

## Экспериментальные исследования коротковолновой части спектра ветровых волн. Предварительный анализ результатов дистанционных радиометрических измерений

И.Н. Садовский, А.В. Кузьмин, М.Н. Поспелов,  
Д.С. Сазонов, Е.В. Пашинов

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: Ilya\_Nik\_Sad@mail.ru*

В статье представлено описание результатов исследований ветрового волнения, выполненных коллективом авторов в ходе четырех лет экспедиционных работ. Определение параметров спектра гравитационно-капиллярных волн осуществлялось на основе метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии. Метод позволяет восстанавливать усредненные по азимутальному углу спектр кривизны и значение дисперсии уклонов крупных волн. В качестве входных данных метода используются результаты дистанционных радиополяриметрических наблюдений морской поверхности. Представленные в работе результаты охватывают диапазон волновых чисел от 0,39 до 15,707 рад/см и получены в результате обработки данных измерений собственного излучения на длине волны 8 мм. За все время проведения исследований восстановлено около 1500 экспериментальных спектров, соответствующих обширному набору сочетаний метеорологических условий. Восстановленные спектральные кривые имеют общие черты с моделями спектров, представленных в литературе. Продемонстрирована их четкая зависимость от интенсивности ветрового воздействия.

**Ключевые слова:** спектр, ветровые волны, гравитационно-капиллярный диапазон, микроволновое излучение, дистанционное зондирование, метод нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии

*Одобрена к печати: 01.08.2016  
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-55-67*

### Введение

Граница раздела «океан – атмосфера» всегда являлась объектом пристального внимания ученых-исследователей. Многообразие параметров данной системы, как и бесконечное количество их возможных сочетаний, до сих пор не позволяет считать вопрос исследования характеристик ветрового волнения закрытым. Появляющиеся результаты все новых и новых экспериментальных работ и теоретических разработок приводят к необходимости постоянного уточнения наших знаний о процессе формирования ветровых волн и способах его описания.

Одной из причин повышенного интереса к данному вопросу является активное развитие средств дистанционного зондирования (ДЗ) вообще и требований к точности решаемых с его помощью практических задач в частности. Геометрия морской поверхности является одним из базовых факторов, определяющих интенсивность отраженного/собственного излучения в микроволновом диапазоне. Особую роль при этом играют короткие гравитационно-капиллярные волны (ГКВ), излучение которых имеет ярко выраженный резонансный характер (Кравцов и др., 1978) и в большей степени отвечает за такие эффекты, как: наличие радиационно-ветровых зависимостей и поляризационную анизотропию излучения (Беспалова и др., 1979). Корректное использование указанных физических явлений при решении разнообразных задач ДЗ требует, во-первых, применения адекватных радиофизических моделей излучения морской поверхности, а во-вторых – знания точной формы спектра ветрового волнения. Последнее оказывается необходимым вне зависимости от привлекаемых методов расчета излучения (геометрической

оптики (ГО), малых возмущений (ММВ), малых уклонов (ММУ) и т.п.) и заключается в определении амплитудных и угловых зависимостей всех волновых гармоник, формирующих поверхность.

На практике применение известных средств и методов измерения формы спектра ГКВ сталкивается со значительными трудностями. При использовании традиционных струнных волнографов – существенное изменение показаний за счет эффектов смачивания; невозможность определения абсолютных значений амплитуды гармоник при обработке стереоизображений; «локальный» (ограниченный) характер данных при применении разнообразных лазерных сканирующих систем и т.д., и т.п. Представленное в научно-периодической литературе многообразие моделей спектров ГКВ (см., например, (Arel, 1994; Elfouhaily et al., 1997; Donelan, Pierson, 1987; Kudryavtsev et al., 1999), имеющих как существенные различия, так и разные подходы к описанию повторяющихся особенностей, свидетельствуют о том, что вопрос о форме спектра ГКВ остается открытым.

Указанные проблемы заставляют ученых искать альтернативные подходы к описанию излучательных свойств поверхности Мирового океана. В частности, строгие радиофизические модели заменяются их эмпирическими аналогами, как это сделано, например, в (Wentz, 1983). С одной стороны, подобное упрощение позволяет (уже сейчас) получать актуальные продукты ДЗ, используемые в различных областях научных исследований (см. базы данных SSM/I). С другой – в значительной мере замедляет (в силу отсутствия, так сказать, острой необходимости) процесс изучения физических закономерностей, лежащих в основе наблюдаемых явлений. К ним, как уже было сказано, относятся как сам процесс волнообразования, так и формирование собственного/отраженного излучения взволнованной морской поверхности.

Настоящая работа содержит краткое описание метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРРС), позволяющего восстанавливать параметры спектра ГКВ дистанционно, на основе результатов многочастотных радиополяриметрических наблюдений за морской поверхностью. Идея применения микроволновых радиометров для исследования волнения возникла практически сразу после открытия «критических явлений» в излучении морской поверхности. На начальном этапе (Ирисов и др., 1987), была высказана идея подбора параметров заранее определенной спектральной функции, которая объясняла бы результаты радиометрических наблюдений в рамках двухмасштабной модели (ДММ) излучения. Дальнейшие исследования (Трохимовский, 1997) показали, что наличие априорной информации о спектре совсем необязательно. В совокупности с возможностью вариации пространственно-временных масштабов проведения исследований (при использовании пилотируемых и беспилотных носителей и вариации программ сбора данных) это значительно увеличивает потенциал и расширяет область применения метода НРРС.

К настоящему моменту метод прошел апробацию, и на его основе составлен уникальный банк данных синхронных измерений спектра ГКВ и сопутствующих метеоусловий, включающий около 1500 записей, полученных за четыре экспедиционных периода и охва-

тывающих множество сочетаний волнообразующих факторов. Их частичному описанию, а также обсуждению дальнейшего плана исследований посвящена содержательная часть данной работы.

