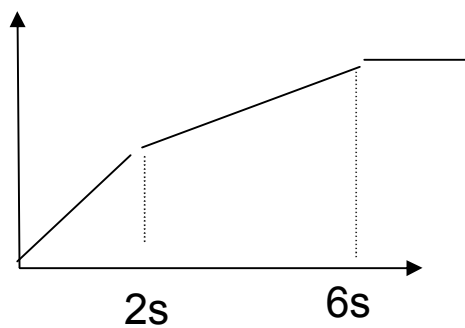
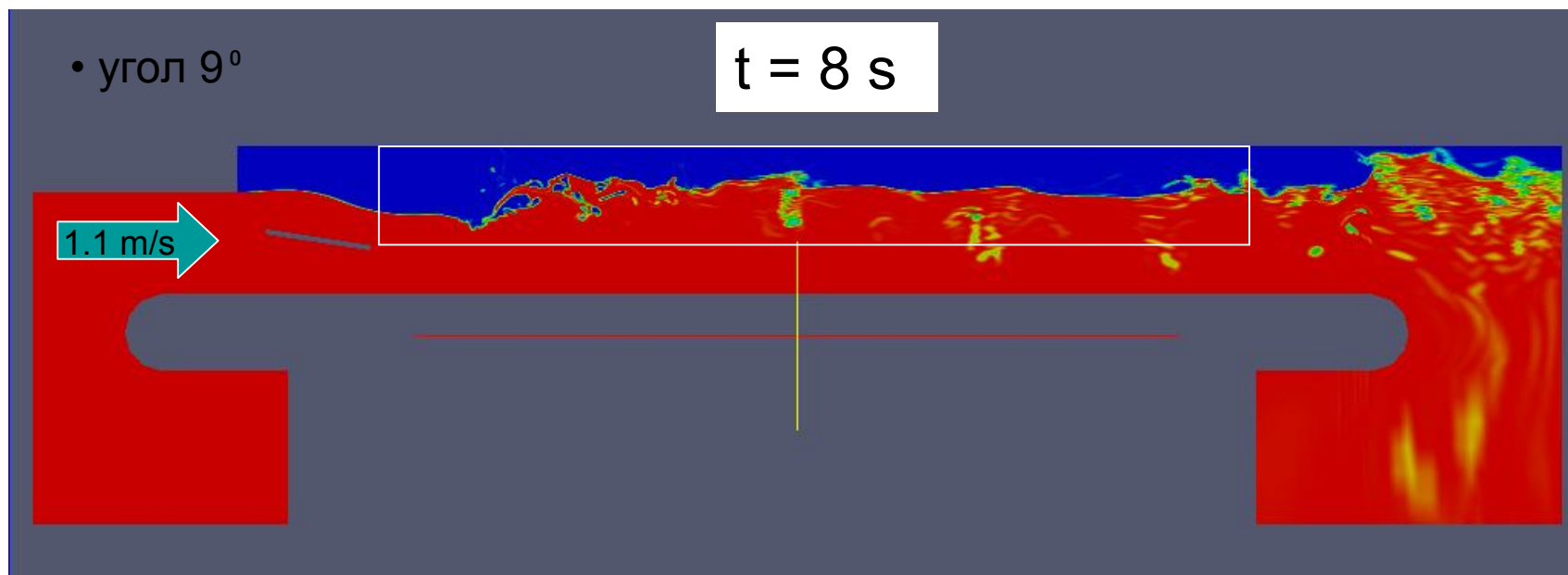
$$n = \nabla \alpha_q$$

*) **Fluent** 6.3 Руководство пользователя(2006)

**) Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., & Fredsøe, J. (2012).

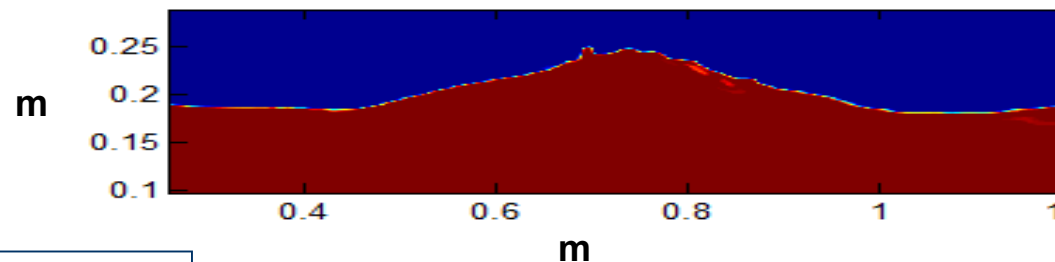
Набор инструментов для генерации волны с открытым исходным кодом библиотеки CFD : **OpenFoam** ®. Международный журнал для численных методов в жидкостях, 70(9), 1073-1088.

