

**Определение методами СВЧ  
радиолокации и  
радиотеплолокации утечек газа  
из подводных трубопроводов**

**М.Г. Булатов, Ю.А. Кравцов, М.Д. Раев,  
В.Г. Пунгин, К.Д. Сабинин, Е.И. Скворцов.**

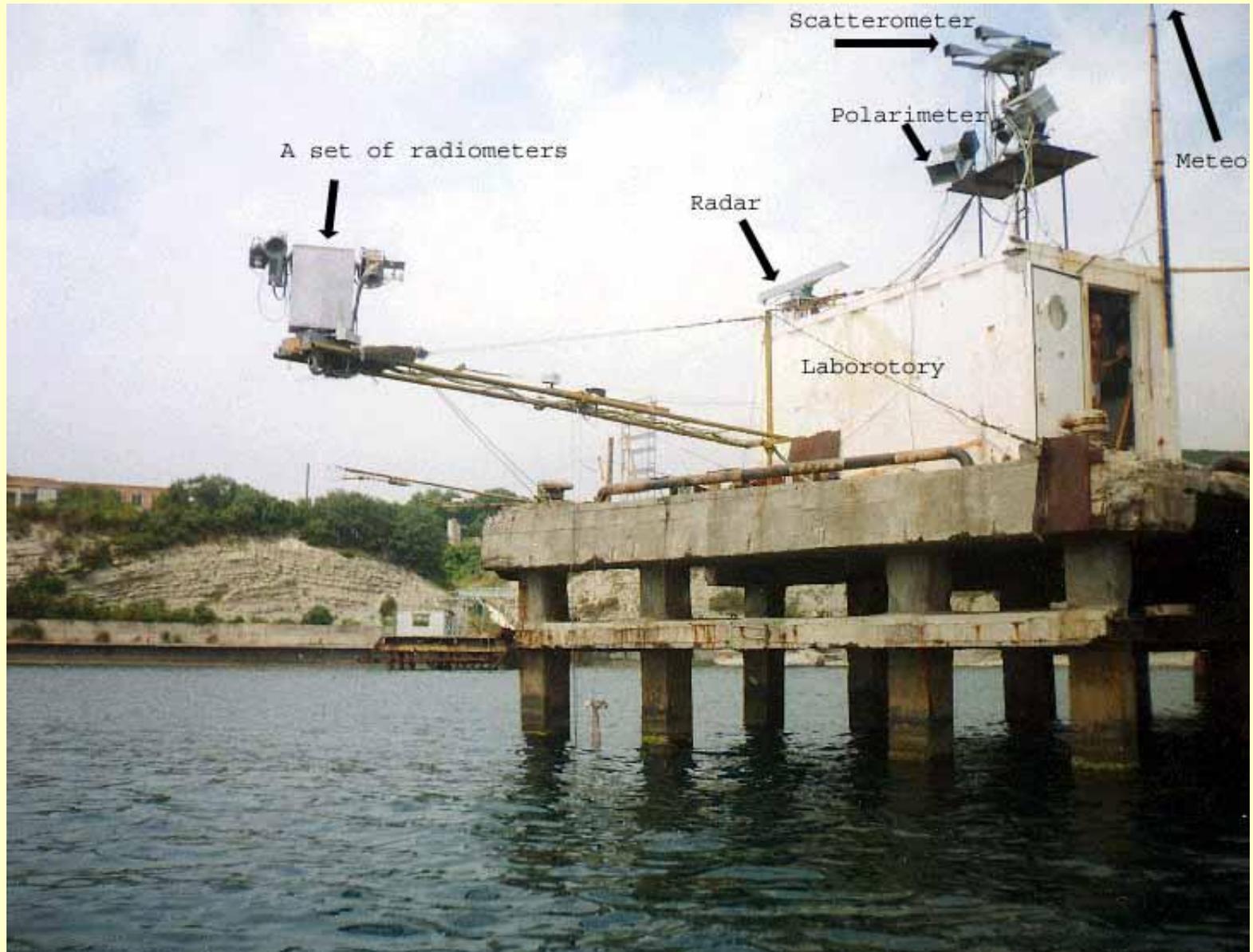
*117977, Москва, Профсоюзная 84/32, ИКИ РАН*

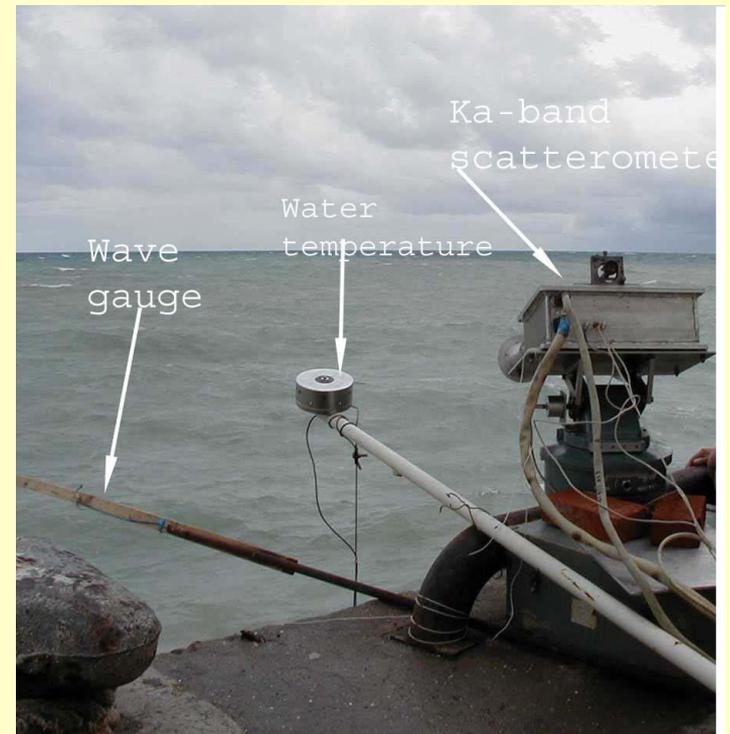
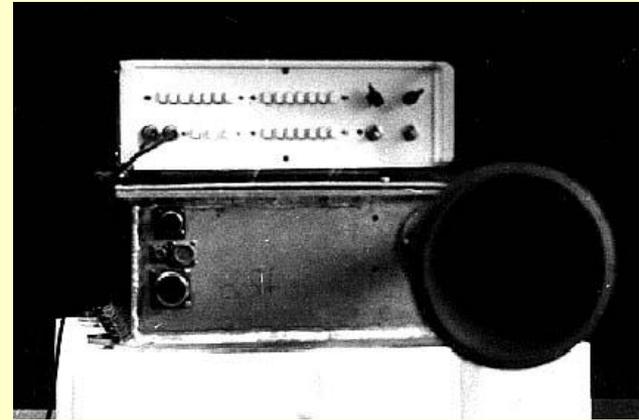
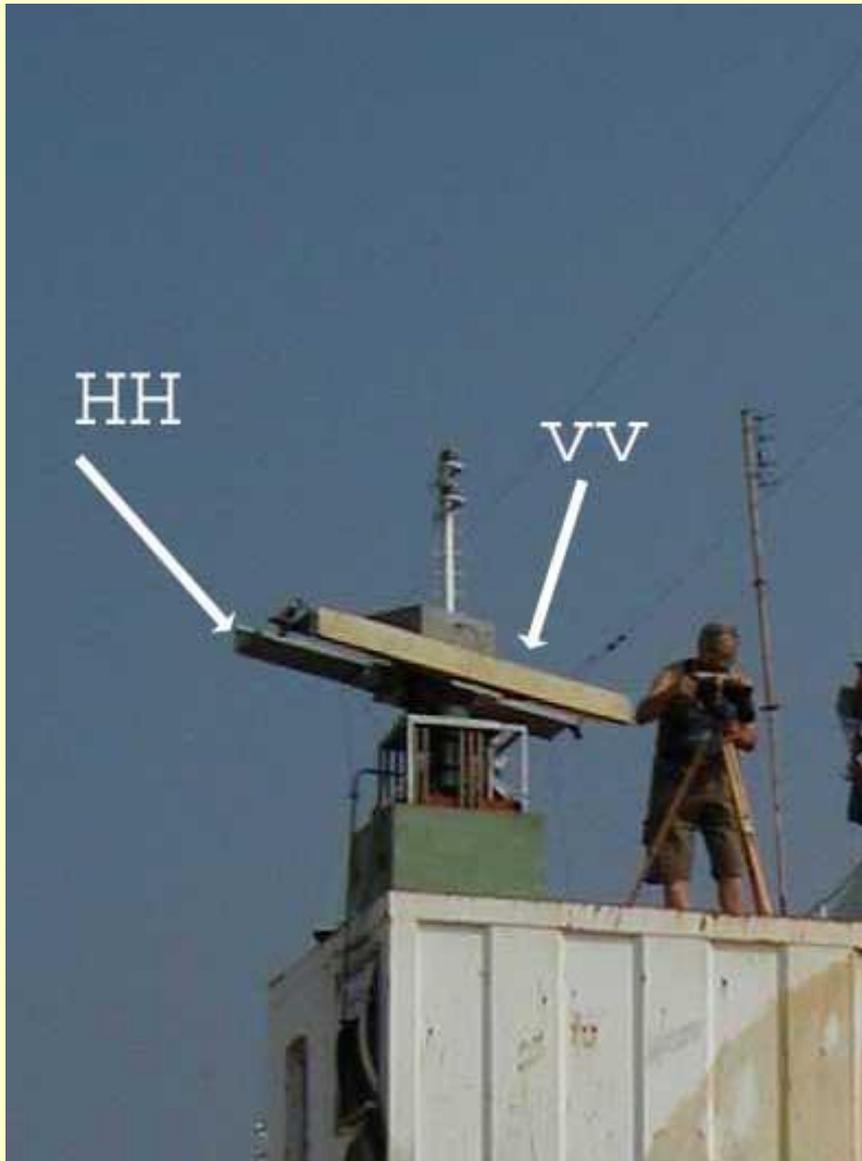
*Тел. 333-35-33, Fax 333-10-56, E-mail: bulatov@iki.rssi.ru*

