

Экспериментальное исследование рассеяния микроволнового излучения на ветровых волнах

Русаков Н.С., Поплавский Е.И., Байдаков Г.А., Троицкая Ю.И., Вдовин М.И., Ермакова О.С.

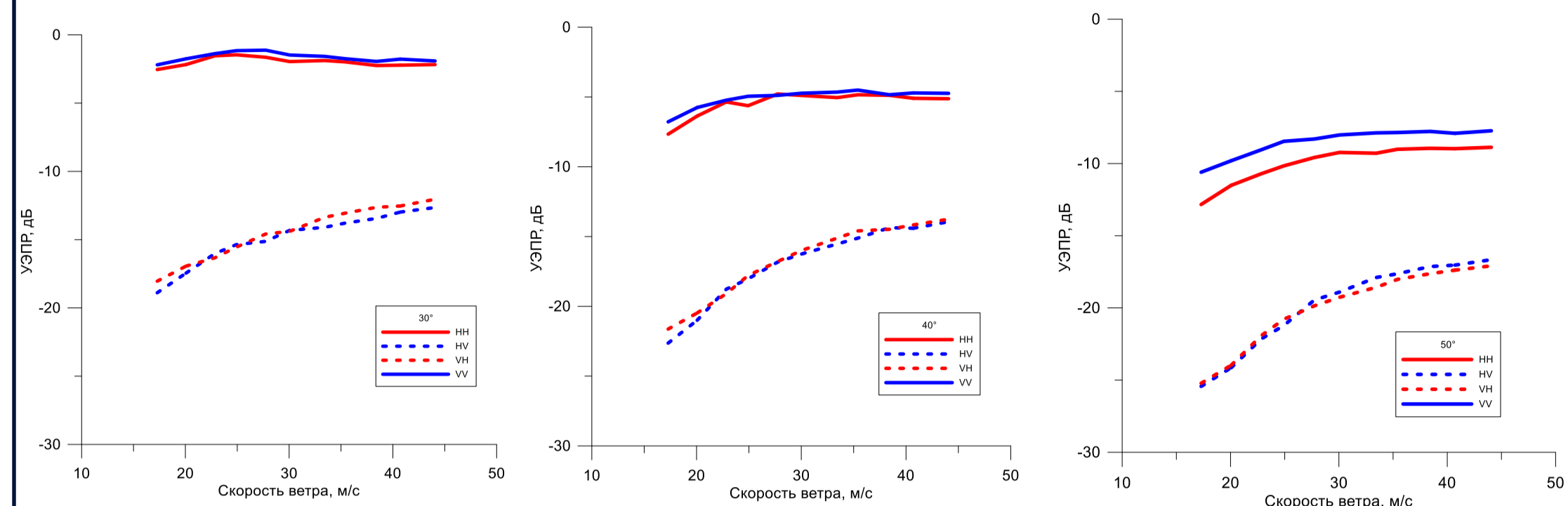
Институт прикладной физики РАН
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
nikitarusakov@ipfran.ru

Одним из основных инструментов для восстановления параметров приводного слоя является дистанционное зондирование. В настоящее время, однако, не существует алгоритмов, позволяющих восстанавливать параметры приводного слоя атмосферы при ураганной скорости ветра. Это связано с тем, что зависимость мощности рассеянного сигнала при ко-поляризованном режиме приема и передачи испытывает насыщение при скоростях ветра выше 25 м/с. Для достоверного восстановления параметров приводного пограничного слоя из данных измерений инструментов дистанционного зондирования, необходимо создание моделей качественно и количественно описывающих характеристики рассеянного сигнала. Данные натурных измерений нуждаются в верификации и уточнении, в связи с чем наиболее перспективным подходом является исследование особенностей рассеяния радиолокационного сигнала в рамках лабораторного эксперимента в контролируемых условиях.