Пример расчета

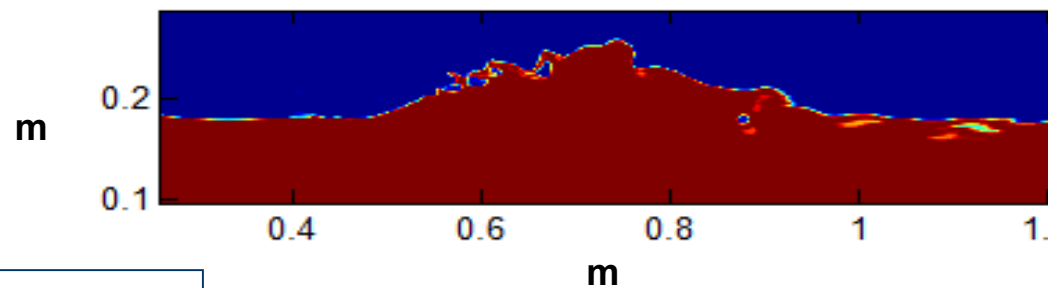


Интенсивность обрушений в зависимости от угла атаки крыла

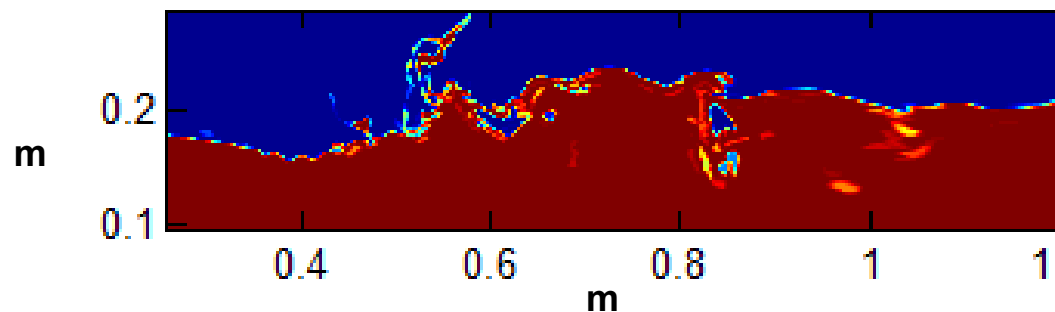
Для угла 3°



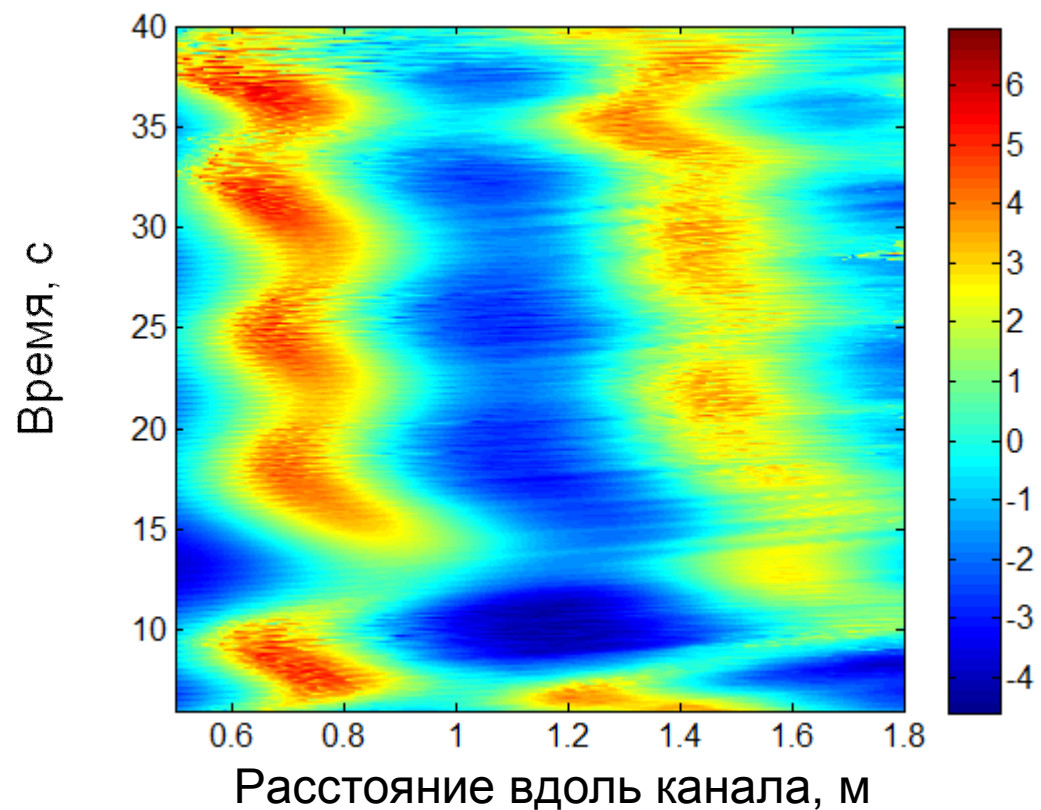
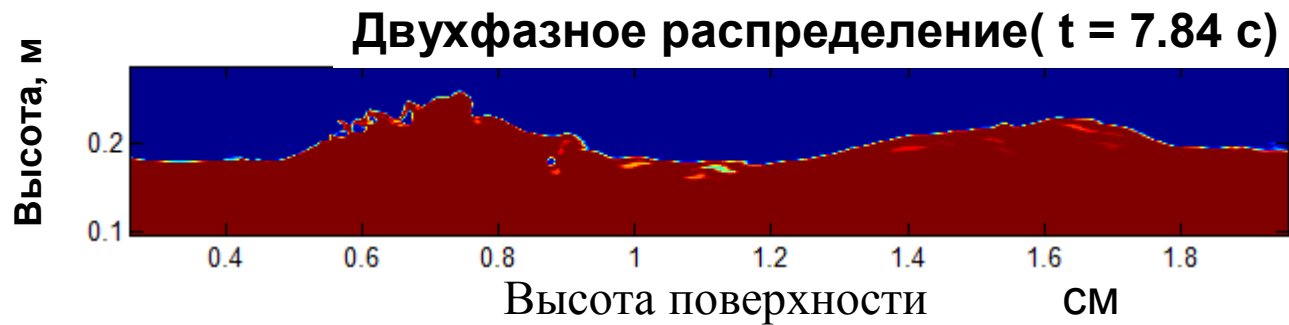
Для угла 4°



