XXIV международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА“, Москва, ИКИ РАН, 2026

Экспериментальное исследование механизма рассеяния микроволнового излучения X-диапазона крутыми гравитационно-капиллярными волнами

Ермаков С.А., Даниличева О.А., Лазарева Т.Н., Лещев Г.В., Сергиевская И.А., Тюрин А.О., Хазанов Г.Е

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Проблема — исследование физических механизмов обратного рассеяния микроволн X- диапазона (средние углы падения)

- *Важность – широкое применение радаров X-диапазона:* судовые, береговые, самолётные РЛС и спутниковые РСА (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, TanDEM-X) — ветер, волнение, загрязнения, течения, внутренние волны

- Общепринятые — брэгговский механизм рассеяния и соответствующая двухмасштабная модель. ОГРАНИЧЕНИЕ — при этом не учитывается нелинейность волн, в частности, наличие вынужденных (“связанных”) волн - гармоник гравитационно-капиллярных волн, обрушений и микрообрушений, что ведет к появлению неполяризованной компоненты РЛ сигнала, отличию РЛ доплеровских сдвигов от линейной брэгговской модели и пр.

- Небольшие скорости ветра – нет сильных обрушений, но гравитационно-капиллярные волн см-дм-длин (ГКВ) ***сильно нелинейны***: нелинейные структуры на профиле ГКВ - паразитная капиллярная рябь (ПКР) на склонах и “валы” (bulge-toe – BT структуры) на гребнях ГКВ. Длина ПКР < 6-7 мм , что отвечает брэгговским волнам в Ка- диапазоне. В X-диапазоне ПКР нерезонансна, но рассеяние имеет место и резко растёт с амплитудой ГКВ (Gade et al., 1998)

Цель и новизна работы

- **Цель:** исследовать характеристики РЛ сигнала X-диапазона при рассеянии на квазипериодических ГКВ см-дм-диапазона (угол падения 57°) и выяснить, какие структуры на профиле волны его определяют

1) Две поляризации

Соосные VV и HH: позволяют отделить брэгговскую компоненту рассеяния от неполяризованной

2) Чистая вода и плёнка ПАВ

Плёнка подавляет ПКР, но слабо влияет на ВТ-структуры — это проверка роли ВТ в рассеянии

3) Доплеровские спектры

Скорости рассеивателей (по доплеровскому сдвигу) сравниваются с фазовыми скоростями несущих ГКВ