Эксперименты проводились на реконструированном Ветро-волновом канале (ВВК) ИПФ РАН в диапазоне скоростей ветра 11-50 м/с. Характеристики поверхностных волн измерялись с помощью системы из трех струнных волнографов, в то время как параметры воздушного потока были восстановлены из измерений трубкой Пито. Микроволновые измерения проводились с помощью когерентного доплеровского скаттерометра X-диапазона с длиной волны 3,2 см с последовательным приемом линейных поляризаций и разделителем ортогональных поляризаций (ОМТ) с разделением поляризаций более чем 40 дБ. Зондирование водной поверхности производилось при углах 30, 40 и 50 градусов, которые являются типичными для спутникового мониторинга.

По данным эксперимента были построены зависимости УЭПР водной поверхности от скорости ветра и проведено сравнение с данными натурных измерений. Установлено, что лабораторные данные совпадают с натурными с некоторым смещением. На основе анализа доплеровских спектров сигнала было обнаружено, что скорости рассеивателей превышают фазовые скорости волн.

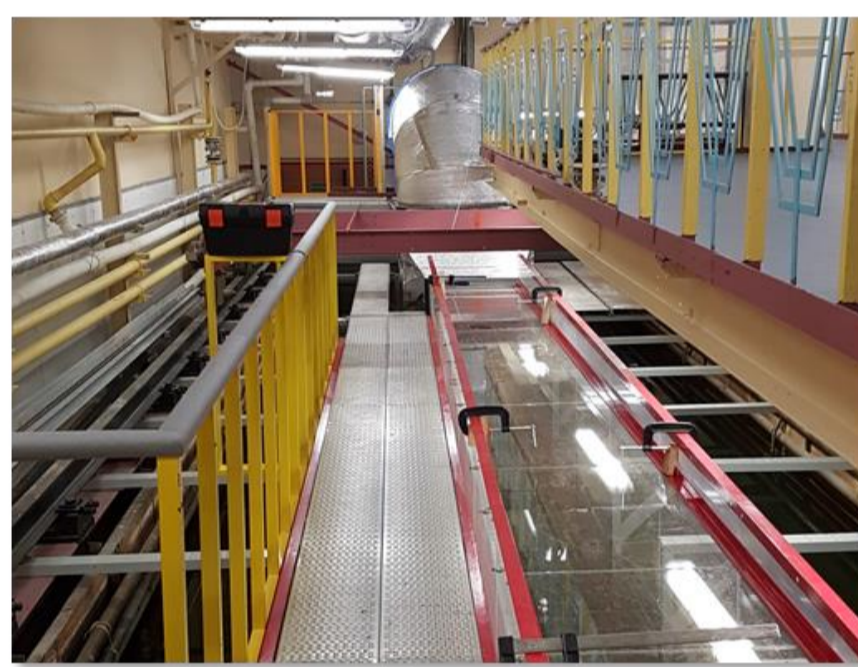
Зависимости УЭПР водной поверхности от скорости ветра при различных углах зондирования