# Цели работы

- получение новых экспериментальных данных о физических и статистических характеристиках морской поверхности, возмущаемой потоком газовых пузырей.
- разработка на основе этих данных электрогидродинамической модели рассеяния и излучения волн в СВЧ диапазоне.
- разработка методики микроволнового зондирования, позволяющей методами активной и пассивной радиолокации выделять на фоне взволнованной морской поверхности области возмущения, вызванные выходом потока.

# Комплекс радиометрической и радиолокационной аппаратуры

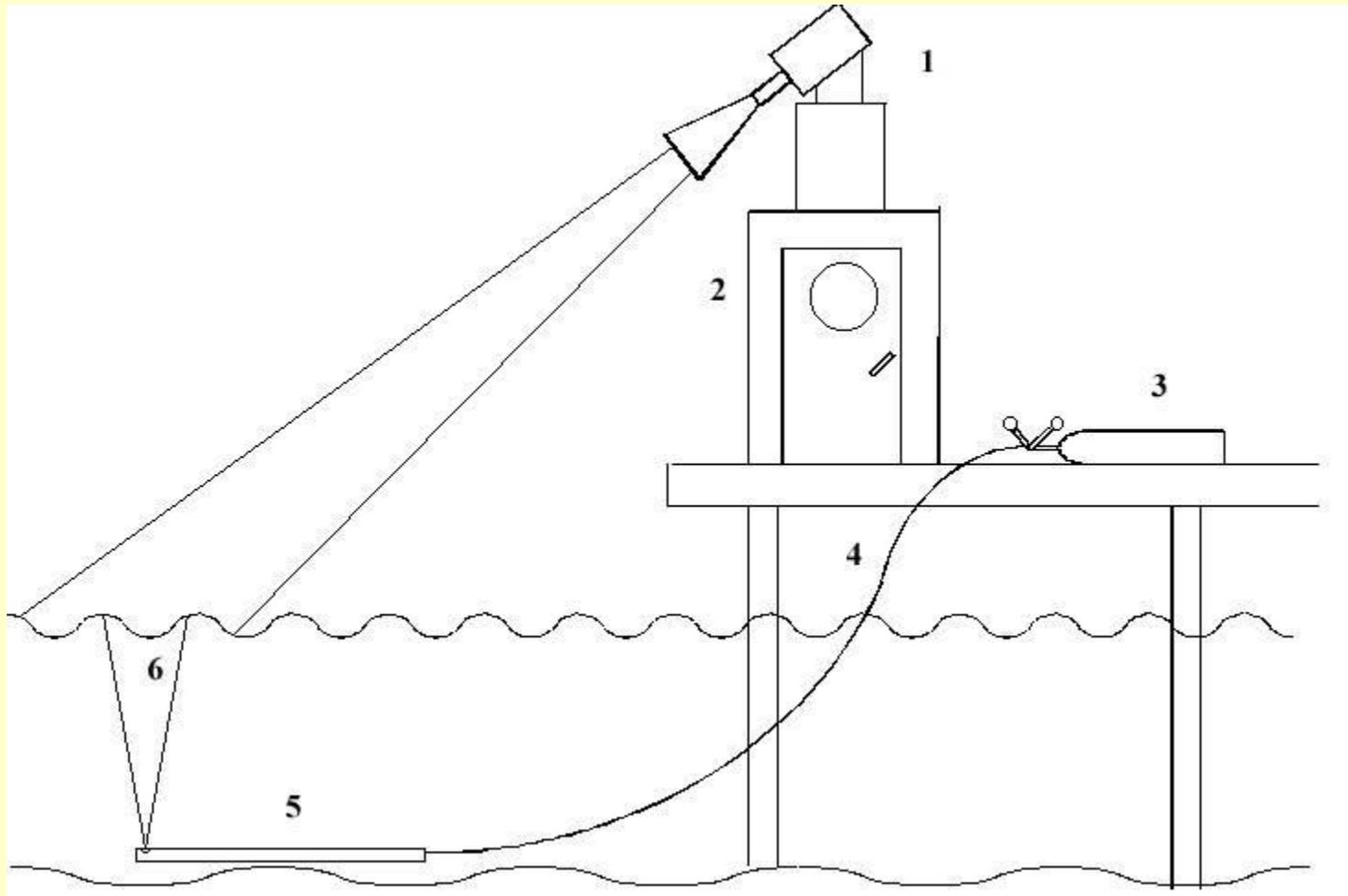




**Таблица 1. Основные характеристики аппаратуры**

Параметры	Радиометры		РЛС	Скаттерометр
Рабочая частота, ГГц	19,5	37,5	9,5	38,7
Ширина диаграммы направленности антенны	10°	12°	1 <sup>0</sup> ×22 <sup>0</sup>	5
Полоса частот, МГц	1500	1000	20	30
Шумовая температура, К	300	700		3000
Чувствительность, дБ/Вт			160	
Мощность излучения (в импульсе), кВт			3,5–4	
Длительность импульса, нс			50, 200	
Скважность			10000	
Мощность излучения (непрерывная), Вт				1
Полоса частот спектрального канала, кГц				0–3,5

