

Анализ взаимосвязи характеристик волнения, полученных с помощью СВЧ радиометрических измерений и цифровых фотографий морской поверхности

Д.М. Ермаков^{1,2}, М.Т. Смирнов¹, А.В. Кузьмин², М.Н. Поспелов², И.Н. Садовский^{2,3}

¹ *Институт Радиотехники и Электроники РАН, Фрязинский филиал
141120 Фрязино, Моск. обл., пл. акад. Введенского 1
E-mail: dima@ire.rssi.ru*

² *Институт Космических Исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru*

³ *Владимирский государственный университет
600026 Владимир, ул. Горького, 87
E-mail: ilya_nik_sad@mail.ru*

В работе исследована взаимосвязь оптических и СВЧ радиометрических данных натуральных измерений взволнованной морской поверхности, полученных в ходе комплексных экспериментов «Кацивели-2005». Построены синхронные временные ряды характеристических параметров, вычисленных по данным обоих типов. Установлена корреляционная связь между построенными рядами параметров, объясненная проявлением вариаций спектра гравитационно-капиллярного волнения в данных оптических и микроволновых дистанционных измерений.

Введение

Существенной проблемой при исследовании морского (океанического) волнения дистанционными методами является нехватка независимой объективной информации о состоянии поверхности. В качестве таковой обычно используют данные контактных измерений (например, струнными волнографами), недостаток которых – неудовлетворительная точность в области низкоэнергетических гравитационно-капиллярных волн (ГКВ). Часто применяют косвенные измерения, например, измерения скорости приповерхностного ветра, по величине которого восстанавливают, на основании выбранной модели, спектральные характеристики поверхностного волнения. Однако определенный произвол в выборе модели волнения и различия в модельных описаниях спектров коротких волн, достигающие разов и даже порядков, значительно ограничивают применимость информации о скорости ветра для проверки и корректировки результатов дистанционных измерений ГКВ. Поэтому особую актуальность приобретают методики комплексных дистанционных измерений, дающих независимую информацию о состоянии поверхности вследствие различных механизмов формирования регистрируемого излучения. Такими независимыми дистанционными измерениями являются, в частности, измерения в видимом диапазоне солнечного излучения, рассеянного водной толщью и «пространственно модулированного» неровностями ГКВ, и измерения в микроволновом диапазоне (мм – см) собственного СВЧ излучения взволнованной поверхности.

Целью настоящей работы являлось исследование взаимосвязи микроволновых и оптических данных натуральных измерений взволнованной морской поверхности, полученных в ходе комплексных экспериментов «Кацивели-2005». Для этого, из экспериментальных данных были выделены фрагменты синхронных измерений обоих типов, использованные далее для расчета набора характеристических параметров, чувствительных к вариациям спектра ГКВ. Поскольку измерения осуществляли регулярно (с характерными интервалами 30..60 минут) в течение длительного времени, рассчитанные величины образовали временные ряды, иллюстрирующие зависимость значений характеристических параметров от состояния поверхности. Предметом исследования в настоящей работе стали корреляционные соотношения между этими временными рядами, которые

объясняли проявлением вариаций спектра ГКВ в оптических и СВЧ радиометрических экспериментальных данных.

Описание эксперимента

Комплексные эксперименты «Кацивели-2005» были проведены в период с 1 по 21 июня 2005 г. на стационарной океанографической платформе ЭО МГИ НАНУ, расположенной у южного берега Крыма вблизи п. Кацивели. Для оптических измерений морской поверхности применяли периодическую цифровую фотосъемку (с интервалом около 30 минут) морской поверхности фотокамерой Olympus 8080 WZ (размер кадра 3264 x 2448 точек, размер ПЗС-матрицы 6,60 x 8,80 мм, широкоугольный объектив, фокусное расстояние 7,1 – 35,6 мм). В зависимости от высоты камеры над поверхностью (выполняли съемку с разных палуб) и наклона камеры размер разрешаемого элемента на поверхности составлял от долей миллиметра до сантиметра. В настоящей работе использованы данные, полученные при съемке с высоты около 3 м в надир, что обеспечивало субмиллиметровое разрешение.