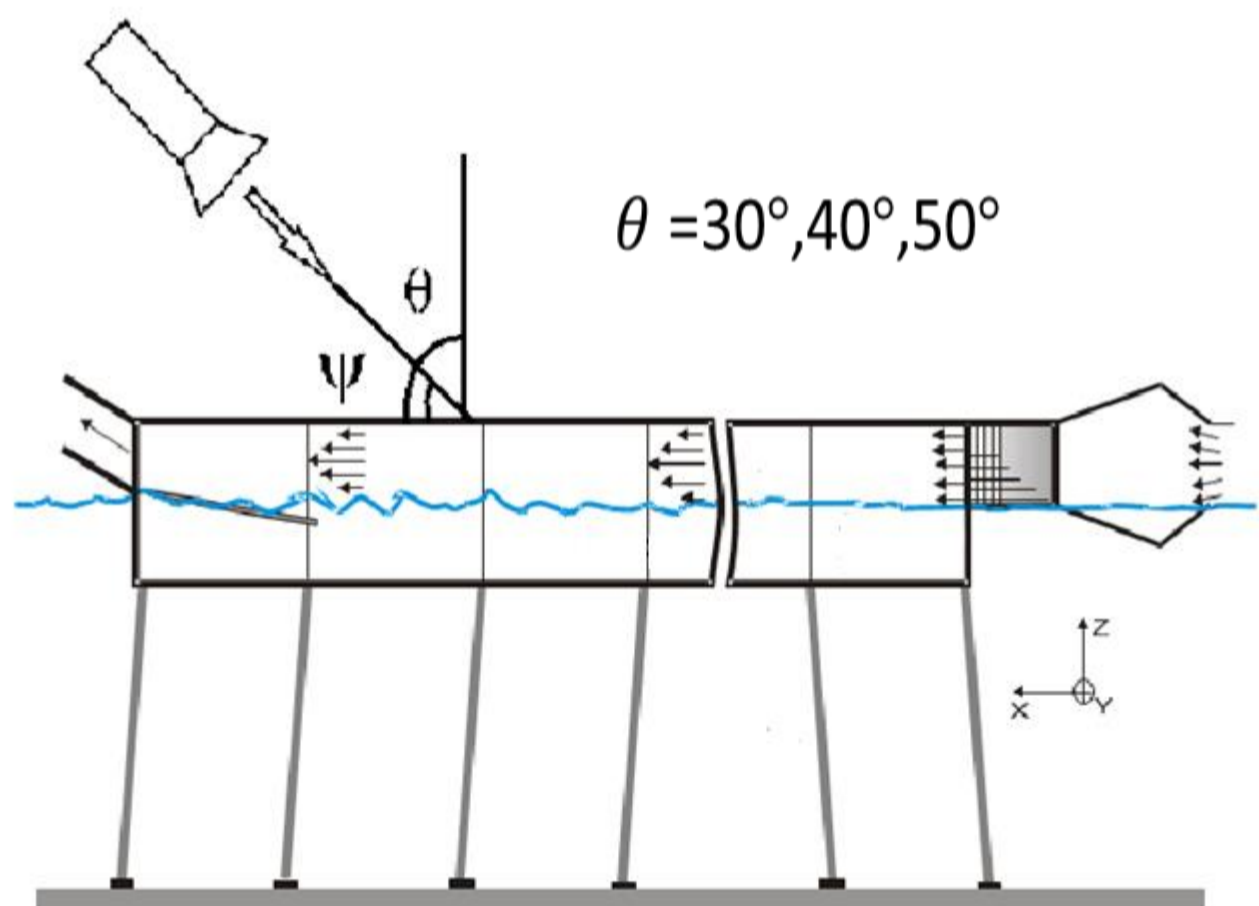
Были получены зависимости УЭПР водной поверхности от скорости ветра, при этом сигнал на прямой поляризации, хотя и обладает высокой интенсивностью, насыщается в области высоких скоростей ветра. В то же время, сигнал на перекрестной поляризации сохраняет чувствительность к изменениям скоростей ветра во всем исследуемом диапазоне.