Для угла 6°

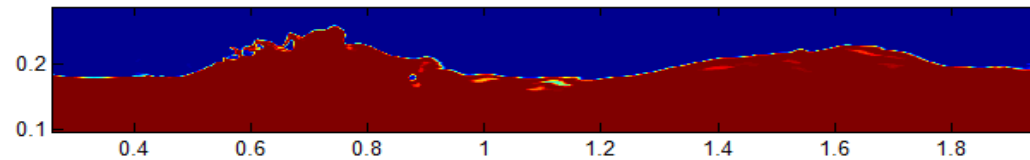


Восстановление высоты поверхности (моделирование как поверхность видит лазер)

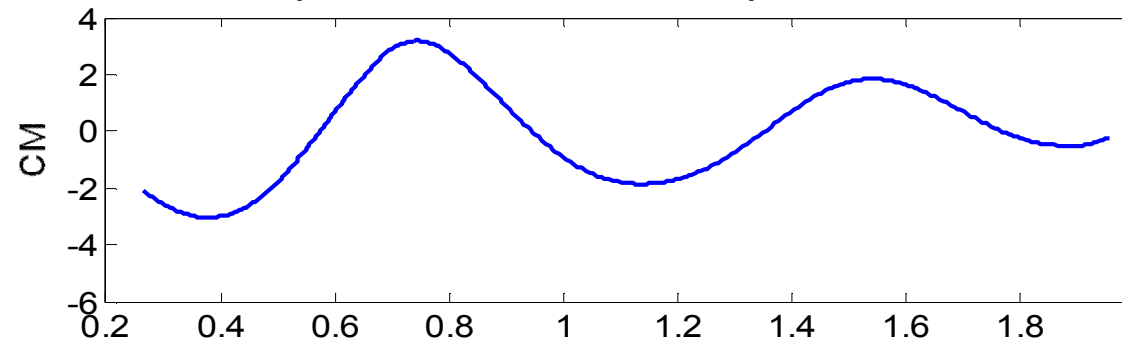


Качественное сравнение с Ericson, 1999

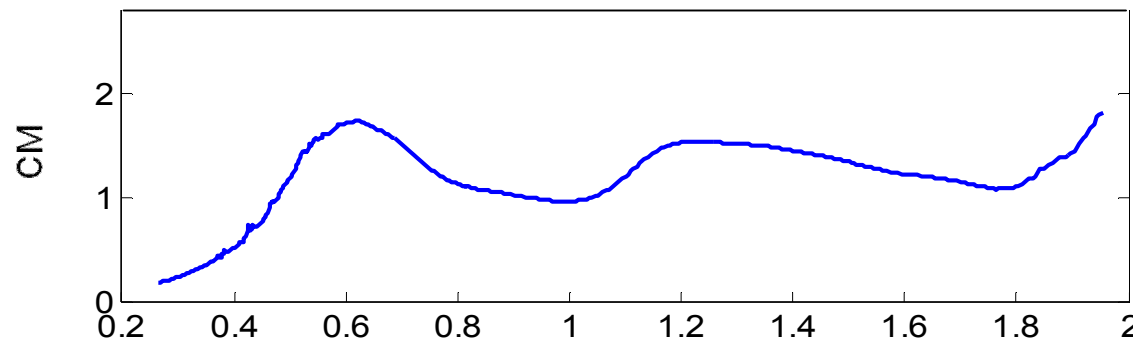
Результаты для угла 4°



Средняя высота поверхности



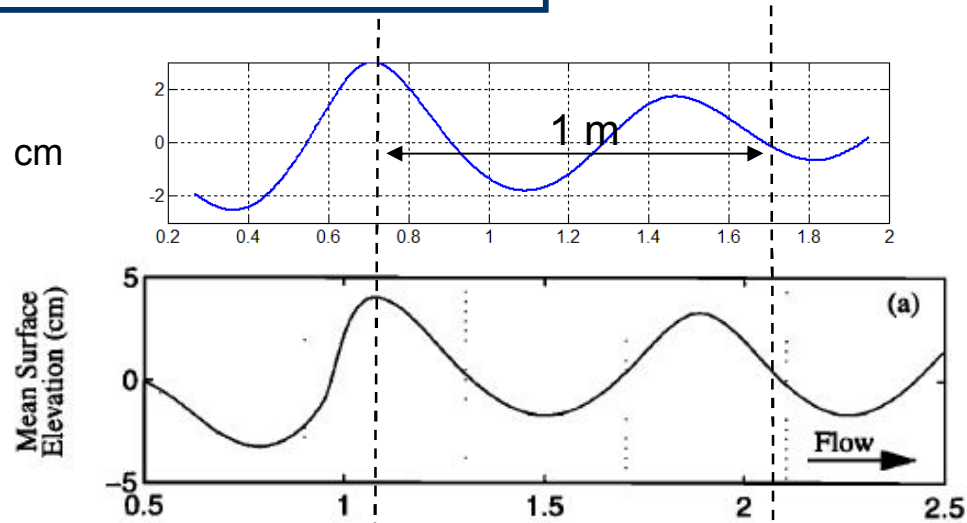
Среднеквадратичное отклонение



Расстояние вдоль канала, м

Сравнение с Ericson et al., 1999