Радиометрический измерительный комплекс состоял из набора радиометров с рабочими частотами от 3,7 до 89 ГГц, установленных на поворотной платформе, сканировавшей морскую поверхность и атмосферу под управлением ПК. Выходные данные измерительного комплекса формировали угловые зависимости регистрируемого микроволнового излучения с частотой дискретизации 3 Гц в широком диапазоне зенитных углов при шести фиксированных азимутах. В настоящей работе использованы данные радиометрических измерений на длине волны 8 мм.

Дополнительно измеряли температуру и соленость поверхностного слоя воды и температуру атмосферы, входящие в модель для обработки радиометрических данных, а также скорость и направление приповерхностного ветра.

В результате экспериментов получили длительные ряды наблюдений, из которых в качестве наиболее подходящих для совместного анализа были отобраны измерения, выполненные с 8-го по 9-е июня 2005 г. Такой выбор был обусловлен в первую очередь метеорологической обстановкой: в указанный интервал времени при неизменном направлении ветра его скорость менялась в диапазоне от 3 до 12 м/с. Были обработаны 9 пар фотографий, сделанных в этот интервал времени в режиме съемки в надир с высоты около 3 м. Временной промежуток, разделявший фотографии в каждой паре, составлял несколько секунд. Временной промежуток, разделявший пары фотографий, составлял не менее одного часа. Для каждой пары фотографий были отобраны синхронные с ними измерения угловых зависимостей микроволнового излучения поверхности на длине волны 8 мм, а также данные метеорологических и прочих измерений.

Методика обработки экспериментальных данных

В соответствии с методикой, ранее описанной авторами в [1], цифровые фотографии морской поверхности раскладывали на цветовые компоненты (красную, зеленую, синюю) и рассчитывали характеристические параметры для всех цветовых компонент независимо. Для фотографии, выполненной в момент времени t_i , получали по три параметра двух типов. Рассчитывали Фурье-образы цветовых компонент фотографии и аппроксимировали их высокочастотные части степенными функциями от волнового числа ($S(k) \sim k^{-\gamma}$, см. [1]), получая показатели степени $\gamma_r, \gamma_g, \gamma_b$ (индексы r, g, b соответствуют красной, зеленой и синей компонентам). Кроме того, вычисляли средние радиусы корреляции r_r, r_g, r_b цветовых компонент фотографии. Поскольку фотографии объединяли попарно, и в каждой паре фотографии были выполнены в близкие моменты времени, считали, что параметры, рассчитанные для двух фотографий в паре, характеризуют одно и то же состояние морской поверхности. Поэтому каждой паре фотографий ставили в соответствие сумму значений рассчитанных для них параметров, чтобы ослабить влияние случайных факторов:

бликов, мусора на поверхности и т.п. В итоге получили шесть рядов оптических характеристических параметров (ОХП) γ_r , γ_g , γ_b (рис. 1), r_r , r_g , r_b (рис. 2) по 9 значений в каждом (по числу пар фотографий).