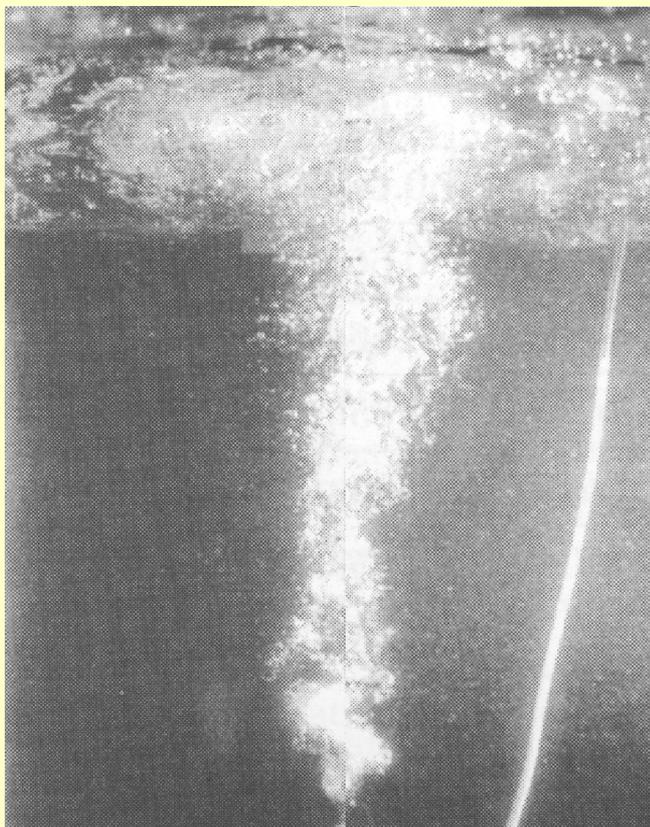
# Схема эксперимента



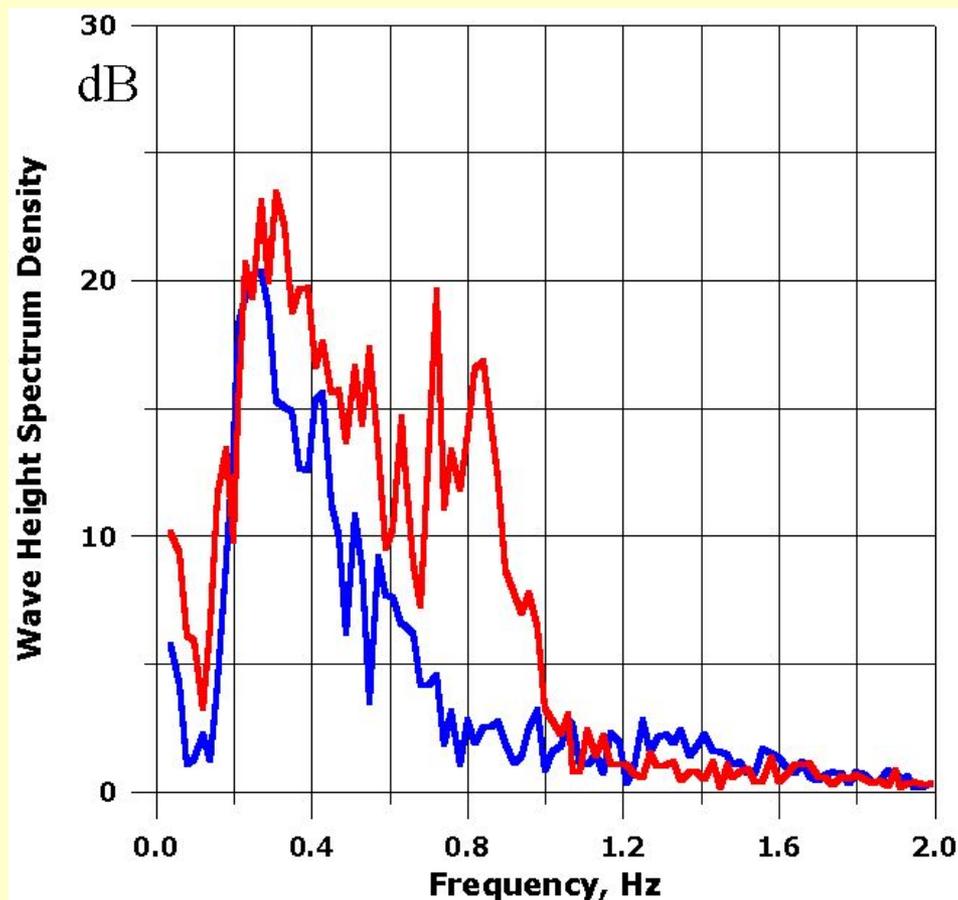
1- СВЧ приборы, 2- контейнерная лаборатория,  
3- газом, 4- шланг, 5- насадка, 6- газовый факел  
баллон с

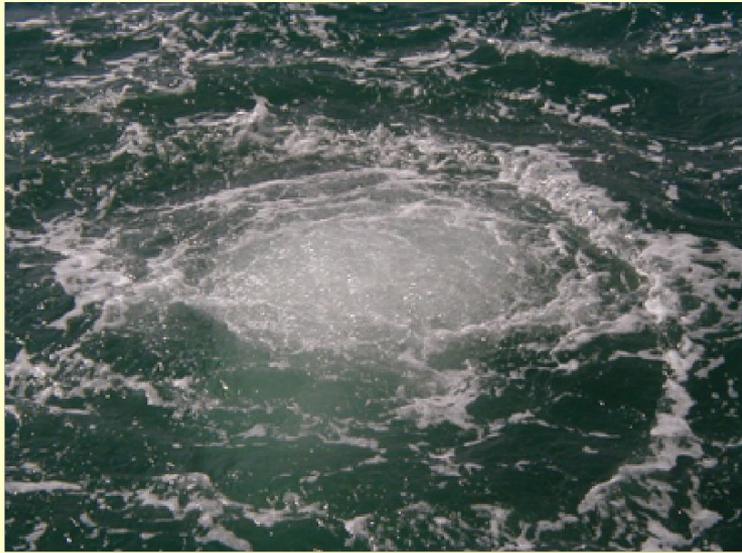
# Подводный газовый факел

(фон, возмущенная поверхность)