Экспериментальная установка Высокоскоростной ветро-волновой канал WiWaT

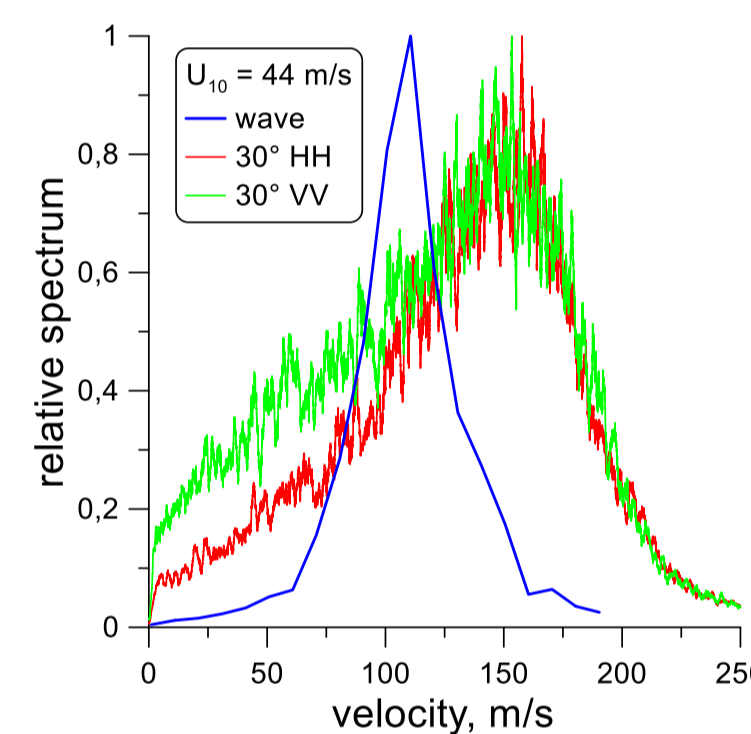
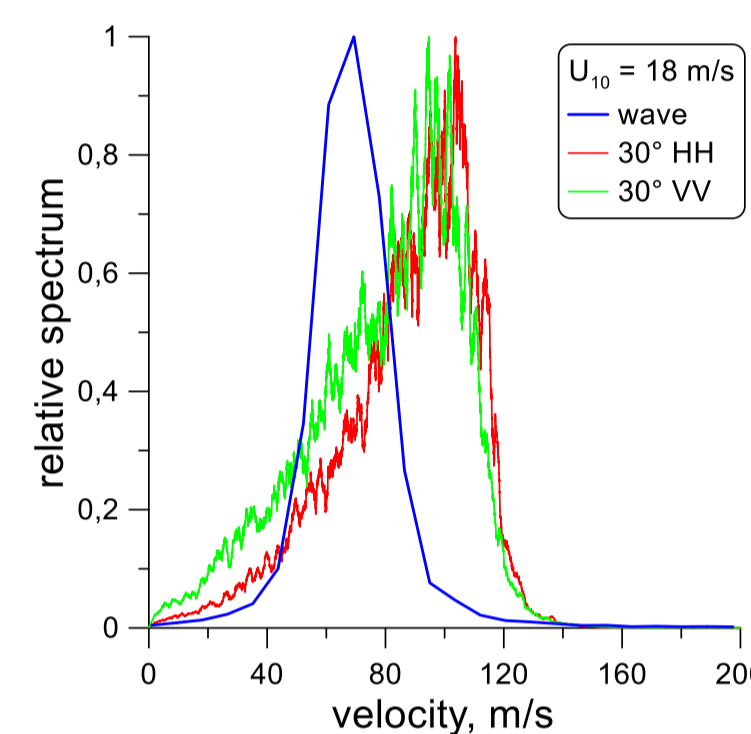
Условия эксперимента на канале:
Поперечные размеры канала – от 0.7x0.7 м в начале канала до 0.7x0.9 м в конце
Длина канала - 12 м
Размер окна наблюдения – 40x40 см
Угол падения $\theta = 30^\circ - 50^\circ$
Скорость ветра $U_{10} = 12 - 50$ м/с
Расстояние до цели – $D = 3.16$ м
Радио-прозрачная крышка рабочей секции