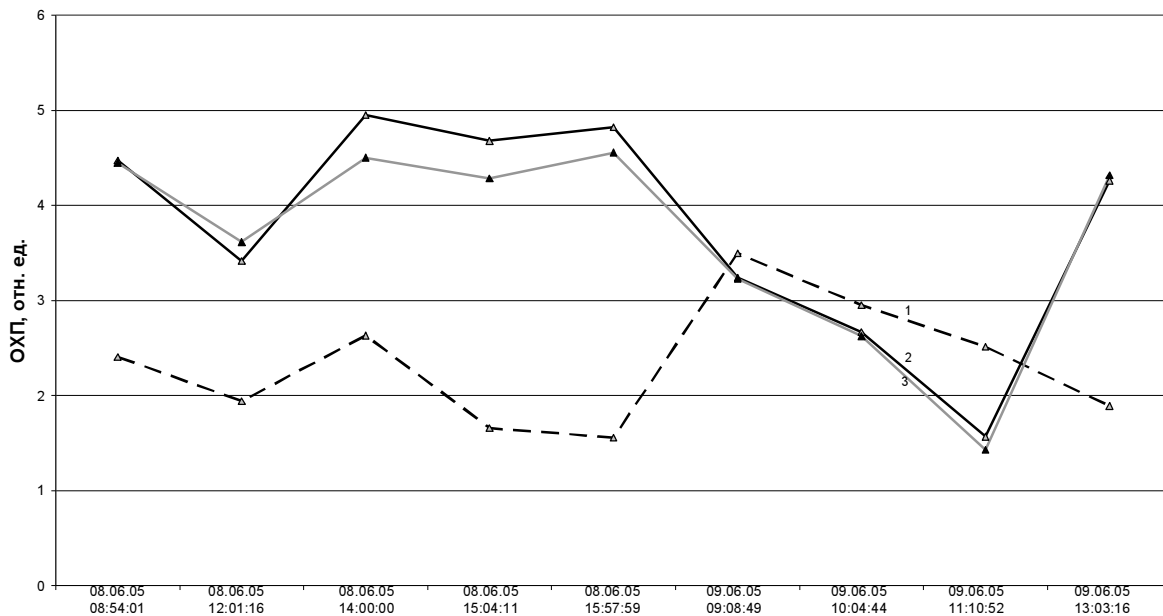


Рис. 1. Временной ход рассчитанных ОХП: 1 – γ_r ; 2 – γ_g ; 3 – γ_b (см. пояснения в тексте)

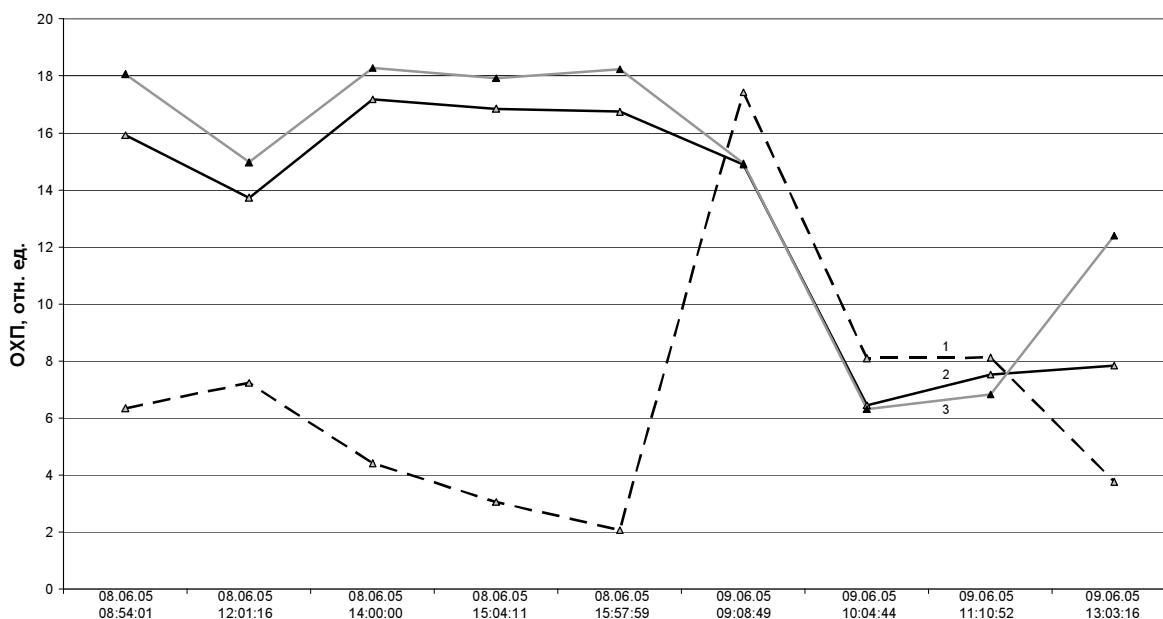


Рис. 2. Временной ход рассчитанных ОХП: 1 – r_r ; 2 – r_g ; 3 – r_b (см. пояснения в тексте)