### Метод нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии

Общий вид выражения, описывающего условие возникновения резонансных максимумов в излучении взволнованной морской поверхности, имеет вид (Кравцов и др., 1978):

$$\rho^2 + 2\rho \cdot \sin \theta_k \cdot \cos \phi_k - \cos^2 \theta_k = 0,$$

где:  $\rho = n \cdot \lambda_0 / \Lambda$ ,  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $\lambda_0$  – длина волны регистрируемого излучения;  $\Lambda$  – пространственный период отдельной поверхностной волны;  $\theta_k$  и  $\phi_k$  – вертикальный (относительно направления в надир) и азимутальный (относительно волнового вектора поверхностной волны) углы наблюдения.

Как видно из представленного выражения, каждая гармоника, формирующая профиль поверхностного волнения, вносит свой уникальный вклад в общую пространственную картину излучения. В свою очередь, детальный анализ последней (по углам и интенсивности) позволяет связать наблюдаемые изменения с ростом или затуханием конкретной поверхностной гармоники. Этот принцип лежит в основе уникального метода НРПС, разработанного в ИКИ РАН при участии авторов данной публикации. Детальное описание алгоритма, а также используемых моделей и приближений может быть найдено в (Садовский, 2008). В рамках настоящей работы ограничимся описанием общих особенностей этого алгоритма.

#### *Входные данные*

Как уже было отмечено ранее, решение задачи восстановления параметров ветрового волнения осуществляется на основе данных дистанционных радиометрических наблюдений за морской поверхностью. Таким образом, для реализации алгоритма НРПС требуются результаты измерений яркостной температуры  $T_{br \text{ exp}}$  исследуемой области морской поверхности для всех возможных сочетаний углов  $\theta_k$  и  $\phi_k$  (естественно, для верхней полушеры). В самом общем случае (при наблюдениях, проводимых вблизи поверхности) величина  $T_{br \text{ exp}}(\theta_k, \phi_k)$  является суммой двух компонент: яркостной температуры гладкой поверхности  $T_{br \text{ sm}}(\theta_k, \phi_k)$  и яркостным контрастом  $\Delta T_{br \text{ exp}}(\theta_k, \phi_k)$ , вызванным волнением. Отсюда имеем:  $\Delta T_{br \text{ exp}}(\theta_k, \phi_k) = T_{br \text{ exp}}(\theta_k, \phi_k) - T_{br \text{ sm}}(\theta_k, \phi_k)$ , где опущены индексы, соответствующие разным поляризациям и частотам, а подсвет атмосферы подразумевается включенным в каждый член выражения.

Выполнение данной операции к результатам наблюдений необходимо, поскольку составляющая излучения  $T_{br \text{ sm}}(\theta_k, \phi_k)$  не несет информации о поверхностном волнении.

Для ее реализации требуется информация о термодинамических температурах воды  $T_w$  и воздуха  $T_{air}$  в области проведения измерений, ее физико-химических свойствах (включая соленость  $S$ ), а также об интегральном поглощении атмосферы  $\tau$  на интересующих частотах.

Требования к точности определения указанных параметров, включая точность калибровки радиометрического оборудования и его позиционирования, представлены, например, в (Садовский, 2008).

Указанное выше количество измерений может быть значительно сокращено. Как показали результаты апробации метода НРРС (см., например, (Садовский и др., 2009)), достаточным для решения обратной задачи оказывается проведение измерений на 5–6 азимутальных углах, охватывающих сектор  $180^\circ$  (вне зависимости от направления распространения волнения), и углах места  $\theta_k$ , лежащих в пределах  $20 \div 70^\circ$  от надира.

Полученные зависимости должны быть усреднены по всем азимутальным углам. Получаемая в результате этого кривая  $\Delta T_{br\ exp}(\theta_k)$  является базовой для анализа в рамках НРРС и позволяет перейти к вычислению характеристик волнения, присутствующего на поверхности за время проведения измерений.

### *Восстанавливаемые характеристики*

Метод НРРС позволяет определять усредненный по азимутальному углу  $\phi$  (угол между генеральным направлением распространения волнения (ГНРВ) и направлением распространения выделенной гармоники) спектр кривизны  $B(K) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} B(K, \phi) d\phi$  и нормирующее его, также усредненное по  $\phi$ , значение дисперсии уклонов крупных волн  $\sigma_0^2 = (\sigma_{0x}^2 + \sigma_{0y}^2) / 2$  (где  $B(K, \phi)$  – пространственный спектр кривизны;  $\sigma_{0x}^2$  и  $\sigma_{0y}^2$  – дисперсии уклонов крупных волн вдоль и поперек ГНРВ).

Диапазон волновых чисел  $K$  ( $K = 2\pi/\lambda$ ), в котором возможно определение формы кривой  $B(K)$ , определяется значениями  $[K_{MIN}, K_{MAX}]$ , где  $K_{MIN} = 0,05 k_{0\ MIN}$ , а  $K_{MAX} = 2,0 k_{0\ MAX}$ . Здесь  $k_{0\ MIN}$  и  $k_{0\ MAX}$  суть минимальное и максимальное волновое число ( $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ) принимаемого излучения для всего набора задействованных радиометрических каналов. Представленные в настоящей работе данные получены на основе измерений радиояркостных контрастов водной поверхности радиометрическим приемником с рабочей длиной волны  $\lambda_0 = 0,8$  см. Таким образом, диапазон исследуемых волновых чисел был ограничен значениями  $[0,39; 15,707]$  рад/см. Или, в терминах длин волн поверхностного волнения, –  $[0,41; 16,1]$  см. Соответственно, определяемое значение дисперсии уклонов является интегральной характеристикой всех волновых компонент длиннее 16,1 см.