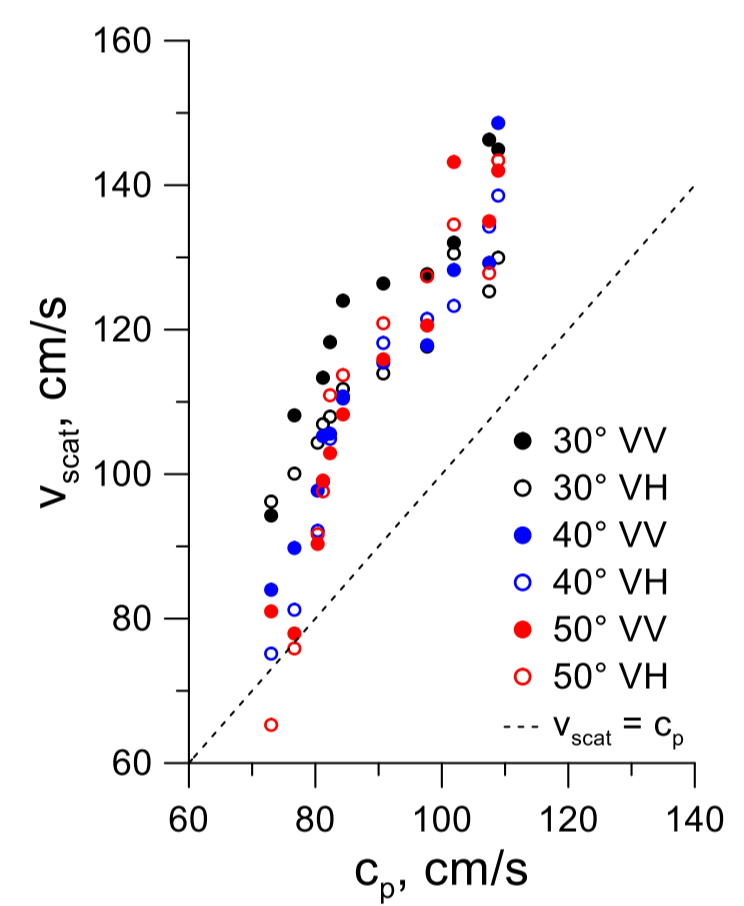
Доплеровский скаттерометр X-диапазона



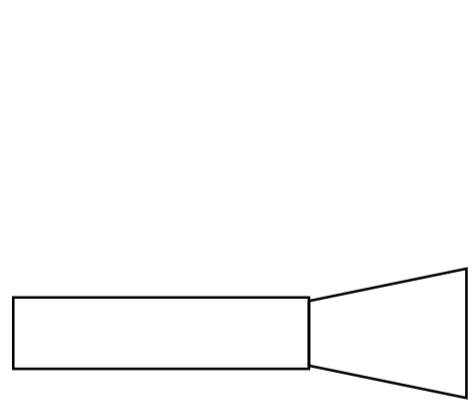
Доплеровские спектры РЛ сигнала



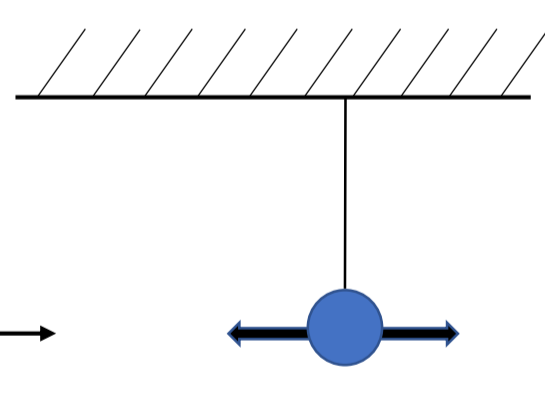
Анализ доплеровских спектров рассеянного сигнала и их сопоставление со спектральным распределением по фазовым скоростям поверхностных волн демонстрируют, что скорость рассеивателей на 10-15% превышает фазовую скорость энергонесущей волны. Это говорит о том, что основным рассеивателем являются обрушающиеся гребни ветровых поверхностных волн.