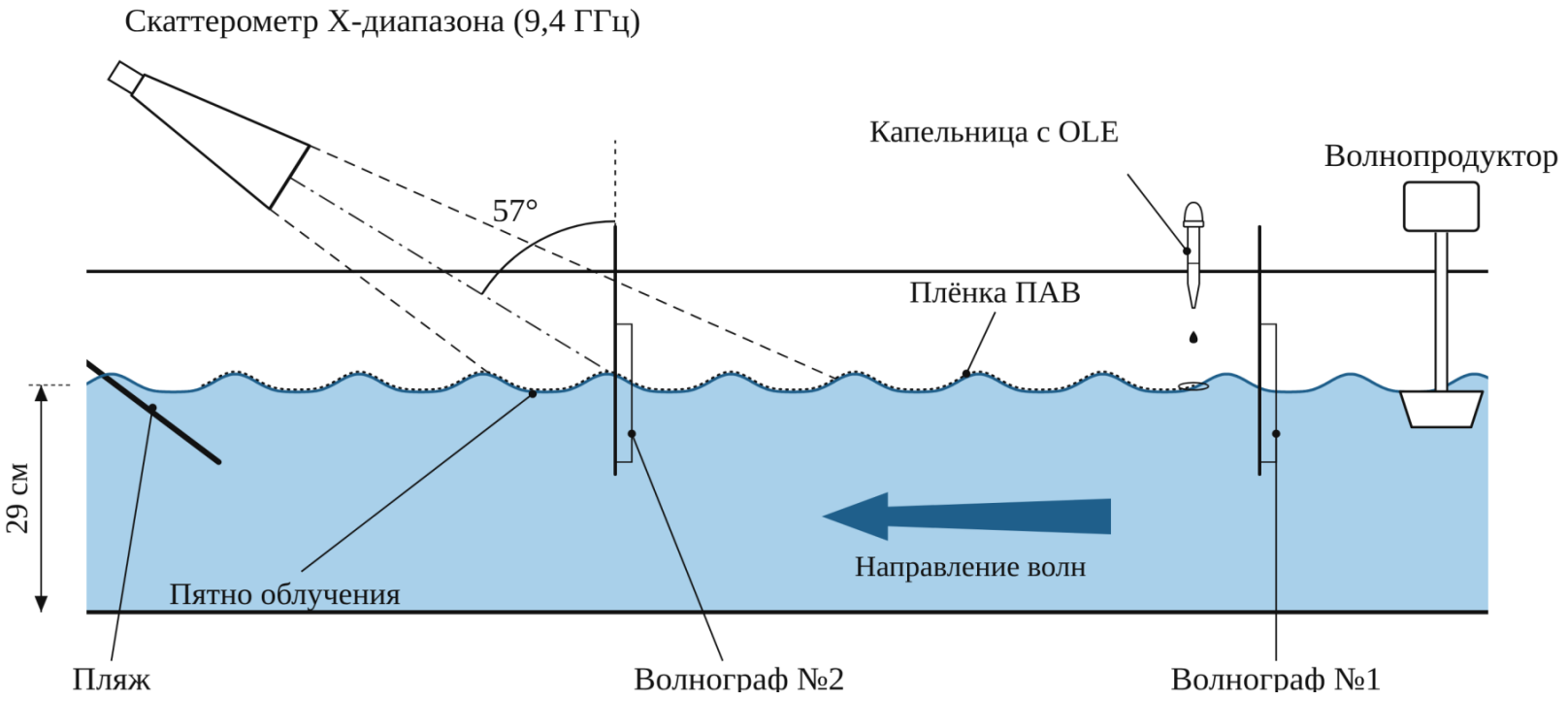
Эксперимент

Овальный ветро-волновой бассейн ИПФ РАН



Эксперимент

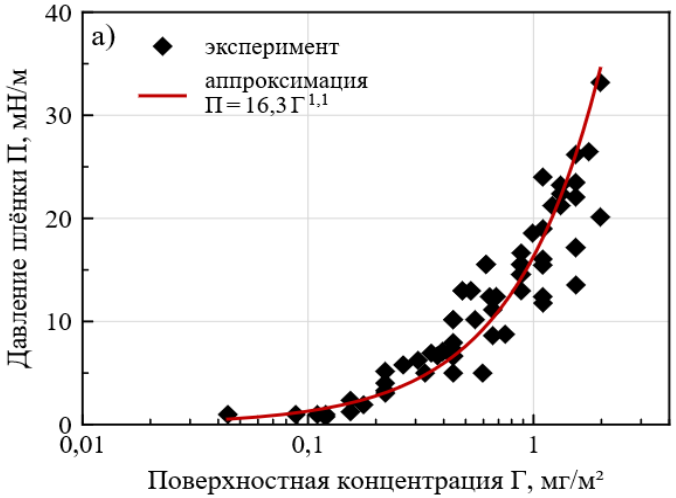
Ветроволновой бассейн (схема установки)

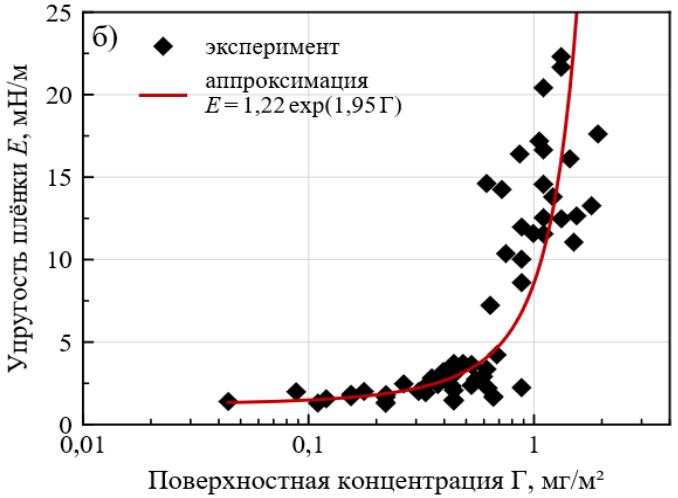


Когерентный доплеровский скаттерометр **X-диапазона (9,4 ГГц)**. Смена поляризации (VV/HH) осуществлялась при помощи поворота прибора на 90º

θ = 57°; ***ГКВ 3; 3,5 и 4 Гц; ka = 0,1-0,35.*** *Волнограф №2 на время измерений РЛ рассеяния убирался*