По радиометрическим данным, в соответствии с методикой, описанной авторами в [2], восстанавливали спектры кривизны $B(\lambda)$ морской поверхности в диапазоне длин поверхностных волн λ от 2 мм до 8 см. Радиометрические данные для каждого из восстановленных спектров были получены синхронно с одной из пар фотографий морской поверхности (рис. 3). В качестве характеристических параметров (РХЧ), полученных из радиометрических данных, брали амплитуды синхронных с фотографиями спектров кривизны $B(\lambda)$ на фиксированных длинах волн λ : 0,21 см; 0,30 см; 0,43 см; 0,63 см; 0,91 см; 1,30 см; 1,88 см; 2,69 см; 3,88 см; 5,61 см; 8,02 см. В результате получили 11 временных рядов РХЧ (рис. 4), синхронизированных с 6 временными рядами ОХЧ.

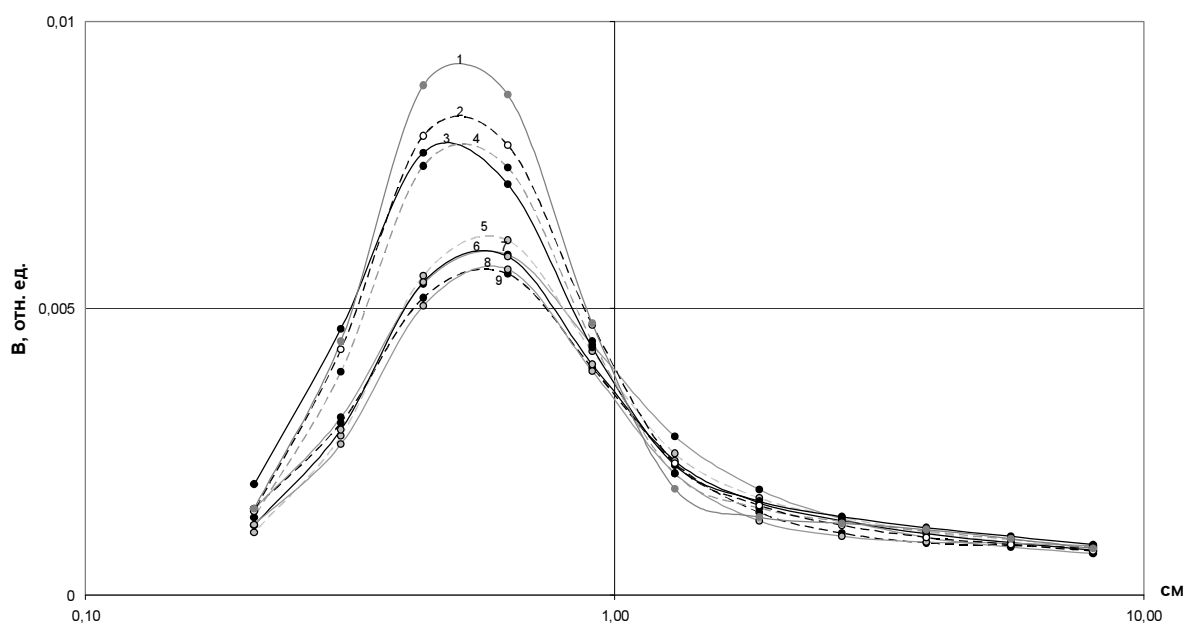


Рис. 3. Восстановленные по радиометрическим данным спектры кривизны волнения $V(\lambda)$: 1–4 – данные за 09.06.05 с 09:11 по 12:16; 5–9 – данные за 08.06.05 с 09:07 по 16:08