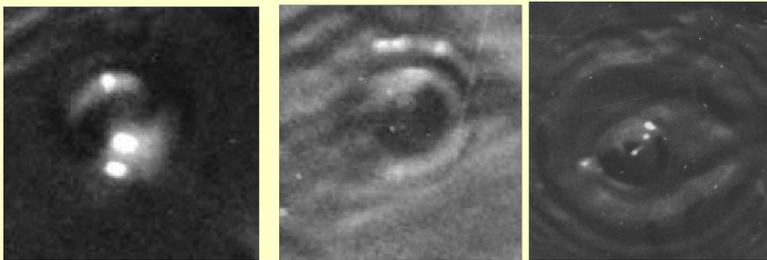


# Спектры морского волнения

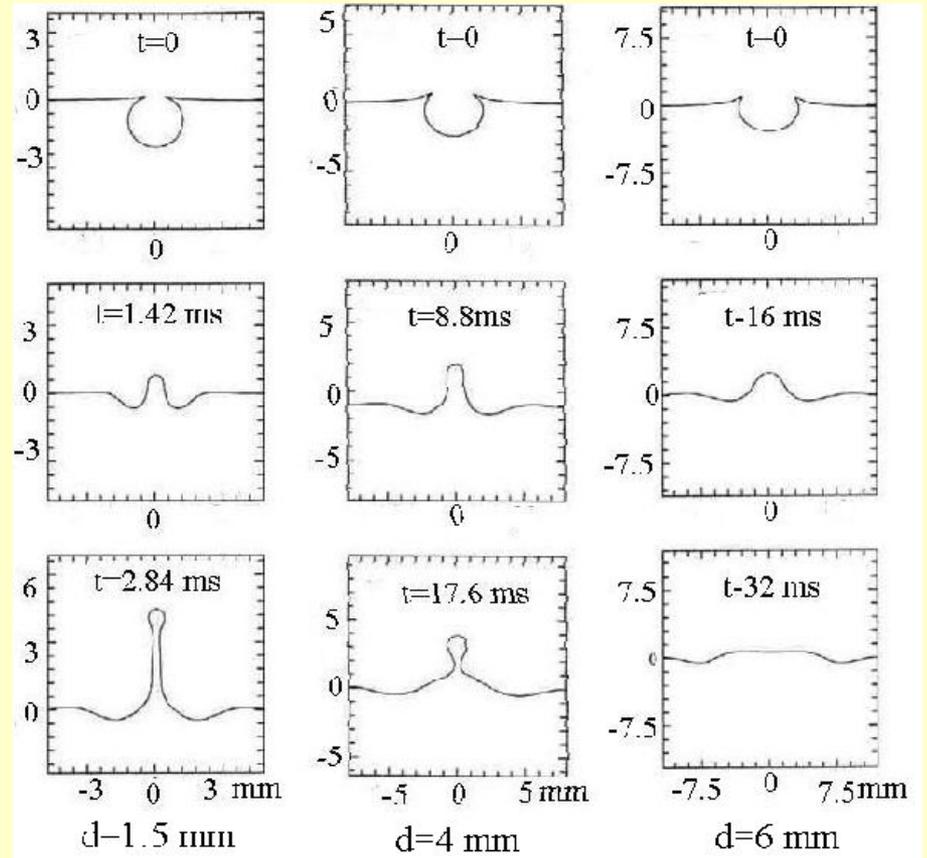




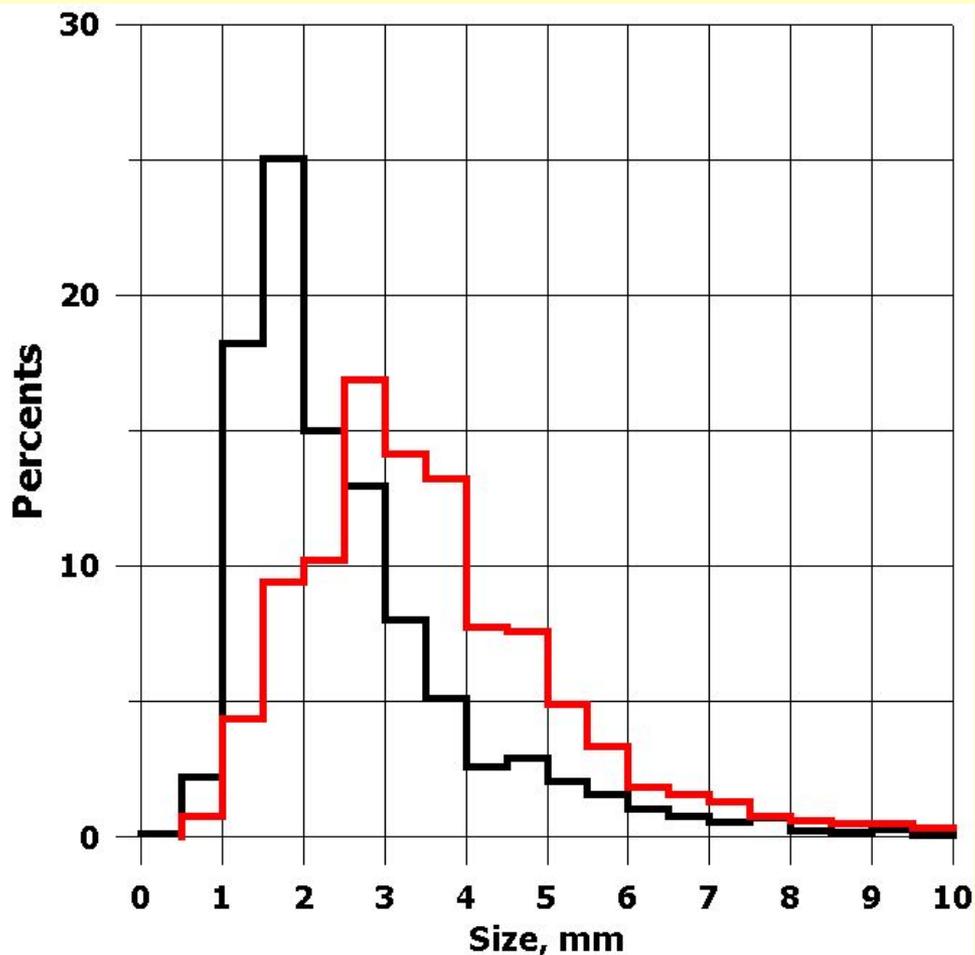
**Морская поверхность, возмущаемая потоком газа (“фонтан“)**



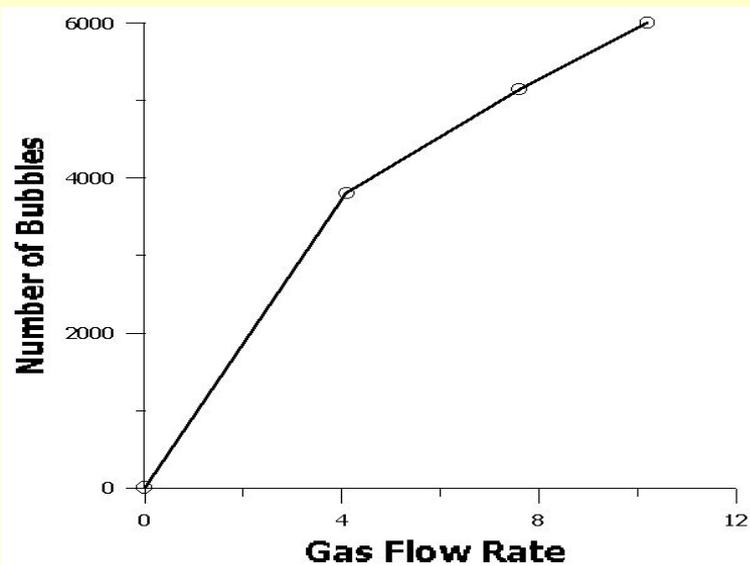
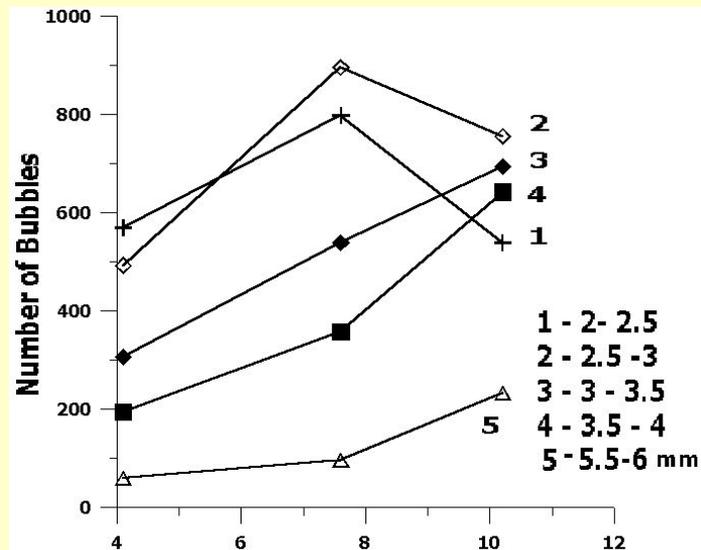
**Взаимодействие с поверхностью пузырьков различных размеров**



(J.M. Boulton-Stone and J.R. Blake,  
*J.Fluid Mech.*, 1993, v.254, 452-66)



Распределения всплывающих пузырей по размерам, полученные для двух значений расхода  
 (4.1  $\text{dm}^3\text{s}^{-1}$ , 10.2  $\text{dm}^3\text{s}^{-1}$ )



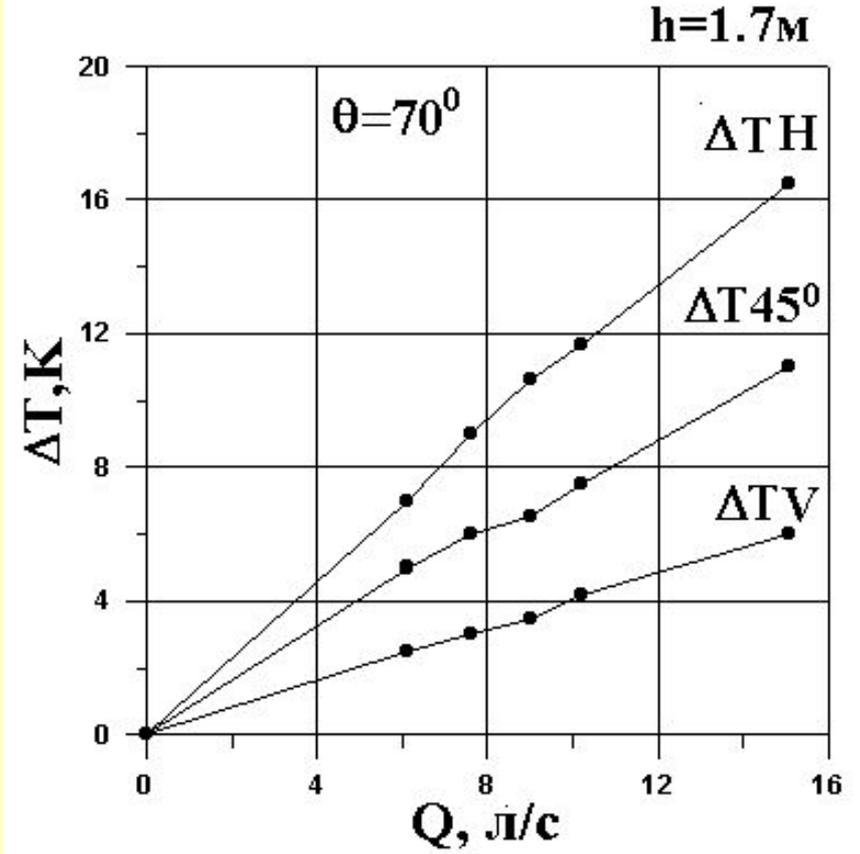
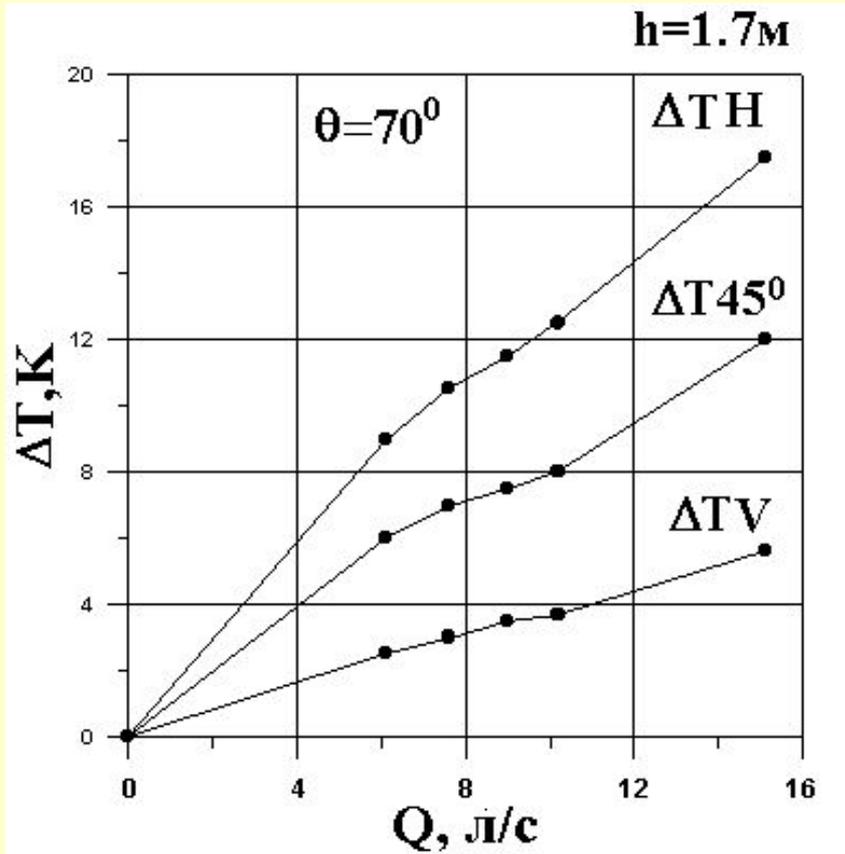
Количество пузырей различных размеров в зависимости от расхода