Плёнки OLE: измерялось затухание ГКВ и восстанавливались упругость и поверхностное натяжение

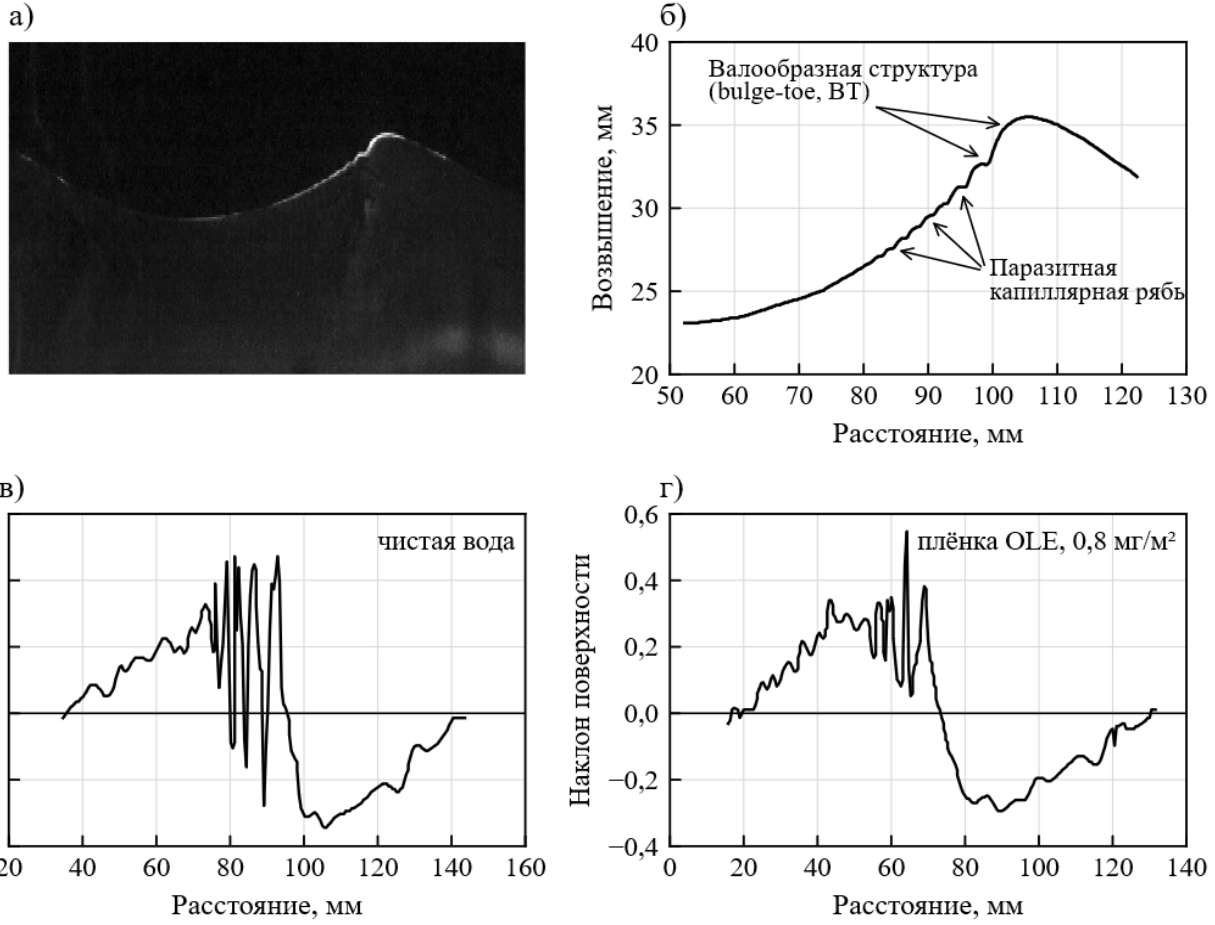




Частота нанесения капель, $с^{-1}$	**0 (без OLE)**	**0,5**	**0,75**	**1**	**1,25**
Давление пленки, мН/м	8	14	14	15	15
Упругость, мН/м	4	8	9	11	11
Концентрация, мг/м² (по давлению / по упругости)	0,5	0,9/0,9	0,9/1	0,9/1,1	0,9/1,1