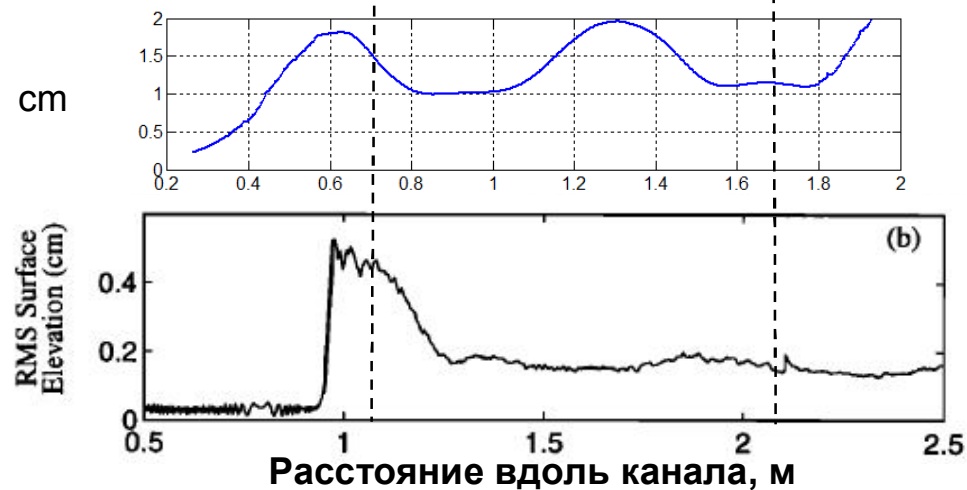
Средняя высота поверхности



Для угла 3°

Для угла 3°
Ericson et al., 1999

Среднеквадратичные возвышения

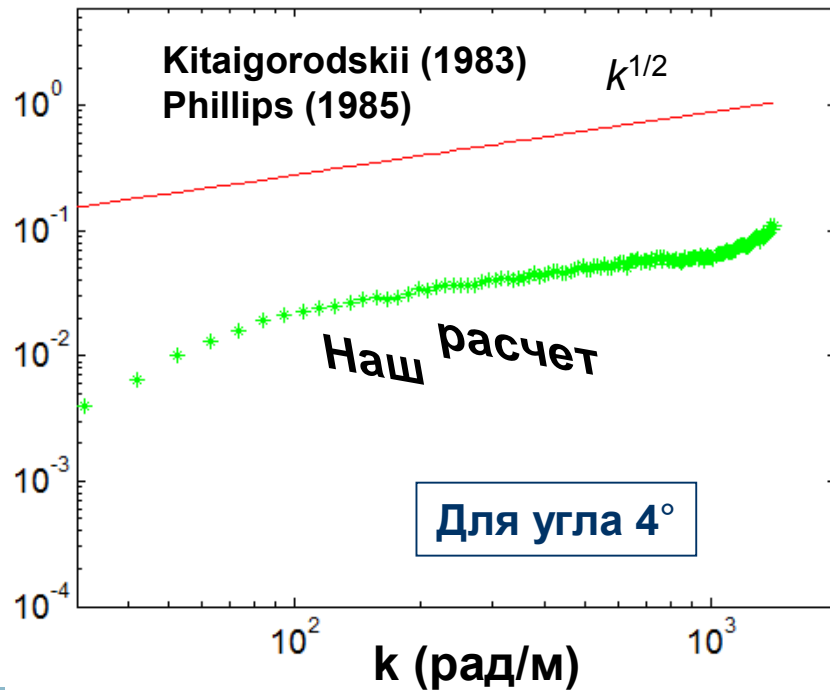


Для угла 3°

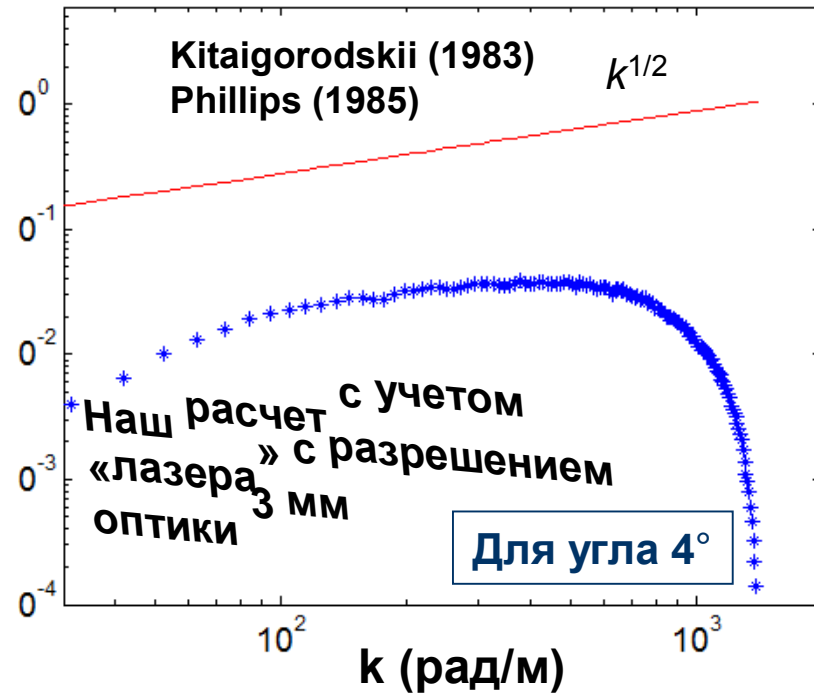
Для угла 3°
Ericson et al., 1999

Исходный спектр и эффект конечного разрешения измерительной аппаратуры

Исходный спектр $V(k)$



Спектр $V(k)$



Эффект конечного разрешения «оптики» «лазера»