# Радиометрические измерения

H=1.7 м

0.8 см

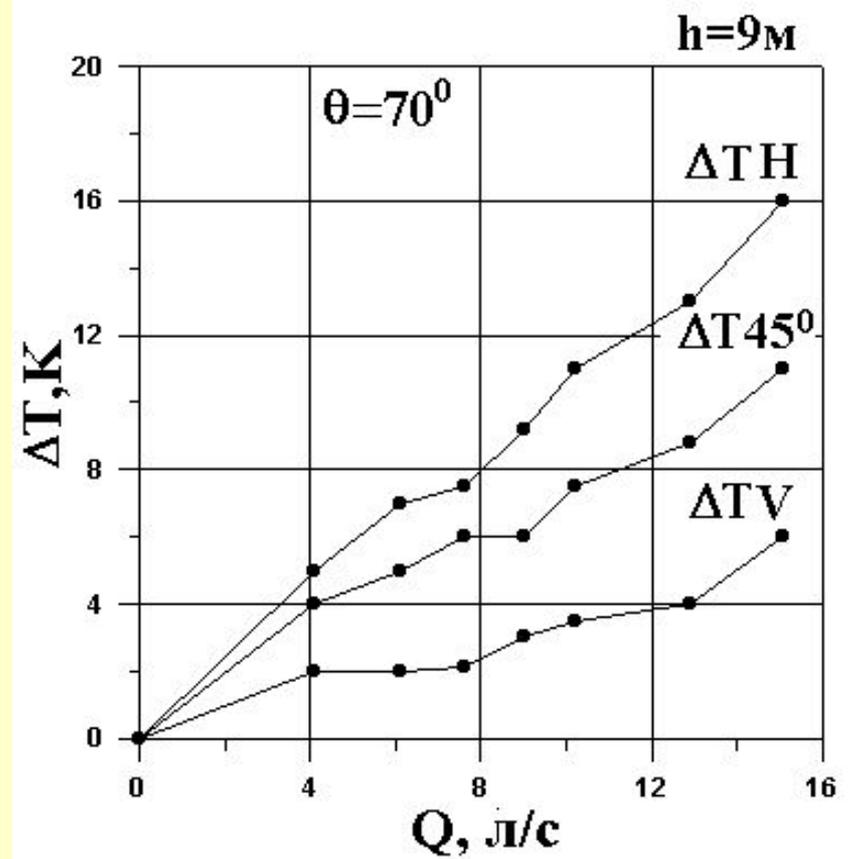
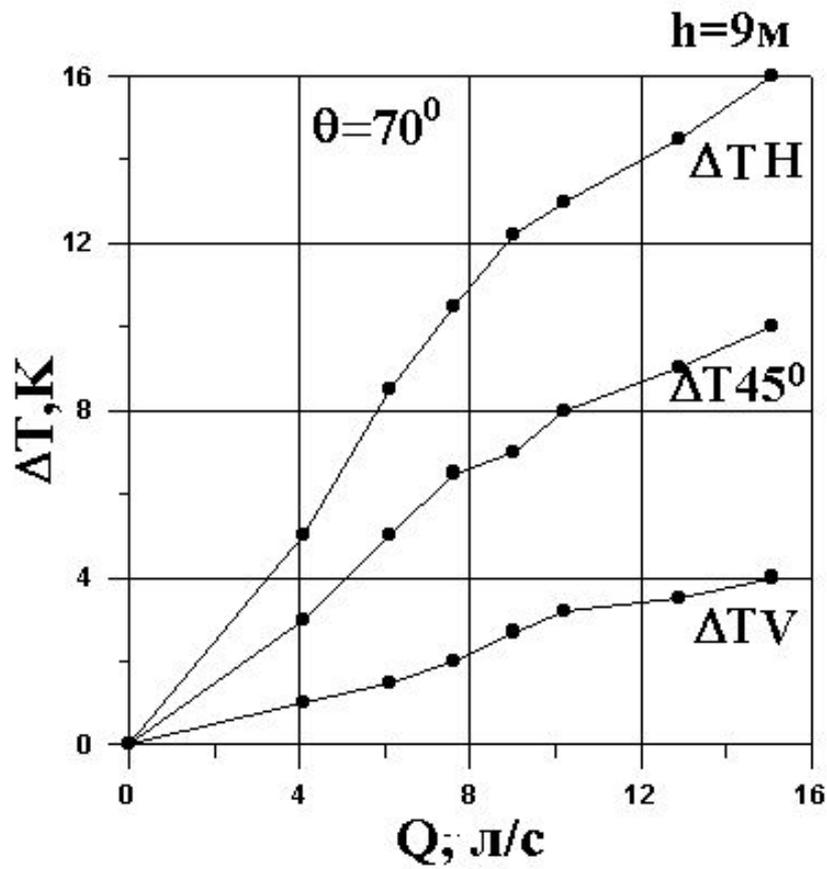
1.5 см



H=9 м

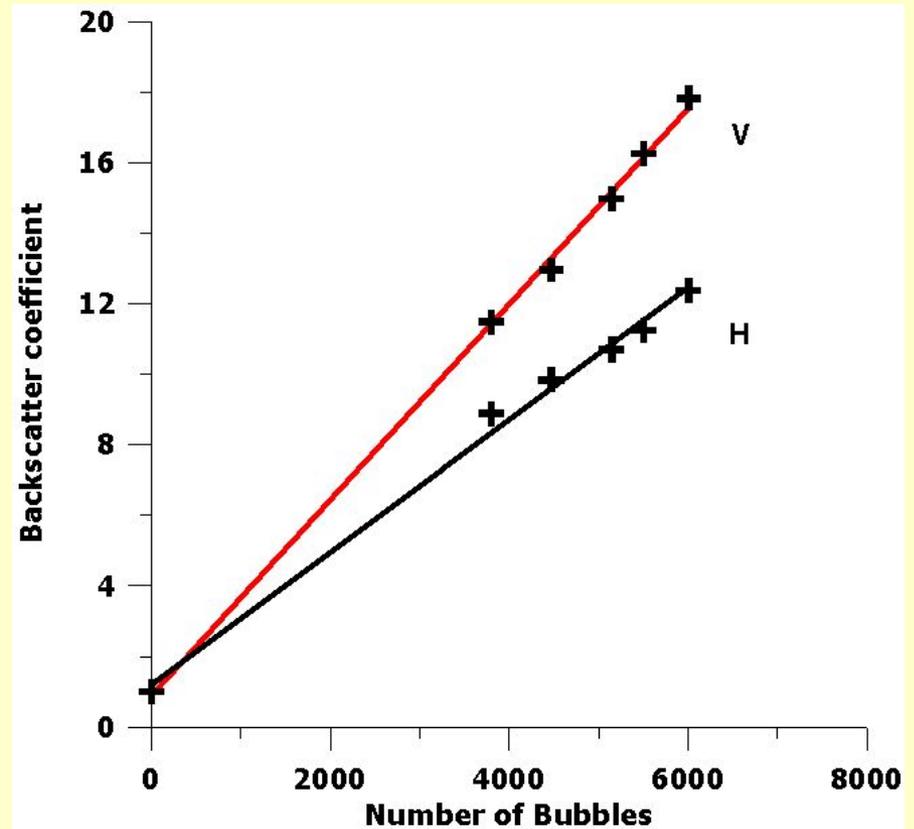
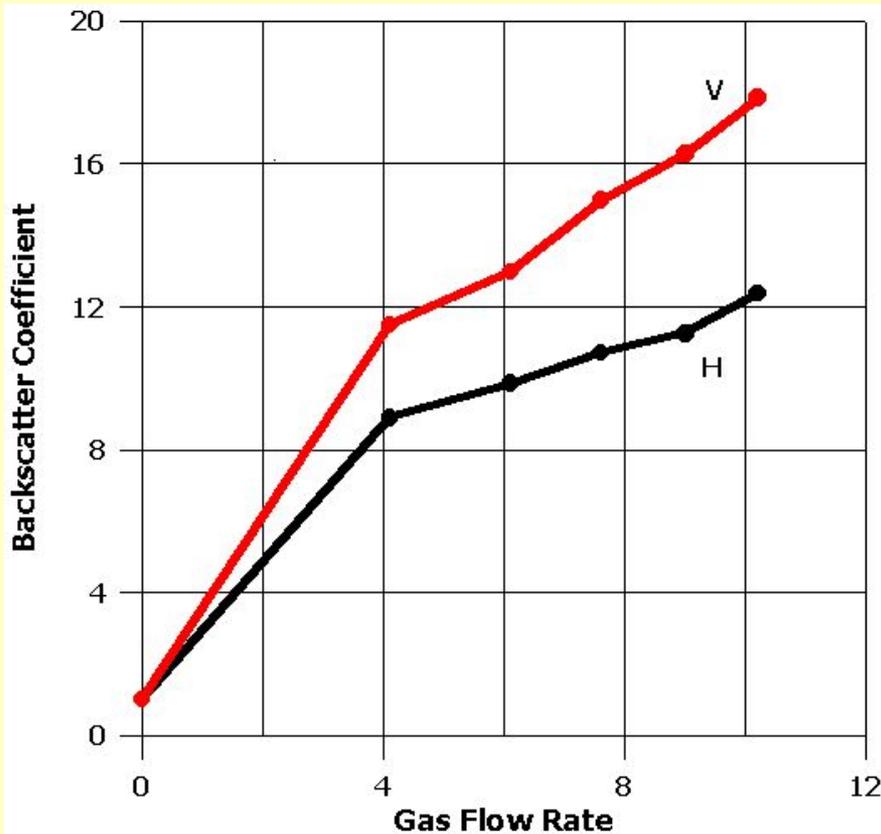
0.8 см