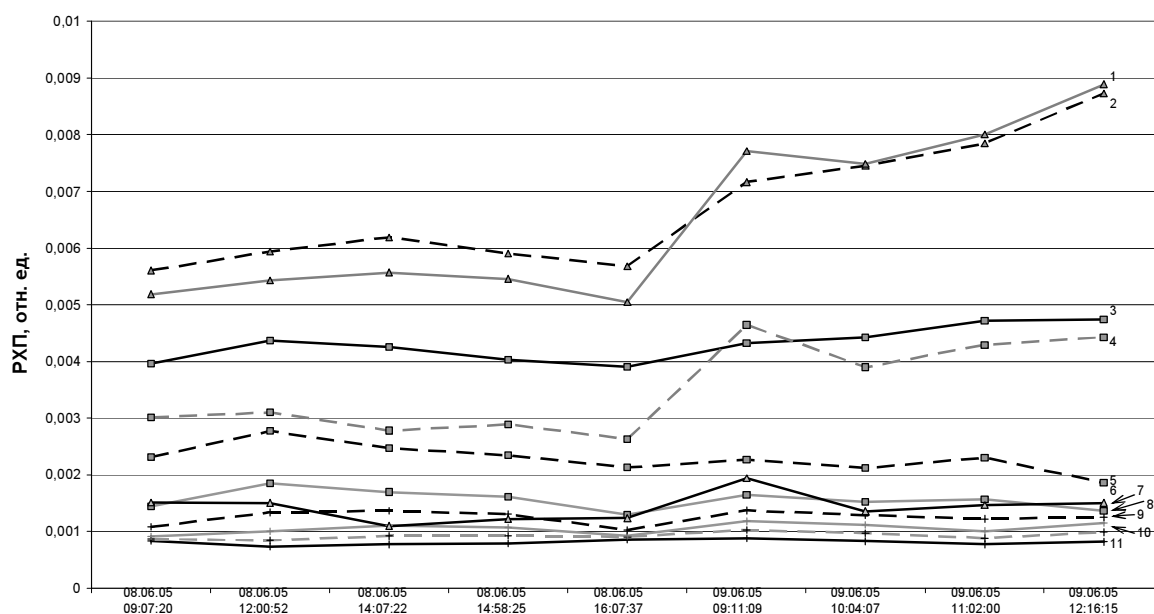


Рис. 4. Временной ход рассчитанных RXI (см. пояснения в тексте): 1–11 – $\lambda = 0,43$ см; 0,63 см; 0,91 см; 0,30 см; 1,30 см; 0,21 см; 1,88 см; 2,69 см; 3,88 см; 5,61 см; 8,02 см соответственно

Сопоставление временных рядов ОХП (рис. 1, 2) и RXI (рис. 3) выявляет на многих из них особенность, возникающую при смене даты и произошедшую синхронно с ростом скорости приповерхностного ветра. С целью детального изучения взаимосвязи ОХП и RXI была рассчитана взаимная корреляция всех возможных пар, составленных из одного временного ряда ОХП и одного временного ряда RXI. При этом, выбор ряда RXI можно рассматривать как селекцию по волновому числу спектра ГКВ, а выбор ряда ОХП – как селекцию по диапазону видимого спектра. Таким образом, была открыта принципиальная возможность экспериментального исследования селективной чувствительности ОХП к вариациям спектра кривизны поверхностного волнения в различных участках диапазона ГКВ.

Обсуждение результатов

Расчитанные коэффициенты корреляции ρ временных рядов ОХП γ_r , γ_g , γ_b с временными рядами РХП приведены на рис. 5. Значения корреляции временного ряда γ_r с каждым из рядов РХП отмечены ромбами; ряда γ_g с каждым из рядов РХП – треугольниками; ряда γ_b с каждым из рядов РХП – квадратами. Для наглядности, метки одного типа соединены пунктирными кривыми. Как было сказано выше, выбор временного ряда РХП фактически означает селекцию по волновому числу спектра ГКВ, т.е. узкому диапазону длин гравитационно-капиллярных волн на морской поверхности. Поэтому, на оси абсцисс отложены длины ГКВ в сантиметрах; абсцисса каждой отложенной точки равна длине волны, для которой построен соответствующий временной ряд РХП. Таким образом, рис. 5 иллюстрирует чувствительность (в смысле корреляционной связи) γ_r , γ_g , γ_b к вариациям восстановленного по радиометрическим данным спектра ГКВ на заданных длинах поверхностных волн.