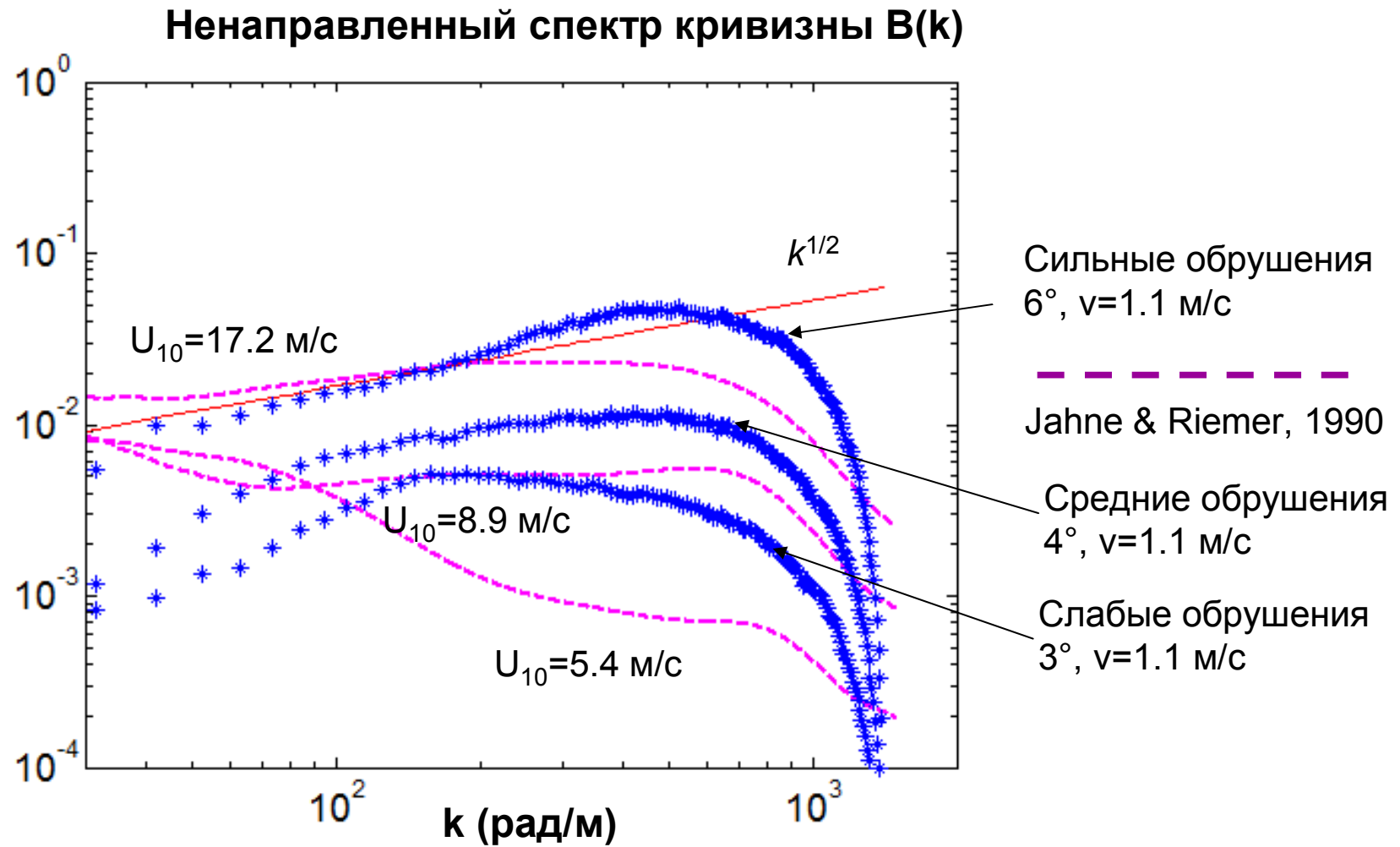
Измеренный сигнал Исходный сигнал Преобразование прибора

$$s'(\mathbf{x}, t) = s(\mathbf{x}, t) * \Pi\left(\frac{t}{\Delta t}\right)$$

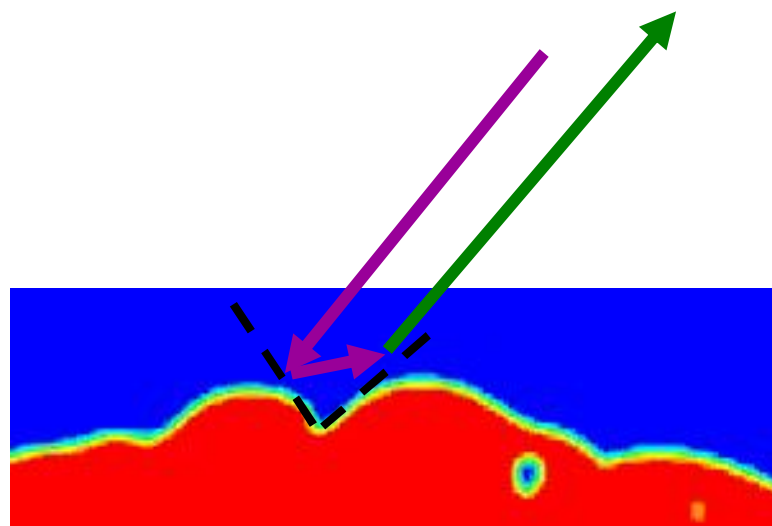
Измеренный спектр Исходный спектр Преобразование прибора

$$\hat{s}'(\mathbf{k}, \omega) = \hat{s}(\mathbf{k}, \omega) \cdot \frac{\sin(\pi \Delta t \nu)}{\pi \Delta t \nu}$$