1.5 см

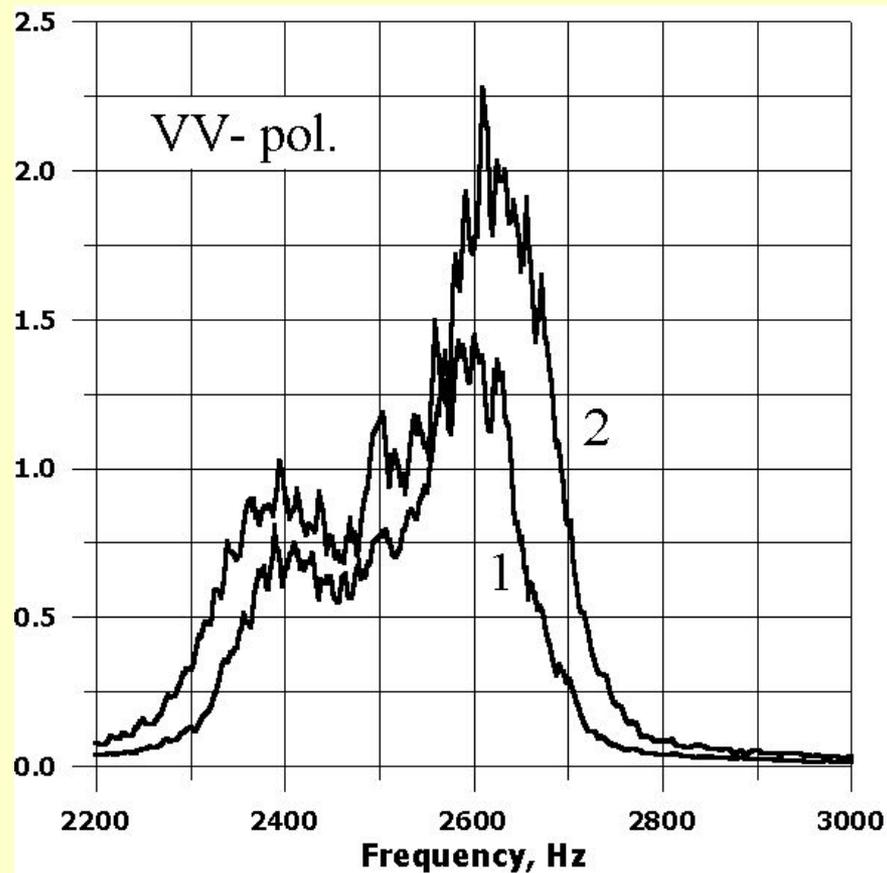
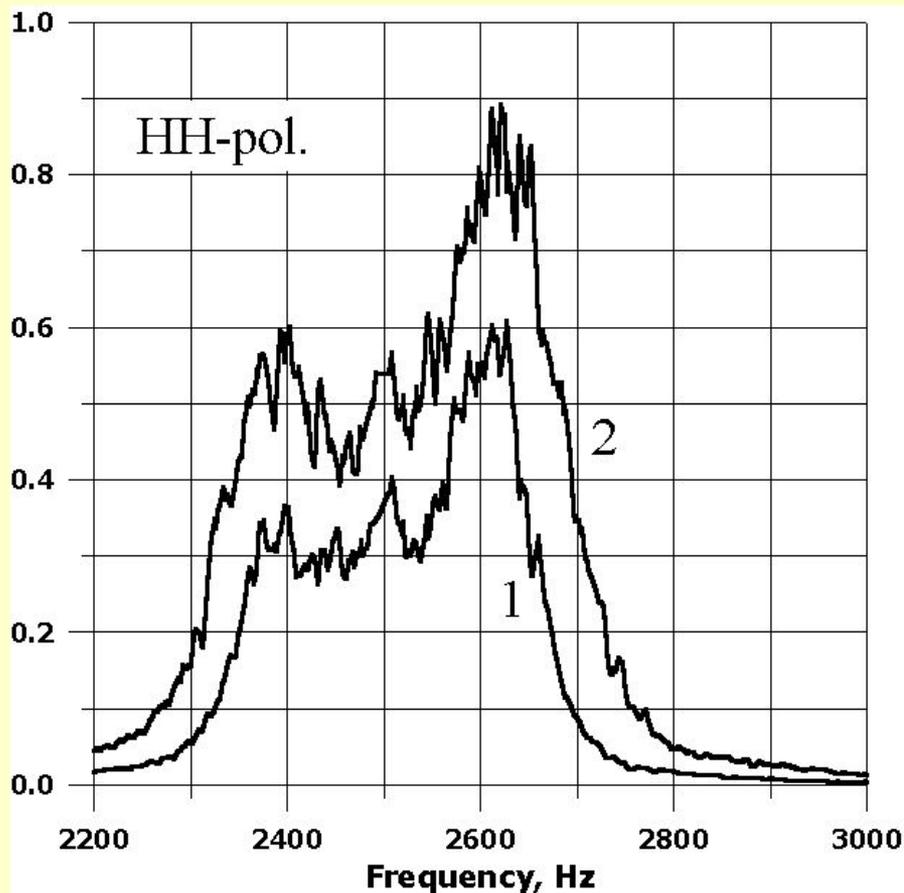


# Скаттерометрические измерения

# Зависимость коэффициента обратного рассеяния от потока ( $\text{dm}^3\text{c}^{-1}$ ) и количества всплывающих пузырей



# Допплеровские спектры, полученные при двух значениях расхода (1 - $4.1 \text{ дм}^3 \text{ с}^{-1}$ , 2 - $10,2 \text{ дм}^3 \text{ с}^{-1}$ )



## Распределение Гаусса

$$\Phi_G(f) = \frac{1}{\Delta f_G \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_G)^2}{\Delta f_G^2}\right]$$

## Распределение Лоренца

$$\Phi_L(f) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta f_L}{(f - f_L)^2 + \Delta f_L^2}$$

