

МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

А.В. Кузьмин, М.Н. Поспелов, И.Н. Садовский

Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: alexey.kuzmin@iki.rssi.ru

В работе описывается серия экспериментов под общим названием «Геленджик» по дистанционному зондированию морской поверхности, проводившихся в 1999 – 2004 гг. Исследования, проведенные на базе Южного отделения Института океанологии РАН, были организованы Институтом космических исследований РАН совместно с рядом институтов РАН и университетов. Измерения осуществлялись с помощью радиометров и поляриметров с рабочими длинами волн от 0,3 до 27 см. Целью экспериментов было: развитие радиометрических методов дистанционной диагностики океана и атмосферы; исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы в прибрежной зоне; решение ряда прикладных задач, таких как дистанционное измерение вектора приповерхностного ветра, дистанционного измерения параметров спектра гравитационно-капиллярного волнения (ГКВ) на морской поверхности с использованием уникальных возможностей нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРРС). Полученные результаты могут использоваться для интерпретации спутниковых данных и разработки новых алгоритмов определения параметров морской поверхности по многоканальным радиометрическим измерениям с аэрокосмических носителей.

Общая характеристика эксперимента

Натурные комплексные радиофизические исследования проводились ежегодно в период с июня по сентябрь в 1999–2004 гг. [1]. Измерения выполнялись с конца пирса (рис. 1) Южного отделения института океанологии РАН им. П.П. Ширшова. Глубина моря в точке установки аппаратуры 7,5 м. Микроволновые приборы ИКИ РАН и приборы для измерения характеристик ветра и волнения были размещены на судовой контейнерной лаборатории, установленной на конце пирса в Голубой бухте на расстоянии 200 м от берега, на высоте от 3 до 8 м над уровнем моря. На рис. 2 изображен общий вид контейнерной лаборатории и установленных приборов.

Установка радиофизических приборов на крыше контейнерной лаборатории и на выносной штанге дала возможность:

- 1) точной юстировки диаграмм направленности антенн и положения плоскости поляризации;
- 2) проведения абсолютных калибровок с высокой точностью;
- 3) проведения гидрометеорологических измерений, совмещенных во времени и пространстве с радиофизическими измерениями;
- 4) проведения измерений в широком диапазоне углов зондирования и азимутальных углов;
- 5) проведения измерений 24 часа в сутки.

Сканирующий комплекс микроволновых радиометров

Комплекс микроволновых радиометров и радиометров-поляриметров диапазонов длин волн 0,3; 0,5; 0,8; 1,5 и 8 см был установлен на поворотно-сканирующей платформе, которая крепилась на 6-метровом выносе на конце пирса (на рис. 2 обозначен 1). Радиометры были закреплены таким образом, что могли поворачиваться относительно горизонтальной оси на 170°, т.е. изменение угла визирования происходило практически от nadира до зенита. Сканирование по азимуту осуществлялось за счет поворотного устройства в нижней части платформы. Изменение азимута производилось в секторе 320°. Внешний вид поворотно-сканирующей платформы представлен на рис. 3. Этот комплекс радиометров был предназначен для изучения угловых зависимостей радиояркостной температуры морской поверхности, разработки методик исследования поверхностного волнения, определения скорости приповерхностного ветра, а также для решения ряда других задач.

Комплекс приборов дм-диапазона

Комплекс приборов дм-диапазона был представлен радиометрами на длины волн 6, 8, 18 и 27 см. Этот комплекс приборов предназначался для измерения температуры и солености поверхности моря. Радиометры располагались на раме, которая, в свою очередь, крепилась на 3-х координатной поворотной платформе. Поворотная платформа располагалась на крыше морского контейнера. Угол визирования радиометров можно было менять от 40° по отношению к nadиру до зенита.



Рис. 1. Снимок Голубой бухты, сделанный с борта самолета



Рис. 2. Общий вид контейнерной лаборатории



Рис. 3. Сканирующий комплекс микроволновых радиометров

Контактные приборы

Комплекс экспедиционной аппаратуры, созданный в ИКИ, включал в себя также следующие приборы и оборудование для контактных измерений:

- измерители скорости и направления ветра. В 2004 году использовался акустический анемометр (в составе метеокомплекса АЦАТ-3М), позволяющий определять горизонтальную и вертикальную составляющие скорости ветра (на рис. 2 обозначен 2);
- струнный волнограф для регистрации колебаний морской поверхности в точке установки. В экспедиции «Геленджик - 2004» были проведены испытания решетки струнных волнографов, которая позволила определять пространственно-временную структуру волнения (на рис. 2 обозначен 3);
- датчики для измерения температуры воды, воздуха и калибровочного «черного тела» (на рис. 2 обозначены 4);
- датчик атмосферного давления (в составе метеокомплекса АЦАТ-3М);
- датчик измерения солености и электропроводности воды, предоставленный ЮО ИО РАН.

Микроволновые измерения ИКИ РАН были удачно дополнены измерениями, проведенными сотрудниками ИФА РАН с помощью ИК-тепловизора. Кроме того, сотрудники ИФА обеспечили измерение турбулентных пульсаций ветрового потока и температуры в различных метеоусловиях.