Сравнение с Jahne & Riemer, 1990



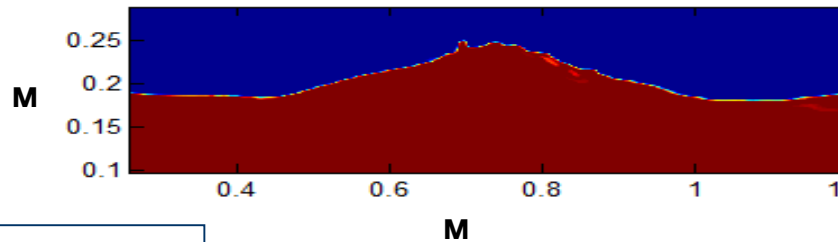
Возможное интенсивное рассеяние на объектах с большой кривизной



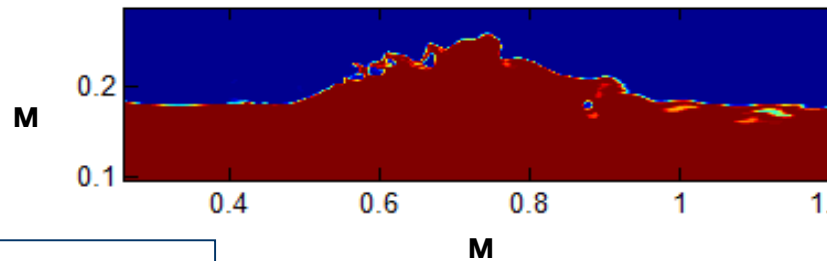
- [6] AA Mouche, B. Chapron, N. Reul, D. Hauser, and Y. Quilfen. Importance of the sea surface curvature to interpret the normalized radar cross section (DOI 10.1029/2006JC004010). *J. Geophys. Res.*, 112(C10):10002, 2007.

PDF кривизны поверхности

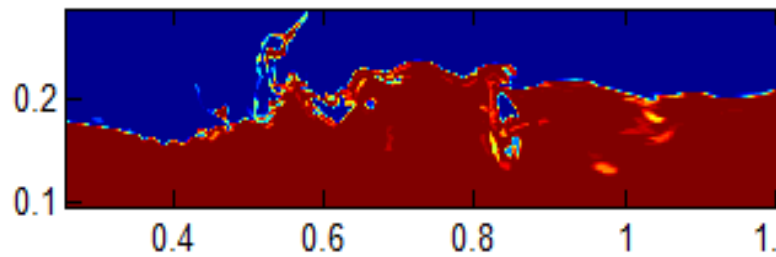
Для угла 3°



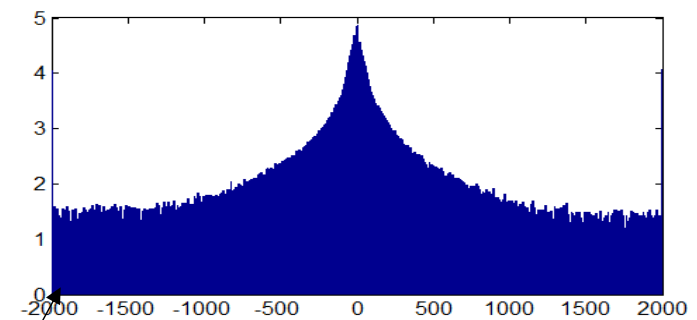
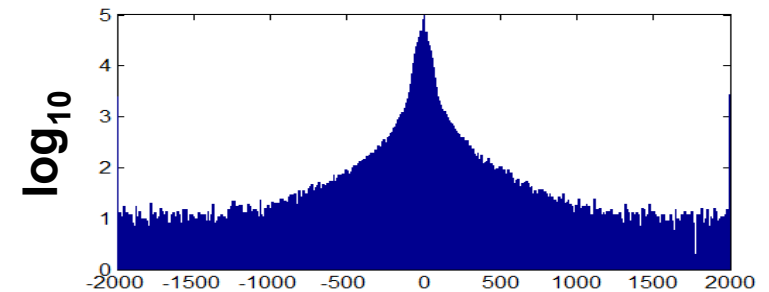
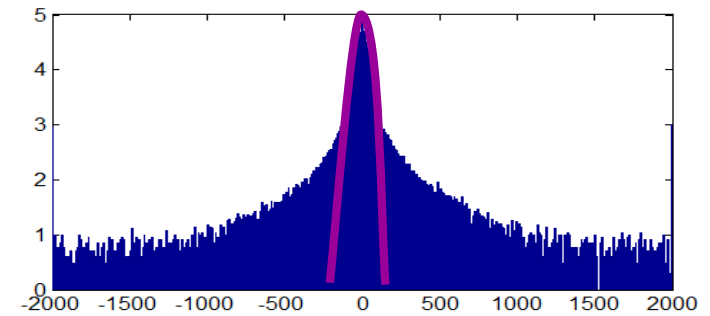
Для угла 4°