**Скорость**

$$V_s = \frac{\lambda_0}{2f \cos \psi},$$

**Время жизни**

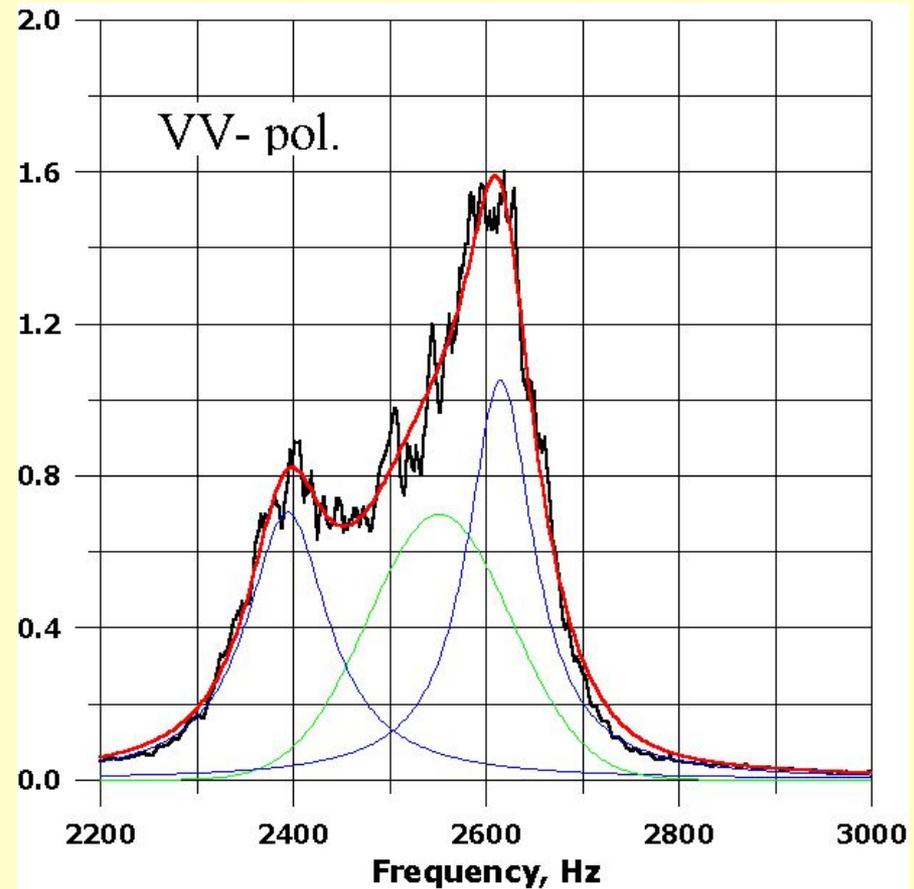
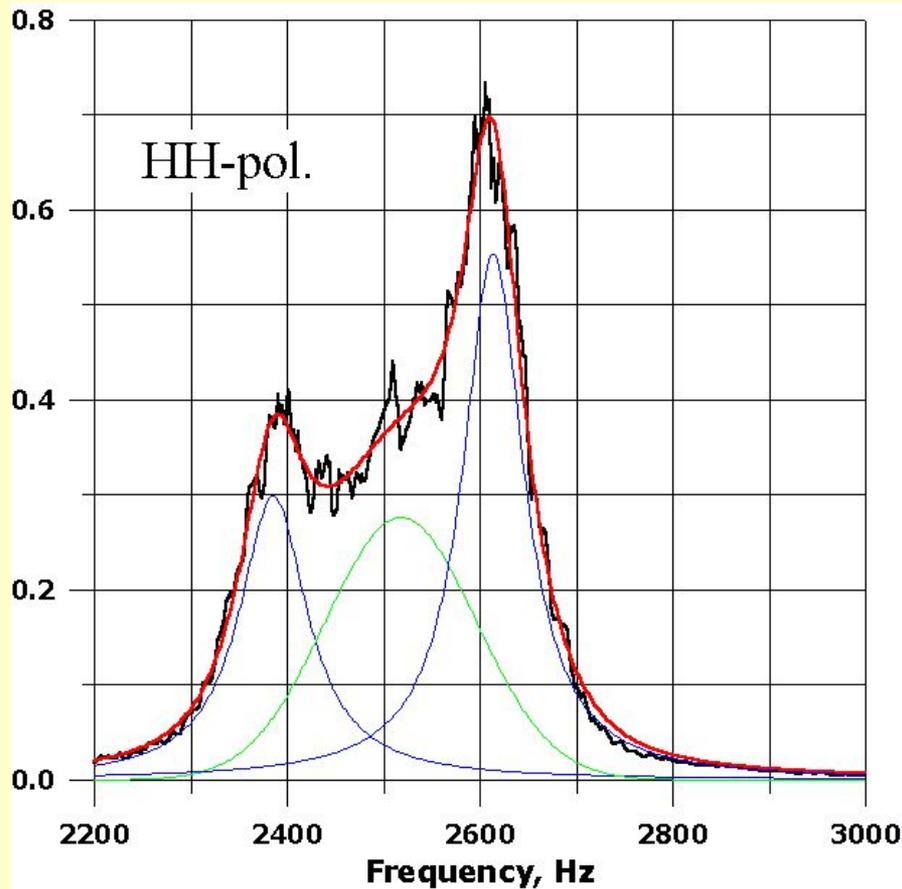
$$\tau = 1 / \Delta f_L$$

где  $\lambda_0$  - длина электромагнитной волны,  $\psi$  - угол зондирования.

## Аппроксимация

$$S(f) = K_G \Phi_G(f) + K^-_L \Phi^-_L(f) + K^+_L \Phi^+_L(f)$$

# Результаты аппроксимации формы спектров двумя функциями Лоренца и одной функцией Гаусса



**Black** – real spectra, **Green** - Gaussian,  
**Blue** – Lorentzian, **Red** – sum

## Сравнение результатов

**А) аппроксимации**

**В) *in situ* измерений**

**Скорость рассеивателей(-)**

**Течение в фонтане**

**48 cm/s**

**Скорость рассеивателей (+)**

**50-60cm/s**

**53 cm/s**

**Время жизни рассеивателя**

**Время распада пузыря**

**(среднее)**

**19-24 ms**

**14-19 ms**

**Высота фонтана (h) и средний период флюктуаций(T)**

**а) аппроксимация Гаусса**

**б) волнограф**

**h=12cm,**

**h=14-16cm**

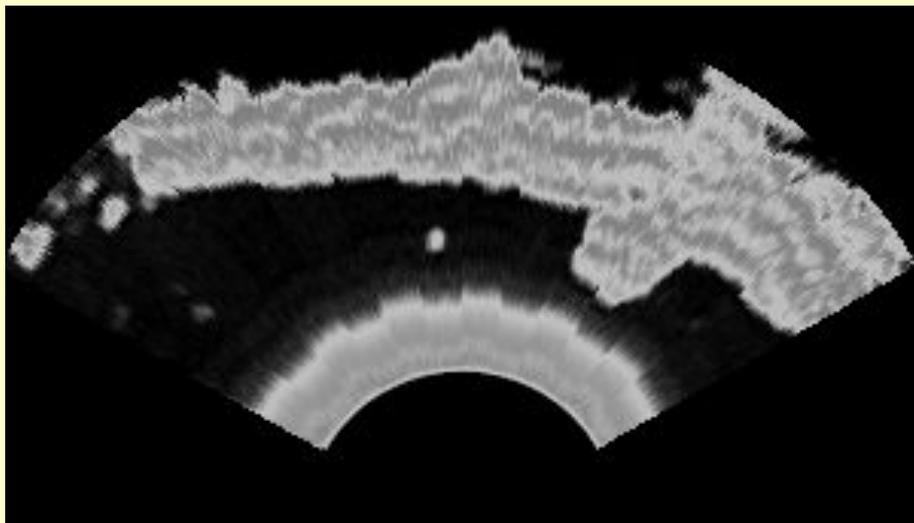
**T=1.3s,**

**T=1.5-1.8s**

# **Радиолокационные измерения**

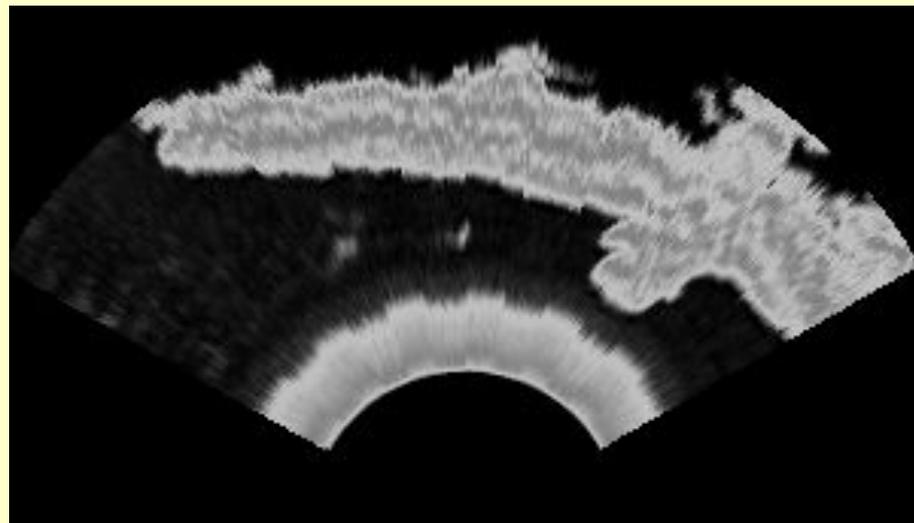
Расход 4 дм<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>