Полное значение дисперсии  $\sigma^2$  всей совокупности компонент волнения может быть определено в соответствии с выражением:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + 2\pi \int_{K_{MIN}}^{\infty} B(K) / K dK .$$

В случае замены верхнего предела интегрирования с  $\infty$  на переменное волновое число может быть получена зависимость вида  $\sigma^2(K)$ , демонстрирующая рост крутизны волн при уменьшении их длины  $\Lambda$ .

На основании многочисленных модельных расчетов (Садовский, 2007) можно утверждать, что перечисленные параметры спектра ГКВ (при отсутствии внешних электромагнитных помех) могут быть восстановлены с ошибкой, соответственно, не более 7,0% ( $B(K)$ ), 1,0% ( $\sigma^2(K)$ ) и 15,0% ( $\sigma_0^2$ ).

### Экспериментальные исследования 2005–2012 гг.

Впервые спектральные характеристики ветрового волнения, полученные на основе анализа данных радиополяриметрических измерений, удалось получить группой исследователей, возглавляемой Трохимовским Ю.Г. (Kuzmin et al., 2000). Измерения были выполнены с пирса экспериментального полигона Южного отделения Института океанологии РАН (г. Геленджик, Россия). К сожалению, особенности географического расположения полигона (закрытая бухта, малая глубина) не позволили накопить информацию в качестве и объеме, необходимом для завершения разработки метода НРРС. Не смотря на это, на примере нескольких спектральных функций было продемонстрировано, что в них присутствуют все основные особенности, характерные для области ГКВ (наличие второго спектрального максимума, его расположение и т.п.), а также они обладают чувствительностью к вариациям ветрового воздействия.

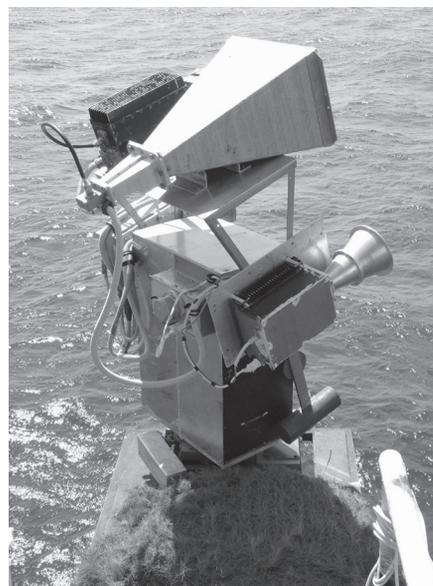
Систематические исследования ветрового волнения методом НРРС стали возможны после участия коллектива ИКИ РАН в международном научном проекте Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring (САРМОS). В его рамках был освоен новый экспериментальный полигон – стационарная океанографическая платформа (*рис. 1*) ЭО МГИ (Экспериментальное отделение Морского гидрофизического института), расположенная у южного берега Крыма вблизи п. Кацивели (Кузьмин и др., 2009). Комплексные исследования характеристик взаимодействия океана и атмосферы, начатые в 2005 году (13–26 июня), были продолжены в 2007 (14–20 августа), 2009 (21–27 октября) и 2012 (5–27 июня) годах при поддержке РФФИ. Общее время исследований составило 51 сутки, что позволило охватить значительные диапазоны различных условий волнообразования, часть из которых может быть отнесена к условиям развитого волнения и глубокой воды.

Основу измерительного комплекса составляла специально спроектированная автоматизированная сканирующая платформа «Траверс» (*рис. 2*) с установленными на ней радиометрами-поляриметрами. Чувствительность радиометрических приемников, разработанных в ИКИ РАН, с центральными частотами 100,0 (В, Г), 37,5 (В, Г,  $\pm 45^\circ$ ), 20,0 (В, Г,  $\pm 45^\circ$ ) и 3,75 (В) ГГц составляла 0,15, 0,15, 0,15 и 0,1 К соответственно. Основной площадкой измерений была южная (мористая) часть нижней палубы платформы (на *рис. 1* слева), рас-

положенная на высоте 4 метра над уровнем моря. Остальная часть измерительного оборудования была расположена таким образом, чтобы по возможности максимальным образом охватить все значимые параметры волнообразования. Ее составляли: набор цифровых фотокамер повышенного разрешения (для проведения стереофотосъемки поверхностного волнения); измерители течений, солености и температуры, установленные на разных уровнях, от дна до поверхности; набор акустических метеокомплексов, расположенных на всех рабочих палубах платформы; две антенны струнных волнографов для проведения контактных измерений профиля поверхности; газовый анализатор; микроволновый скаттерометр Ку-диапазона и т.д. Детальное описание всего измерительного оборудования, схемы его расположения и программ реализации исследований представлено, например, в (Pospelov et al., 2009).



*Рис. 1. Вид на океанографическую платформу ЭО МГИ НАНУ с восточной стороны*



*Рис. 2. Автоматизированная платформа «Траверс» с радиометрическим комплексом*

Измерения производились непрерывно в течение суток, за исключением технологических перерывов на ремонт и обслуживание аппаратуры. Экспериментальные данные регистрировались в цифровой форме с частотой 3 Гц (компоненты скорости ветра и пульсации температуры воздуха – 20 Гц) на персональном компьютере, с помощью которого также осуществлялось управление поворотной платформой с радиометрами. Программно можно было задать любой алгоритм вращения. Основным алгоритмом состоял в сканировании снизу вверх и обратно со скоростью 0,2 об./мин в диапазоне углов от 20° до 153° по отношению к надиру на шести последовательных азимутальных углах, через каждые 36°, и затем возврат на исходный азимутальный угол. Обратный азимутальный скан осуществлялся при фиксированном угле места порядка 65–70° от надира. Общая продолжительность такого цикла составляла порядка 20–25 мин. Таким образом, в различных азимутальных направлениях измерялась радиояркая температура морской поверхности

на углах от близких к надиру до горизонта, и затем – радиояркость температура атмосферы от горизонта почти до зенита. Обратный скан обеспечивал возможность оценить величину азимутальной анизотропии радиотеплового излучения морской поверхности.