Для угла 6°



PDF кривизны поверхности

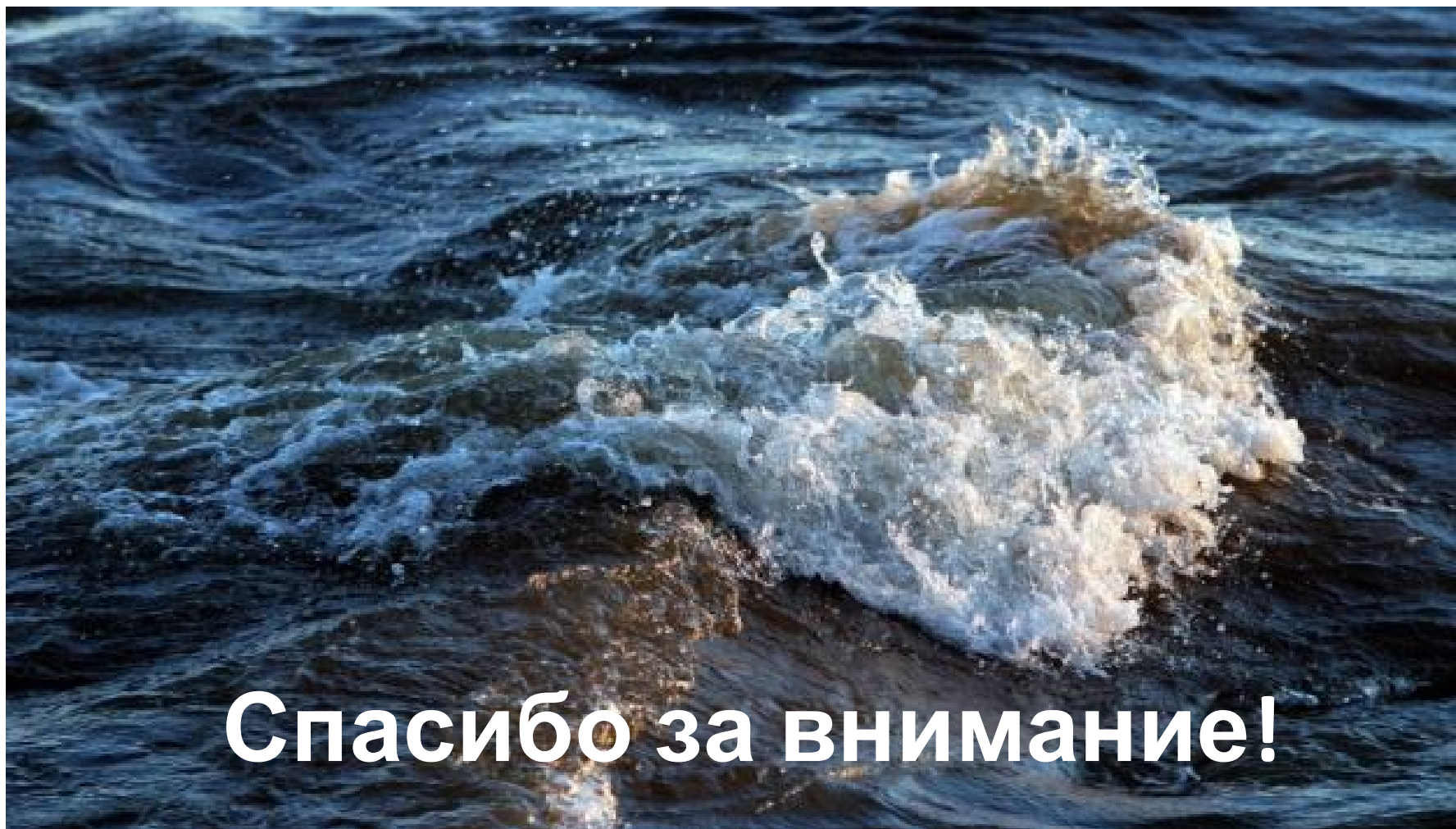


Радиус закругления 0.5 мм

1/м

Заключение

- в ходе выполнения работы была освоена технология проведения гидродинамического моделирования в пакете OpenFoam
- были смоделированы эксперименты Ericson et al., 1999; сопоставление модельных результатов (спектры, профили возвышений) с результатами Ericson et al., 1999 и Jahne & Riemer, 1990 показало их хорошее качественное и количественное согласие
- показано, что имеется большое количество участков с большой локальной кривизной поверхности, на несколько порядков превышающее «хвосты» нормального распределения
- продемонстрировано влияние свойств ограниченного разрешения измерительной аппаратуры («лазера» и т.п.) на результирующий вид спектров для волн < 3 мм



Спасибо за внимание!