Вертикальная поляризация



Кадр 33, max= 13,42

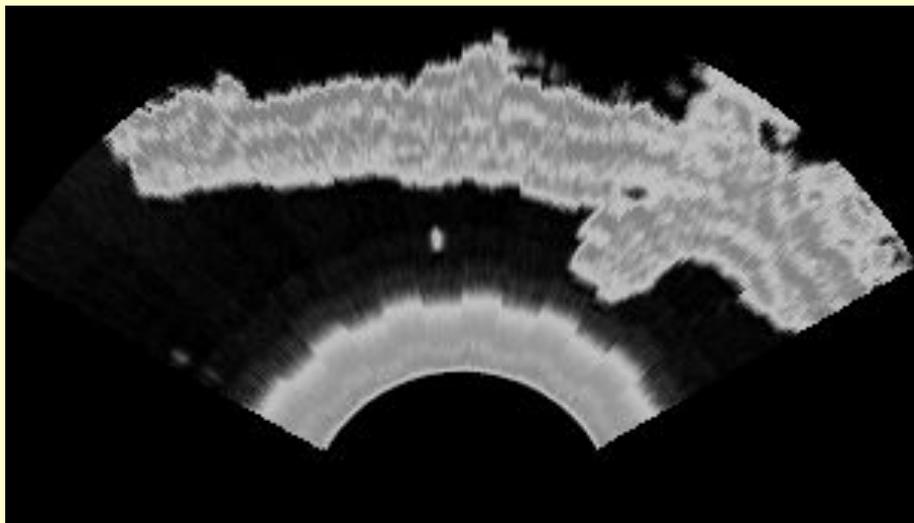
Горизонтальная поляризация



Кадр 194, max = 4,06

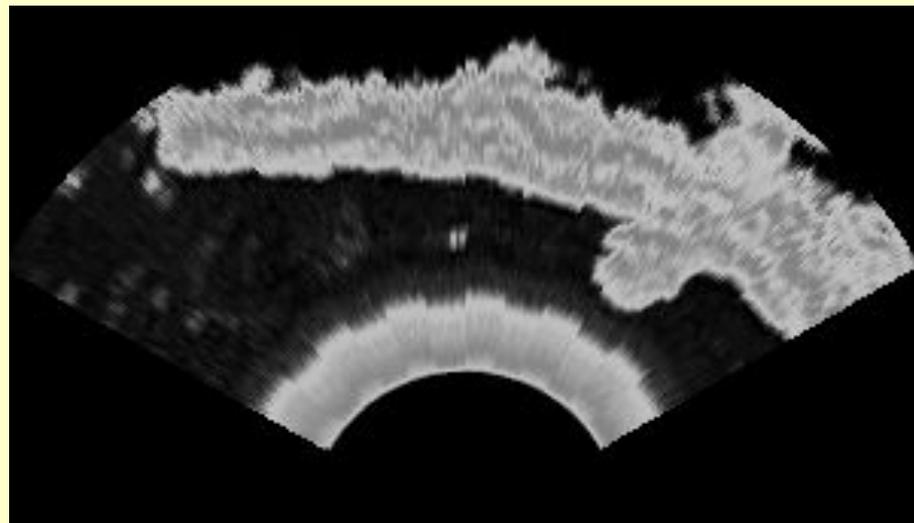
## Расход $10 \text{ дм}^3\text{с}^{-1}$

Вертикальная поляризация



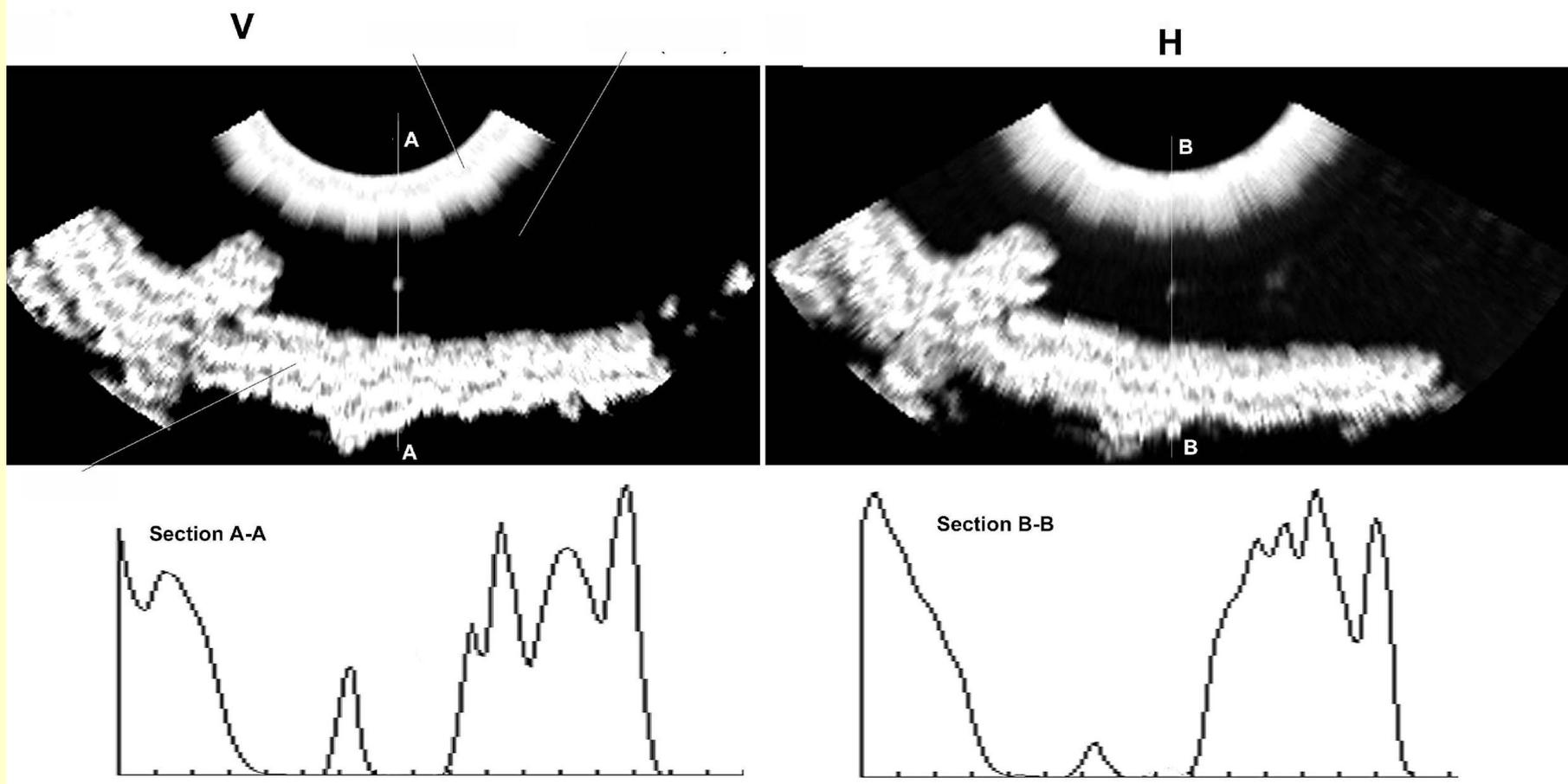
Кадр 69,  $\text{max} = 15,58$

Горизонтальная поляризация



Кадр 232,  $\text{max} = 6,12$

# Радиолокационные изображения поверхностных возмущений, создаваемых выходом газа



# ВЫВОДЫ

- Результаты исследования показывают, что микроволновые методы могут быть эффективно использованы для определения подводных потоков газовых пузырей.
- Полученные данные позволяют установить связь радиоярких контрастов и мощности обратного рассеяния с расходом газа и статистическими параметрами ансамбля газовых пузырей.
- Установлено, что на поверхности, возмущенной потоком газа, существуют два типа рассеивателей электромагнитных волн. Эта особенность спектра рассеянного сигнала может быть использована для идентификации области выхода газа на фоне взволнованной морской поверхности.

**Работа выполнена при поддержке Российского Фонда  
Фундаментальных исследований (Гранты № 02-02-16012 и  
№ 01-02-16174).**