### Результаты восстановления параметров спектра ГКВ

Общий вид получаемых в результате сканирования зависимостей  $T_{br\text{exp}}(\theta_k, \phi_k)$  представлен на рис. 3. Эти данные после вычисления соответствующих значений  $\Delta T_{br\text{exp}}(\theta_k, \phi_k)$  и последующего усреднения (расчета  $\Delta T_{br\text{exp}}(\theta_k)$ ), использовались в качестве входных данных при решении задачи восстановления параметров спектра ГКВ методом НРРС. На рис. 4 представлен характерный вид восстанавливаемых функций спектра кривизны  $B(K)$ . Следует отметить, что восстановленные значения спектра кривизны для всего диапазона скоростей ветра имеют аналогичный характер, при этом рост скорости ветра сопровождается практически линейным ростом амплитуды  $B(K)$ . Из графика видно, что найденная функция  $B(K)$  хорошо согласуется со всеми известными моделями ветрового волнения, представленными в литературе (см., например, (Apel, 1994; Elfouhaily et al., 1997; Donelan, Pierson, 1987): имеет ярко выраженный максимум в области волновых чисел  $K \approx 5\text{--}7$  рад/см; резкий спад амплитуды гармоник по обе стороны от него; стремление к нулю при приближении к верхнему пределу  $K \approx 40$  рад/см за счет эффектов вязкой и нелинейной диссипации; локальный минимум общей функции  $B(K)$  в области  $0,5\text{--}1,0$  рад/см. Отличия в первую очередь касаются точного местоположения вторичного максимума, его инвариантности к интенсивности ветрового потока, значений производной функции  $B(K)$  при отдалении от максимума, общего уровня кривой  $B(K)$  и т.п.

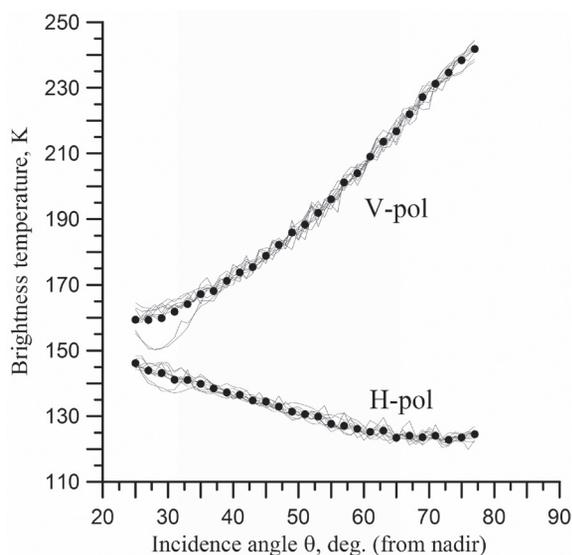


Рис. 3. Результат усреднения измеренных значений радиояркости температуры по всем азимутальным углам (точки). Черные линии – данные измерений на различных азимутальных углах. Радиометр 8-мм диапазона

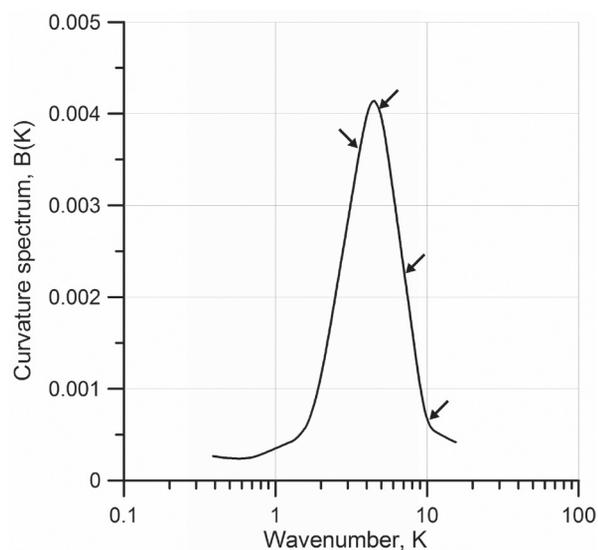


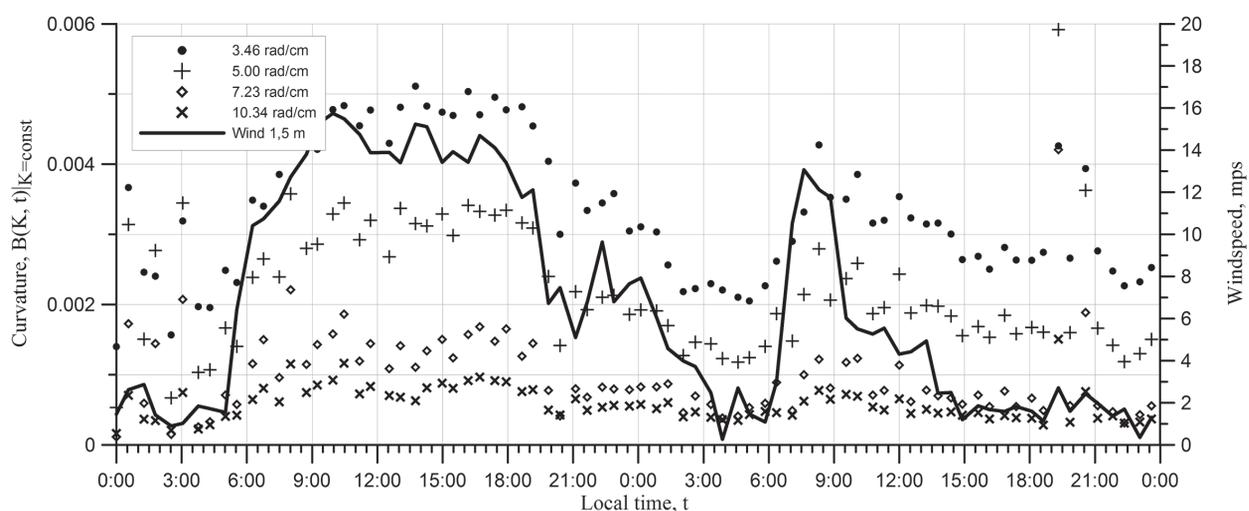
Рис. 4. Восстановленные по результатам измерений, представленных на рис. 3., значения спектра кривизны волнения, присутствующего в тот период на поверхности