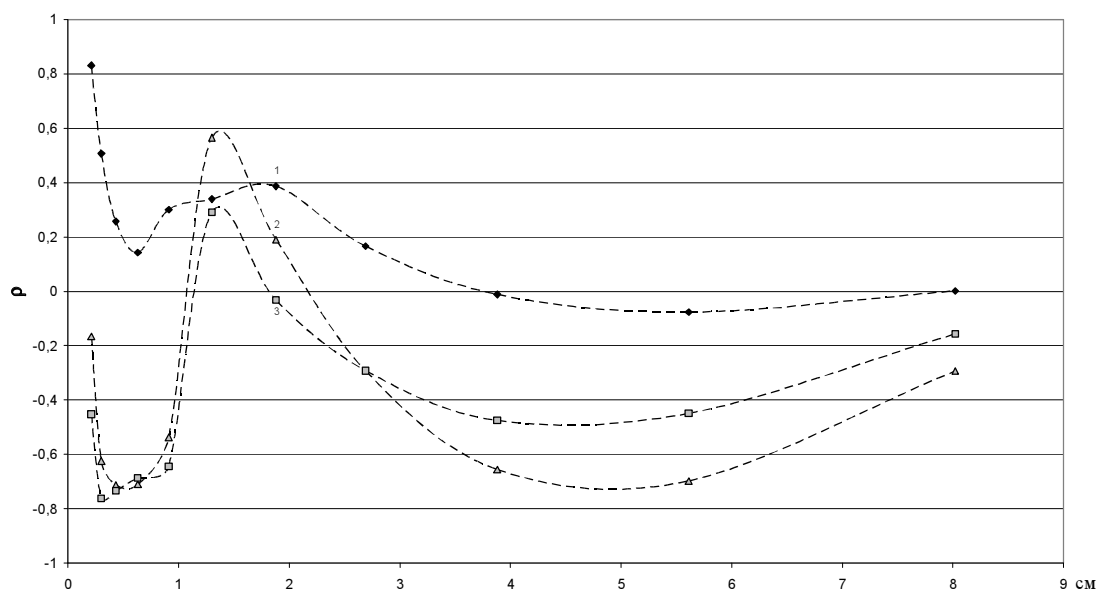


Рис. 5. Корреляция рядов ОХП (1 – γ_r ; 2 – γ_g ; 3 – γ_b) и РХП: (см. пояснения в тексте)

Видно, что максимальные по модулю значения ρ достигаются для коротких (менее 1 см) длин ГКВ. В этом диапазоне ГКВ оптический параметр γ_r положительно коррелирован с соответствующими рядами РХП, а γ_g и γ_b – отрицательно коррелированы с этими же рядами. Важный факт состоит в том, что параметр γ_r максимально коррелирован с РХП для самой короткой из исследованных длин ГКВ – 0,21 см. Для параметров γ_g , γ_b максимумы модуля ρ приходятся на длины ГКВ 0,43 – 0,63 см и 0,30 см соответственно.

Таким образом, экспериментальные данные согласуются с теоретической моделью [1], согласно которой введенные оптические параметры обладают селективной чувствительностью к вариациям спектра ГКВ, причем максимум чувствительности приходится на область миллиметровых и субмиллиметровых волн (вследствие их большей крутизны).

Также были рассчитаны коэффициенты корреляции ρ временных рядов ОХП r_r , r_g , r_b с временными рядами РХП. Их значения приведены на рис. 6. Видно, что в целом, рис. 6, воспроизводит те же особенности корреляционной связи параметров ОХП и РХП, что и разобранные ранее на рис. 5. Основное отличие состоит в том, что для параметров r_g , r_b максимум модуля ρ смещается в сторону более длинных волн (0,63 – 0,91 см) по сравнению с его положением для параметров γ_g , γ_b .