Калибровка скаттерометра



3,16 м



Для калибровки используется шар с известным ЭПР

$$P_r = \frac{P_t A_e^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 R^4}$$

-мощность сигнала на входе радиолокатора в случае применения общей антенны для передачи и приема

$$\sigma^s = \frac{P_r^s}{P_r^w} \left(\frac{G^w}{G^s} \right)^2 \sigma^w$$

-эффективная площадь рассеяния (ЭПР) водной поверхности, где $\sigma^w = 1.295\pi a^2$

Сравнивая мощность принятого сигнала от шара с известным ЭПР и мощность сигнала от водной поверхности, можно вычислить ЭПР водной поверхности с учетом измеренной диаграммы направленности антенны

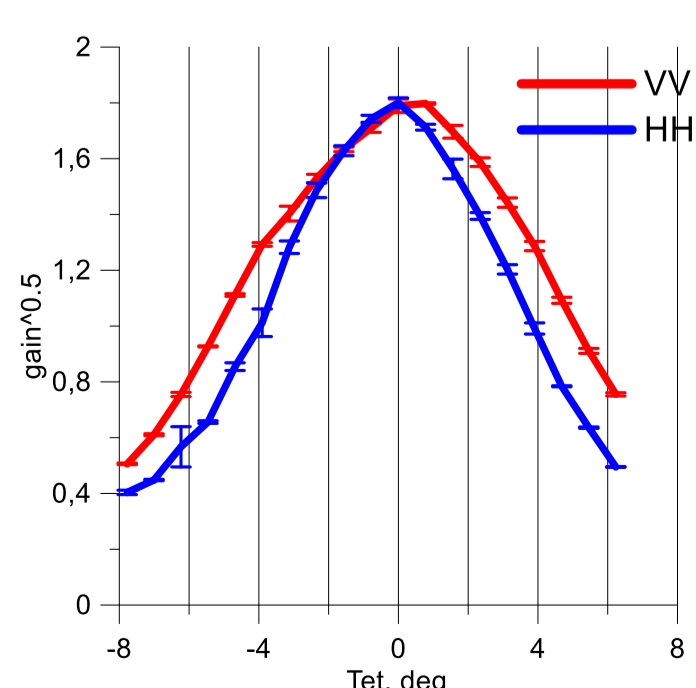
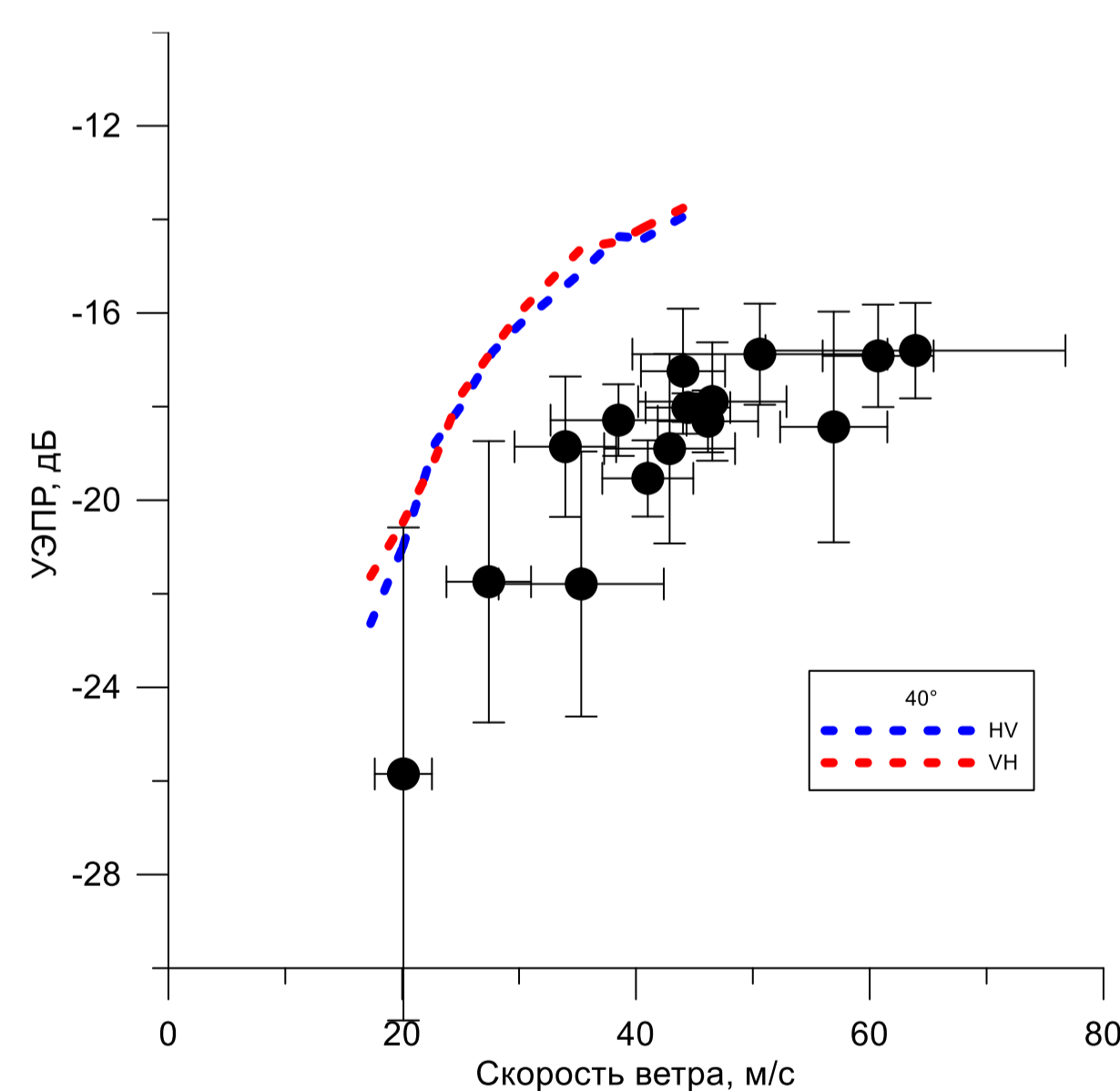