*Результаты – **профили крутых ГКВ***

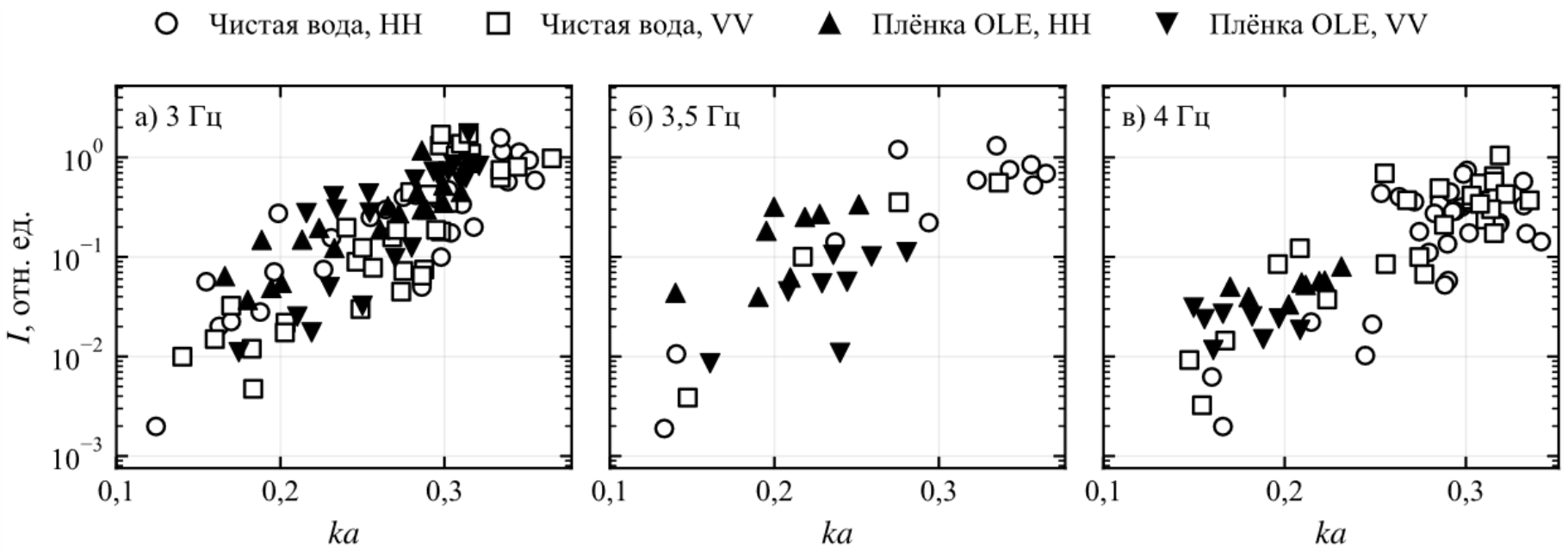
ПКР и ВТ есть, брэгговских волн нет



- При $ka \approx 0{,}15\text{-}0{,}2$ у гребня ГКВ возникают паразитная капиллярная рябь (ПКР) и валообразная ВТ-структура;
- Наибольшие наклоны в окрестности ВТ; плёнка OLE их почти не меняет;
- Волн длиной ~2 см (брэгговских для X-диапазона) на профилях нет (ни на чистой воде, ни с плёнкой);

*Результаты – **интенсивность рассеяния***

Рассеяние не поляризовано и растёт с ka



$PR = I_{VV} / I_{HH} \approx 1$

Брэгговская модель - PR ≈ 20.