Ранее отмечалось, что время сбора информации (период сканирования морской поверхности для определения интенсивности ее собственного излучения под разными углами визирования), необходимой для применения метода НРРС, составляло порядка 20 минут. Таким образом, при условиях полноты сопутствующих метеорологических данных и непрерывном сканировании за сутки проведения измерений удавалось восстановить 72 спектральных кривых (аналогичных представленной на рис. 4), описывающих геометрию морской поверхности. К сожалению, реальное количество спектров оказалось значительно меньшим. Во-первых, за счет технологических перерывов на обслуживание аппаратуры. Во-вторых, по причине несвоевременного выявления неполадок в работе контактных измерительных датчиков температуры, углов т.п. (обычно в ночное время). И, наконец, из-за вынужденной остановки оборудования в периоды штормовых предупреждений и обильного выпадения осадков.

В общей сложности за четыре года исследований удалось восстановить 1418 спектральных кривых. Из них: 490 в 2005 г., 209 в 2007 г., 258 в 2009 г. и 461 в 2012 г.

#### *Динамика спектральных компонент волнения*

С точки зрения последующего анализа, интерес представляют не сами формы спектральных кривых, сменяющих друг друга с двадцатиминутным интервалом, а рассмотрение их изменчивости во времени на фоне изменяющихся волнообразующих факторов. В качестве примера на рис. 5 приведены результаты восстановления параметров спектра ГКВ за 8–9 июня 2012 года. Для сравнения на том же рисунке представлены значения модуля скорости ветрового потока, измеренные на уровне 1,5 метра над уровнем водной поверхности.



*Рис. 5. Временные зависимости восстановленных значений спектра кривизны, соответствующих фиксированным волновым числам. Черная сплошная линия – скорость ветра на уровне 1,5 м над уровнем морской поверхности*

Как видно из представленного рисунка, восстанавливаемые амплитуды спектральных компонент волнения демонстрируют высокую степень корреляции (максимальное зарегистрированное значение коэффициента корреляции Пирсона составило 0,922) с основным волнообразующим фактором – скоростью приповерхностного ветра. Наиболее наглядно это проявляется в поведении кривых, соответствующих волновым числам 3,46, 5,0 и 7,22 рад/см. Именно эти выделенные гармоники находятся вблизи спектрального максимума (рис. 4). Помимо этого, на рисунке видна область (в районе 21:00 9 июня), когда в силу сбоя в работе датчика температуры морской воды восстановленные с применением метода НРРС значения спектра кривизны ГКВ оказались многократно завышенными. Зависимости, аналогичные представленной на рис. 5, построены для всех имеющихся в наличии данных измерений и отражают поведение гармоник, входящих в диапазон [0,39; 15,707] рад/см. В настоящее время работы по их детальному анализу только начаты.

#### *Амплитудно-ветровые зависимости спектральных компонент ГКВ*

Высокая степень корреляции восстановленных характеристик спектра со скоростью приповерхностного ветра, как это было продемонстрировано ранее, позволила перейти к рассмотрению спектрально-ветровых зависимостей.

В частности, на рис. 6 представлены зависимости спектра кривизны от скорости ветра. Каждый из графиков построен для одного из четырех волновых чисел (3,46, 5,0, 7,22 и 10,34 рад/см), находящихся вблизи спектрального максимума. Черные точки соответствуют данным, полученным в экспериментах 2005 года, серые – 2007 года, серые крестики – 2009 года, а черные крестики соответствуют данным 2012 года. Аналогичные зависимости получены и для других волновых компонент. Однако ввиду ограниченности объема данной работы, их графическое представление опущено.

Значительный разброс амплитуд спектральных компонент, представленных на рис. 6, свидетельствует о многообразии воздействий метеопараметров на морскую поверхность. В табл. 1 представлены диапазоны вариаций условий волнообразования для всех четырех экспериментов: скоростей ветра, его направлений, времени ветрового воздействия, температур воды и приводного слоя атмосферы, степени стратификации атмосферы.

Таблица. 1. Общая характеристика условий проведения исследований

<i>Параметр</i>	<i>2005</i>	<i>2007</i>	<i>2009</i>	<i>2012</i>
Скорость ветра, м/с	0,2÷14,0	0,8÷10,5	4,1÷17,1	0,6÷24,0
Преобладающее направление ветра, град. (0° – «на север»)	260 70	250 90	70	330 240 150
Температура воды $T_w$ , °С	14,8÷24,9	25,2÷27,5	13,2÷20,7	18,3÷28,6
Температура воздуха $T_{air}$ , °С	10,3÷22,7	22,6÷26,9	19,3÷19,9	17,9÷26,5
$T_{air} - T_w$ , °С	-1,9÷10,2	-1,6÷5,5	-6,8 ÷ -0,9	-4,9÷13,2