Диаграмма направленности антенны, измеренная в процессе калибровки

Сравнение экспериментальных данных с данными натурных измерений



Было проведено сравнение данных лабораторного эксперимента с данными натурных измерений. В качестве источника данных об УЭПР водной поверхности были использованы радиолокационные изображения в С-диапазоне ураганов Ирма и Мария, полученные со спутника Sentinel-1 на IW моде. Снимки были совмещены с измерениями вертикальных профилей скорости ветра с падающих GPS-зондов NOAA [Ermakova et al, 2020]. Зависимости демонстрируют схожее поведение с наличием некоторого постоянного смещения в среднем примерно в 4 дБ, которое связано с разницей в частотах зондирующих сигналов.

Выводы

Были проведены эксперименты по изучению рассеяния микроволнового излучения на ветровых волнах, в ходе которых были получены зависимости УЭПР водной поверхности от скорости ветра до 45 м/с, используемые для построения геофизических модельных функций (ГМФ) для восстановления параметров ветрового поля из данных дистанционного зондирования. Проанализированы доплеровские спектры рассеянного сигнала и обнаружено превышение пика доплеровского спектра над фазовой скоростью энергонесущей волны, что связано с рассеянием сигнала на обрушающихся гребнях поверхностных волн. Спектр сигнала на прямой поляризации обладает более выраженным максимумом по сравнению со спектром сигнала на перекрестной поляризации.

Было проведено сравнение экспериментально измеренной зависимости УЭПР водной поверхности от скорости ветра с данными натурных измерений, которое продемонстрировало схожесть зависимостей при наличии постоянного смещения, связанного с отличием излучаемой частоты в эксперименте от рабочей частоты спутника Sentinel-1.