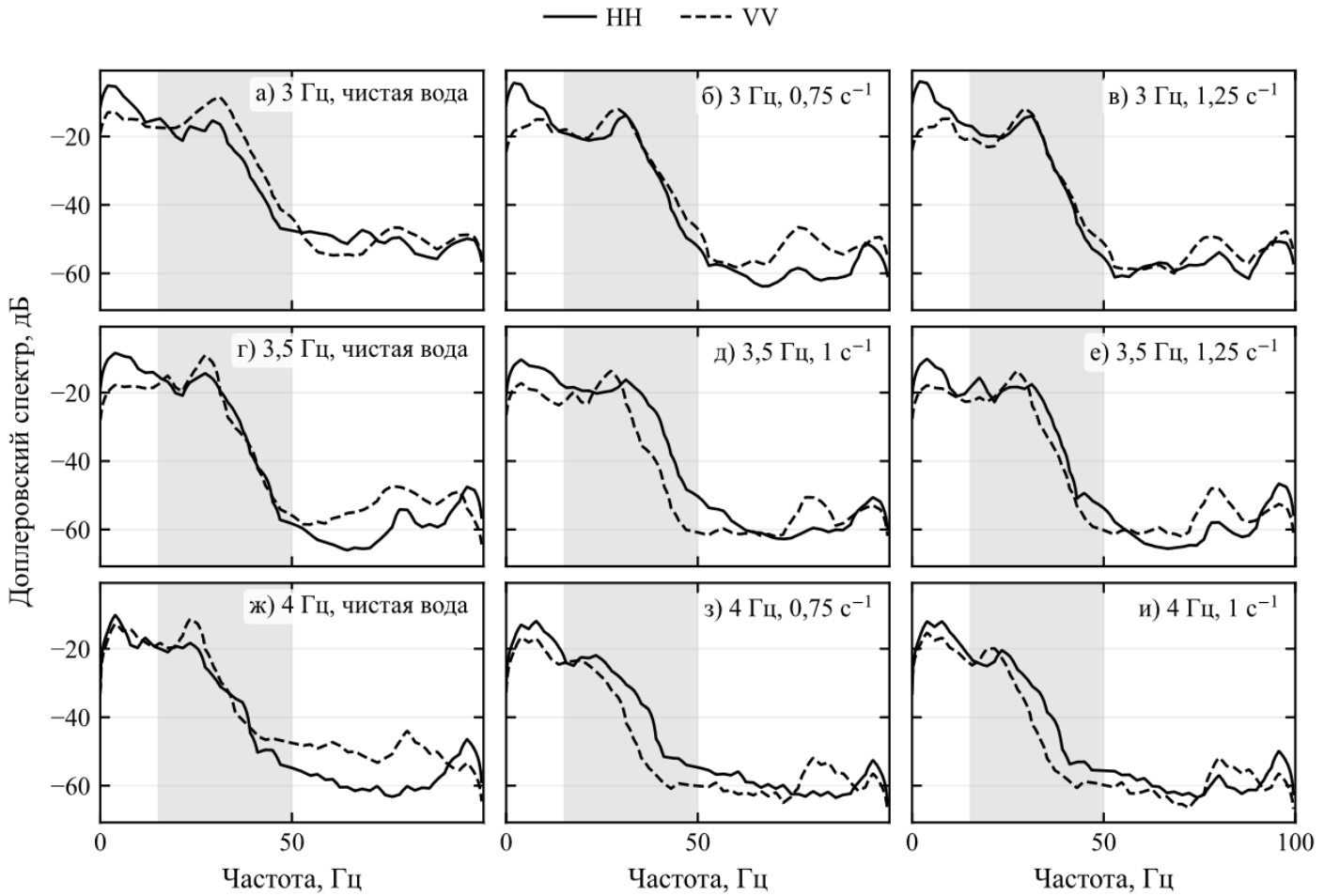
PR ≈ 1 → рассеяние неполяризованное

Рост *I* на ~3 порядка при *ka* = 0,1–0,35

Плёнка OLE интенсивность почти не меняет

Результаты – доплеровские спектры

Пик 20–30 Гц — отклик ВТ-структур

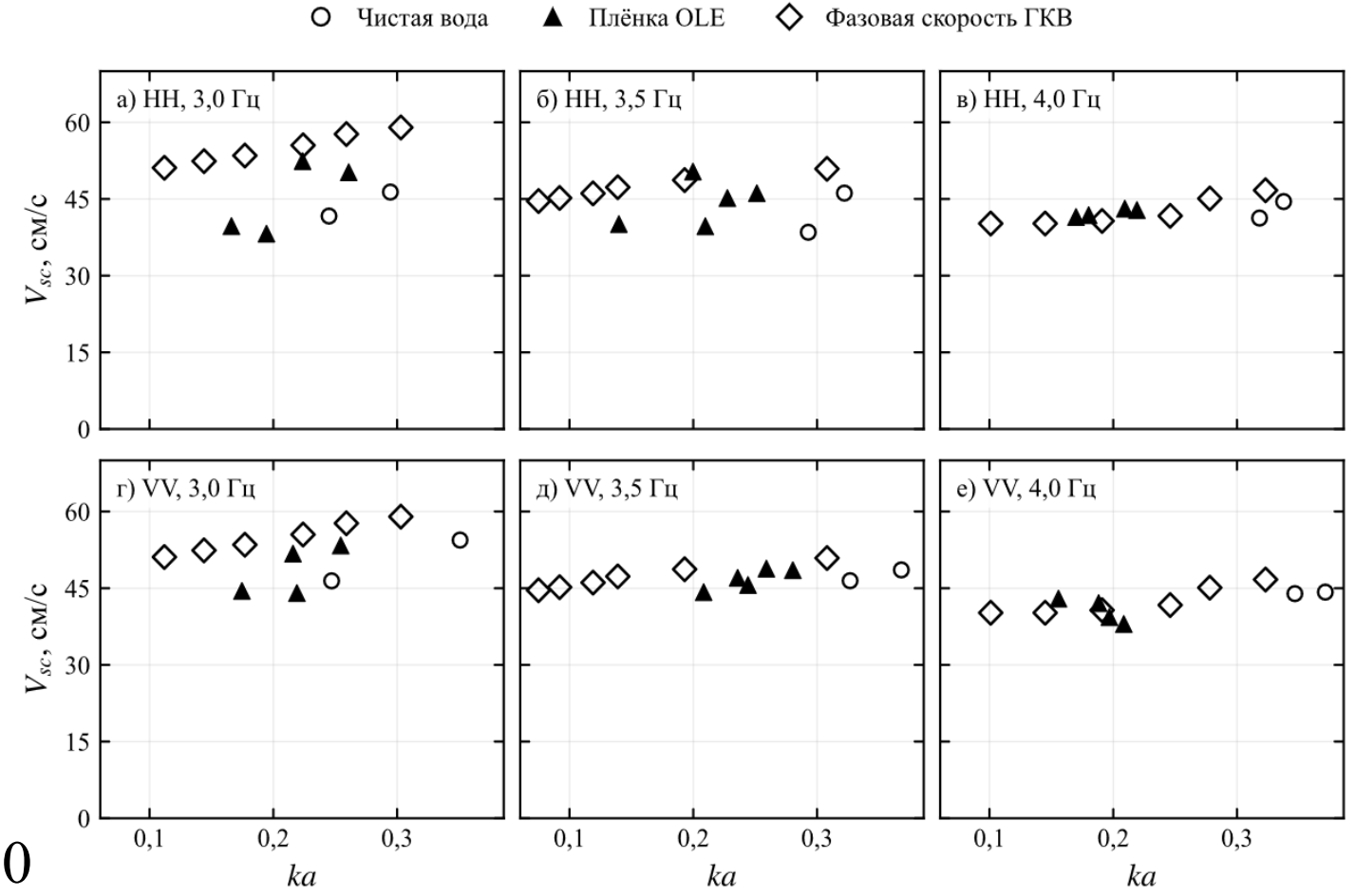


Пик 20-30 Гц появляется при крутизне ГКВ *ka* > 0,15-0,2

Спектры VV и HH близки (PR ≈ 1)

Пик вблизи 0 Гц связан с отражением от металлических частей бассейна

На ГКВ 4 Гц ВТ стационарны (“вморожены” в профиль), на 3 Гц — отстают



$$V_{sc} = \pi F_d / (k_e \sin \theta)$$

- V_{sc} — скорость рассеивателей (ВТ)
- F_d — доплеровский сдвиг (*центр тяжести спектра 15-50 Гц*)
- K_e — волновое число электромагнитной волны
- θ — угол падения (57°)
- **4 Гц:** V_{sc} ≈ фазовой скорости ГКВ
- **3 и 3,5 Гц:** V_{sc} ниже из-за нестационарности ВТ

Выводы

1) Интенсивность рассеяния X-диапазона резко растёт с крутизной ГКВ начиная с *ka* ≈ 0,15-0,2; интенсивности на VV и HH близки, что свидетельствует о неполяризованном рассеянии;
2) Плёнка ПАВ малой концентрации практически не влияет ВТ структуры и соответственно на интенсивность рассеяния при той же крутизне ГКВ;
3) Доплеровский пик ~ 25 Гц: скорости рассеивателей совпадают с фазовой скоростью ГКВ 4 Гц и ниже для 3 и 3,5 Гц из-за нестационарности ВТ-структур;
4) Рассеяние X-диапазона определяется ВТ-структурами, зависящими в основном от крутизны ГКВ, в отличие от Ka-диапазона, где важны и ПКР (брэгговская компонента), и ВТ.

Работа выполнена при поддержке РНФ (Проект № 25-77-20016), измерения и анализ характеристик пленок ПАВ проводились в рамках Госзадания ИПФ РАН FFUF-2024-0033

Спасибо за внимание!