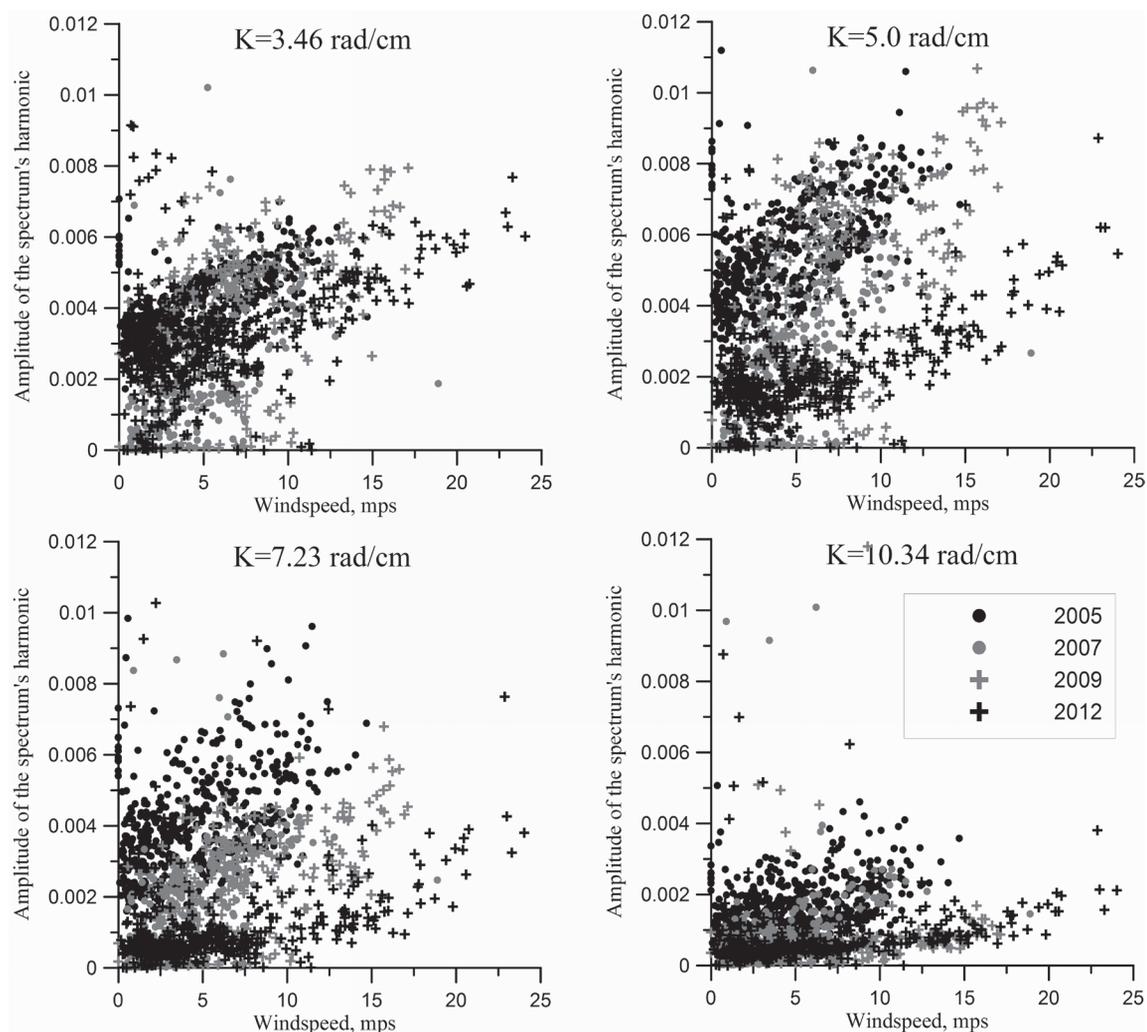


Рис. 6. Экспериментальные зависимости значений спектра кривизны, соответствующие четырем волновым числам, от скорости ветра. Пояснения даны в тексте

Детальный анализ полученных данных показал, что необходима тщательная сортировка условий воздействия на морскую поверхность. На рис. 7 приведен пример отфильтрованных данных для зависимости амплитуды спектральной компоненты волнения  $K = 7,22$  рад/см от значения параметра, определяющего степень стратификации приводного слоя атмосферы, – разницы термодинамических температур воздуха и воды  $T_{\text{air}} - T_w$ . Другой пример отсортированных и усредненных данных 2007 и 2009 годов приведен на рис. 8. Здесь показана зависимость изменения амплитуды спектральных компонент от скорости приводного ветра. Интересно отметить, как зависимости амплитуд спектральных компонент, полученных в 2009 году, «продолжают» аналогичные зависимости 2007 года. Эти примеры показывают, что дальнейший анализ экспериментальных зависимостей будет возможен только после сортировки полученных данных как по условиям волнообразования, так и с учетом оценки качества решения задачи восстановления параметров спектра на базе метода НРРС.

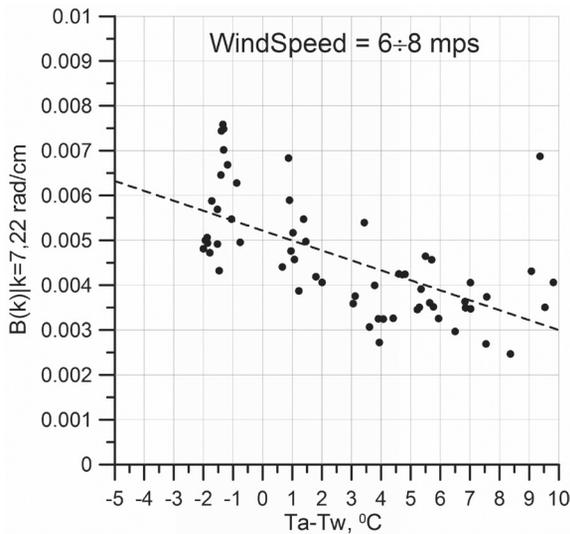


Рис. 7. Зависимость амплитуды спектральной компоненты = 7,22 рад/см от значения параметра  $T_{air} - T_w$