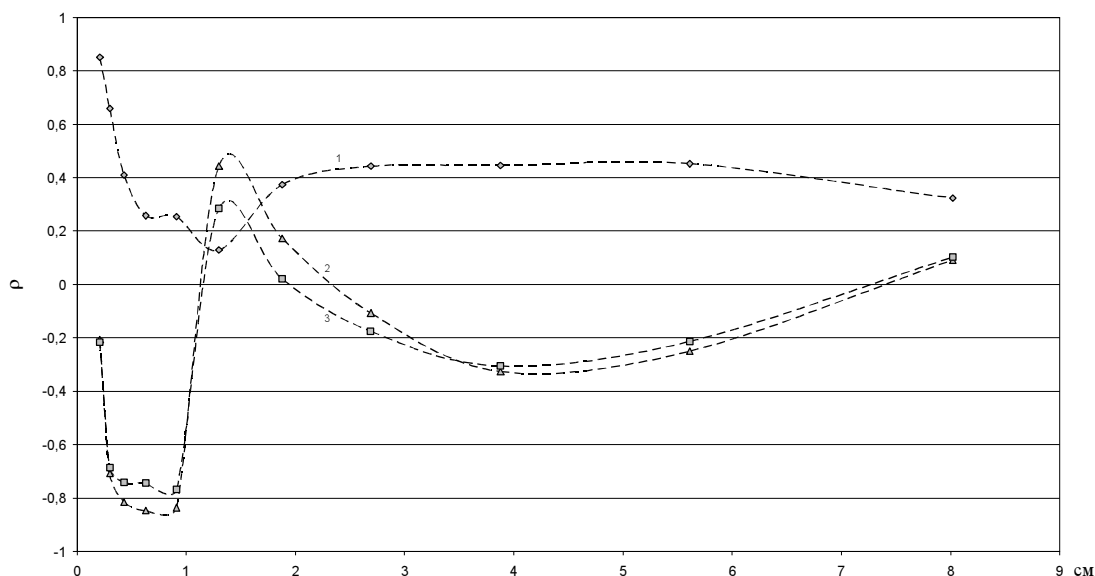


Рис. 6. Корреляция рядов OXII (1 – r_r ; 2 – r_g ; 3 – r_b) и PXII: (см. пояснения в тексте)

Следует отметить, что обсужденные выше экспериментальные результаты были получены на ограниченном материале (18 фотографий и суточные радиометрические и метеорологические измерения). Эти ограничения были обусловлены как модельными требованиями (определенной метеорологической обстановкой, состоянием морской поверхности, освещенностью и др.), так и самой методикой измерений. В развитие настоящей работы авторы планируют выполнить анализ данных, полученных в серии комплексных экспериментов «Кацивели-2007», в которых, в частности, удалось производить непрерывную фотосъемку морской поверхности с периодичностью 10 минут по 7 – 8 часов в сутки.

Выводы

Основные выводы по настоящей работе могут быть резюмированы следующим образом:

1. Экспериментально подтверждена чувствительность введенных в [1] оптических параметров к вариациям спектра ГКВ, восстановленного по данным СВЧ радиометрических измерений.
2. Установлено, что введенные оптические параметры наиболее чувствительны к вариациям ГКВ в коротковолновой области (длины волн 2 – 6 мм).
3. Обнаружена селективность введенных оптических параметров: параметры в «красном» диапазоне спектра чувствительны к ГКВ порядка 2 мм, в «зеленом» и «синем» диапазонах – к ГКВ порядка 4 – 6 мм и 3 мм соответственно.

Работа выполнена при поддержке гранта INTAS 03-51-4789.

Литература

1. Ермаков Д.М., Смирнов М.Т. Комплексное использование разнотипных данных в задачах дистанционного зондирования океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: GRANP polygraph, 2005. Т. 2. С.93-102.
2. Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Садовский И.Н. Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности в прибрежной зоне Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: GRANP polygraph, 2005. Т. 2. С.103-110.