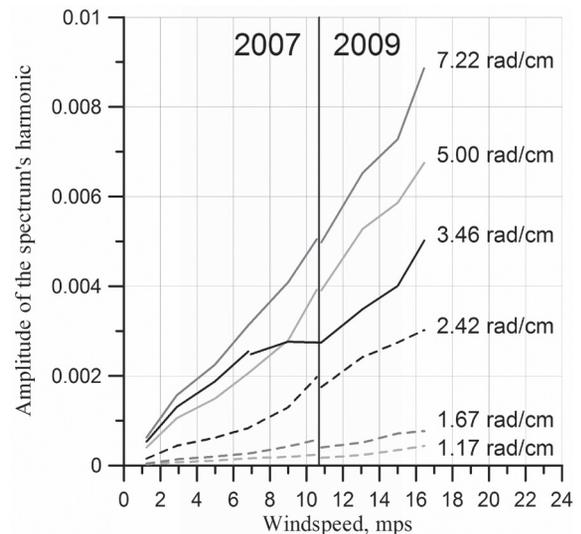


Рис. 8. Ветровая зависимость амплитуды спектральных компонент. Пояснения даны в тексте

## Заключение

Метод НРПС представляет собой дистанционный способ получения информации о структуре ветрового волнения. Возможность восстановления абсолютных значений амплитуды спектральных компонент волнения в совокупности с оперативностью получения итоговых данных и их высокой точностью, делает его незаменимым инструментом для исследования процессов и явлений, имеющих место в системе «океан–атмосфера».

За четыре года исследований удалось отработать четкий алгоритм сбора радиометрической информации, необходимой для применения метода НРПС. Оптимизация вычислительного процесса позволило сократить время поиска решений до 5 минут, что в четыре раза меньше времени измерений. Это позволяет говорить о возможности восстановления параметров спектра в режиме on-line, а значит, использовать метод НРПС для оперативного мониторинга состояния водной поверхности при решении как научно-исследовательских, так и практических задач.

Главной задачей выполненных экспериментальных работ было накопление информации о поведении ветровых ГКВ в натуральных условиях для последующего выявления корреляционных связей с различными метеопараметрами. Наиболее явные из них, как, например, ветровая зависимость, уже были продемонстрированы и требуют детального изучения и описания в дальнейшем. Исследование более тонких процессов (влияние стратификации, межволновое взаимодействие и т.п.), важных для уточнения существующих и разрабатываемых моделей спектров ветровых волн, будет возможно после жесткого разделения имеющихся спектральных функций по фиксированным параметрам волнообразования. Уже на данном этапе исследований очевидно, что, несмотря на значительный объем собранной информации (около 1500 спектров), после отбора ее будет недостаточно для

предоставления объективного описания того или иного явления. В свою очередь, это диктует острую необходимость продолжения исследований, аналогичных представленным в данной работе, с учетом важности их реализации как в различное время года, так и в различных точках Мирового океана. Относительная простота установки радиометрического оборудования и запуска измерений позволяет рассматривать в качестве исследовательских полигонов существующие пирсы, волнорезы, исследовательские платформы, шельфовые нефтяные вышки и т.п. Также представляется возможным установка оборудования на авиационные носители, пилотируемые и беспилотные. В данное время авторами настоящей работы активно анализируется возможность применения метода НРРС при обработке данных спутниковых наблюдений, что в случае успеха станет новым этапом в исследованиях ветрового волнения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №14-02-00839 и №15-05-08401.

### Литература

1. Беспалова Е.А., Веселов В.М., Глотов А.А., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Попов А.Е., Раев М.Д., Шарков Е.А., Эткин В.С. Исследование анизотропии ветрового волнения по вариациям поляризованного теплового излучения // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246. № 6. С. 1482–1485.
2. Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Радиотепловая спектроскопия морской поверхности // ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 3. С. 587–589.
3. Кравцов Ю.А., Мировская Е.А., Попов Е.А., Троицкий И.А., Эткин В.С. Критические явления при тепловом изучении периодически неровной водной поверхности // Изв. АН СССР, ФАО. 1978. Т.14. №7. С. 733–739.
4. Кузьмин А.В., Горячкин Ю.А., Ермаков Д.М., Ермаков С.А., Комарова Н.Ю., Кузнецов А.С., Репина И.А., Садовский И.Н., Смирнов М.Т., Шарков Е.А., Чухарев А.М. Морская гидрофизическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Черном море // Исследование Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.
5. Садовский И.Н. Методика восстановления параметров спектра ветрового волнения на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // Исследование Земли из космоса. 2008. № 6. С. 1–7.
6. Садовский И.Н. Поляризационные радиотепловые методы в исследованиях параметров морского волнения: дис. канд. физ.-мат. наук. М., 2007. 184 с.
7. Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н. Исследование параметров спектра ветрового волнения по данным дистанционных радиополяриметрических измерений // Исследование Земли из космоса. 2009. № 2. С. 1–8.
8. Apel J.R. An improved ocean surface wave vector spectrum // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 16.269–16.291.
9. Donelan M.A., Pierson W.J.P. Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry // J. Geophysical Research. 1987. V. 92. P. 4971–5029.
10. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 15.781–15.796.
11. Kudryavtsev V.N., Makin V.K., Chapron B. Coupled sea surface-atmosphere model. 2. Spectrum of short wind waves // J. Geophysical Research. 1999. Vol. 104. C4. P. 7625–7639.
12. Kuzmin A., Pospelov M., Trokhimovskii Yu. Sea surface parameters retrieval by passive microwave polarimetry // Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere / Eds. P. Pampaloni, S. Paloscia. VSP Intern. Science Publishers. Zeist, The Netherlands. 2000. P. 3–11.
13. Pospelov M.N., De Biasio F., Goryachkin Y.N., Komarova N.Y., Kuzmin A.V., Pampaloni P., Repina I.A., Sadovskiy I.N., Zecchetto S. Air-sea interaction in a coastal zone: The results of the CAPMOS'05 experiment on an oceanographic platform in the Black Sea // Atmospheric Research. 2009. Vol. 94. No. 1. P. 61–73.
14. Trokhimovskii Yu.G. The model for microwave thermal emission of sea surface with waves // Earth Observation Remote Sensing. 1997. V. 1. P. 39–49.
15. Wentz F.J. A model function for ocean microwave brightness temperature // J. Geophysical Research. 1983. V. 88. No. C3. P. 1892–1907.

# Experimental research of short-wave part of wind-waves spectrum. Preliminary analysis of radiometric remote measurements

I.N. Sadovsky, A.V. Kuzmin, M.N. Pospelov, D.S. Sazonov, E.V. Pashinov

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*  
*E-mail: Ilya\_Nik\_Sad@mail.ru*

The paper presents the results of wind-waves research performed by authors during four years of experiments. Determination of gravity-capillary wave spectrum parameters was carried out on the basis of a method called Non-Linear Radio-Thermal Resonance Spectroscopy (NRRS-method). This method allows one to retrieve the curvature spectrum of gravity-capillary waves and the value of long-wave slope variance, both averaged over azimuth angle. As an input data for the NRRS-method, the results of remote radio-polarimetric observations of wavy sea surface are used. The results cover the range of wave numbers from 0.39 up to 15.707 rad/cm and are obtained from sea-surface self-radiation measurements at a wavelength of 8 mm. In total, about 1500 experimental curves corresponding to an extensive set of weather condition combinations are retrieved. The restored spectral curves have common features with well-known models of spectrum presented in literature. Their prominent dependence on wind intensity is demonstrated.

**Keywords:** spectrum, wind waves, gravity-capillary range, microwave radiation, remote sensing, method of Non-linear Radio-thermal Resonance Spectroscopy

*Accepted: 01.08.2016*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-55-67*

## References

1. Bespalova E.A., Veselov V.M., Glotov A.A., Militskii Yu.A., Mirovskii V.G., Pokrovskaya I.V., Popov A.E., Raev M.D., Sharkov E.A., Etkin V.S., Issledovanie anizotropii vetrovogo volneniya po variatsiyam polarizovannogo teplovogo izlucheniya (A study of wind waves anisotropy based on variations of polarized thermal radiation), *Dokl. AN SSSR*, 1979, Vol. 246, No. 6, pp. 1482–1485.
2. Irisov V.G., Trokhimovskii Yu.G., Etkin V.S. Radioteplovaya spektroskopiya morskoi poverkhnosti (Radio spectroscopy of sea surface), *DAN SSSR*, 1987, Vol. 297, No. 3, pp. 587–589.
3. Kravtsov Yu.A., Mirovskaya E.A., Popov E.A., Troitskii I.A., Etkin V.S., Kriticheskie yavleniya pri teplovom izuchenii periodicheskoi nerovnoi vodnoi poverkhnosti (Critical phenomena in the thermal radiation of the periodically rough water surface), *Izv. AN SSSR, FAO*, 1978, Vol. 14, No. 7, pp. 733–739.
4. Kuz'min A.V., Goryachkin Yu.A., Ermakov D.M., Ermakov S.A., Komarova N.Yu., Kuznetsov A.S., Repina I.A., Sadovskii I.N., Smirnov M.T., Sharkov E.A., Chukharev A.M., Morskaya gidrofizicheskaya platforma "Katsiveli" kak podsputnikovyi poligon na Chernom more (Marine Hydrophysical platform "Katsiveli" as a sub-satellite test polygon on the Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 1, pp. 31–44.
5. Sadovskii I.N., Metodika vosstanovleniya parametrov spektra vetrovogo volneniya na osnove dannykh uglovykh radiopolarimetricheskikh izmerenii (Wind-wave spectra parameters retrieval method based on measuring angular dependences of the brightness temperature), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 6, pp. 1–7.
6. Sadovskii I.N., *Polyarizatsionnye radioteplovye metody v issledovaniyakh parametrov morskogo volneniya: dis. kand. phys.-mat. nauk* (Polarization techniques in the study of sea waves parameters: syn. cand. phys.-math. sci. thesis), Moscow, 2007, 184 p.
7. Sadovskii I.N., Kuzmin A.V., Pospelov M.N., Issledovanie parametrov spektra vetrovogo volneniya po dannym distantsionnykh radiopolarimetricheskikh izmerenii (Wind-wave spectrum parameters investigation based on remote radio-polarimetric measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 2, pp. 1–8.
8. Apel J.R., An improved ocean surface wave vector spectrum, *J. Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, pp. 16.269–16.291.
9. Donelan M.A., Pierson W.J.P., Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry, *J. Geophysical Research*, 1987, Vol. 92, pp. 4971–5029.
10. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D., A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, pp. 15.781–15.796.
11. Kudryavtsev V.N., Makin V.K., Chapron B., Coupled sea surface-atmosphere model. 2. Spectrum of short wind waves, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. C4, pp. 7625–7639.
12. Kuzmin A., Pospelov M., Trokhimovskii Yu., Sea surface parameters retrieval by passive microwave polarimetry, In: *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere*, Eds. P. Pampaloni, S. Paloscia, VSP Intern. Science Publishers, Zeist, The Netherlands, 2000, pp. 3–11.
13. Pospelov M.N., De Biasio F., Goryachkin Y.N., Komarova N.Y., Kuzmin A.V., Pampaloni P., Repina I.A., Sadovsky I.N., Zecchetto S., Air-sea interaction in a coastal zone: The results of the CAPMOS'05 experiment on an oceanographic platform in the Black Sea, *Atmospheric Research*, 2009, Vol. 94, No. 1, pp. 61–73.
14. Trokhimovskii Yu.G., The model for microwave thermal emission of sea surface with waves, *Earth Observation Remote Sensing*, 1997, Vol. 1, pp. 39–49.
15. Wentz F.J., A model function for ocean microwave brightness temperature, *J. Geophysical Research*, 1983, Vol. 88, No. C3, pp. 1892–1907.