Результаты экспериментальных исследований

В качестве типичного примера результатов рассмотрим данные, полученные 14 августа 1999 г. (данные этого года обработаны наиболее полно). В этот период ветер был направлен с моря, и при этом его скорость сначала быстро увеличивалась от $1,5 \div 2$ м/с до 7 м/с, а затем постепенно уменьшалась до значений порядка 1 м/с. Динамика скорости ветра, температура воздуха и воды показаны на рис. 5. Радиояркостные контрасты наиболее характерных моментов показаны на рис. 6: 1 – начальный период усиления ветра $V = 4,8$ м/с; 2 – максимум скорости ветра $V = 6,0$ м/с; 3 – уменьшение скорости ветра $V = 3,8$ м/с; 4, 5 – стадия затухающего волнения $V = 2,4$ и 2,0 м/с; 6, 7 – практически штилевые условия $V = 1,2$ и 1,4 м/с. Каждая из кривых является результатом усреднения данных на трех вертикальных сканах. Видно, что наибольшие изменения радиояркостной температуры происходят на углах, близких к углу Брюстера, на вертикальной поляризации. Для вертикальной поляризации имеет место изменение знака контраста при углах около 55° ; ранее этот факт неоднократно отмечал-

ся в различных экспериментах. Данные на углах менее 25° можно использовать для исследования влияния скорости ветра на тепловое излучение морской поверхности.

На рис. 6 также построены результаты моделирования для минимальной скорости ветра (сплошная кривая без символов). В этом случае рябь на поверхности моря отсутствует и радиояркостный контраст полностью определяется уклонами крупномасштабного волнения. Было обнаружено, что Гауссово распределение уклонов со среднеквадратичным уклоном $\sigma = 0,005$ отлично объясняет результаты измерений на вертикальной и горизонтальной поляризациях диапазона 0,8 см.

На рис. 3 можно заметить интересную особенность поведения радиояркостных температур, которая не была известна ранее. При уменьшении скорости ветра соответствующее уменьшение радиояркостного контраста происходит с некоторым запаздыванием. Более отчетливо это видно на рис. 7, где сравнивается временная динамика радиояркостного контраста горизонтальной поляризации на длине волны 0,8 см на различных углах наблюдения с измерениями скорости ветра. Из представленных результатов видно, что максимум радиояркостного контраста смещен примерно на один час по отношению к максимуму скорости ветра. Только для некоторых углов временной сдвиг отсутствует. Отметим, что подобное запаздывание отмечалось и на вертикальной поляризации диапазонов 0,3 и 0,8 см, а также для измерений в другие дни. Повидимому, эффект запаздывания связан с тем, что в прибрежной зоне происходит диссипация энергонесущих волн, которые достаточно инерционны по отношению к скорости ветра, хотя можно предложить и другие гипотезы для объяснения наблюдаемого эффекта.

Полученные данные позволили определить крутизну радиационно-ветровой зависимости. Для этого после усреднения результатов радиояркостный контраст был построен в зависимости от скорости ветра. Был отмечен нелинейный характер зависимости радиояркостной температуры от скорости ветра, особенно отчетливо проявляющийся на больших углах наблюдения. При этом на длине волны 0,3 см нелинейность оказалась сильнее, чем на длине волны 0,8 см.

На последнем этапе обработки данных проводилось определение спектров кривизны гравитационно-капиллярных волн и среднеквадратичного уклона гравитационных волн по методике, предложенной в работе [2]. Использовались только данные измерений радиометра диапазона 0,8 см. Как уже отмечалось выше, точность абсолютной калибровки (или точность знания диэлектрической проницаемости воды) на длине волны 0,3 см не являлась удовлетворительной и поэтому эти данные не использовались для восстановления спектров. Результаты восстановления спектра кривизны, усредненного по азимутальным направлениям, приводятся на рис. 8. Спектры построены для моментов времени отмеченных на рис. 5 теми же символами.

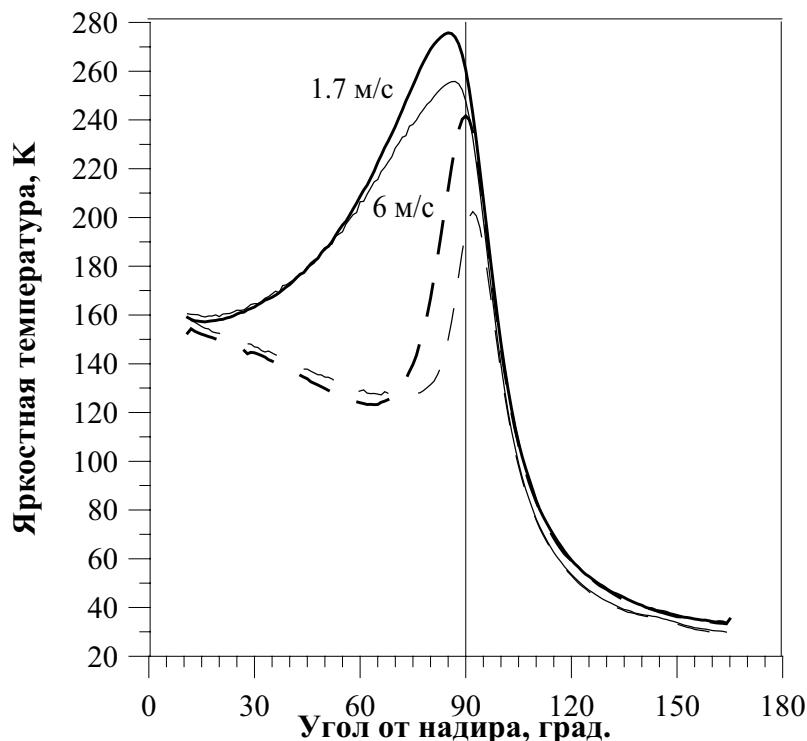


Рис. 4. Примеры радиояркостной температуры морской поверхности и атмосферы на длине волны 0,8 см. Пунктир – горизонтальная поляризация, сплошные линии – вертикальная поляризация. Более толстые линии соответствуют скорости ветра 1,7 м/с, тонкие линии – 6 м/с

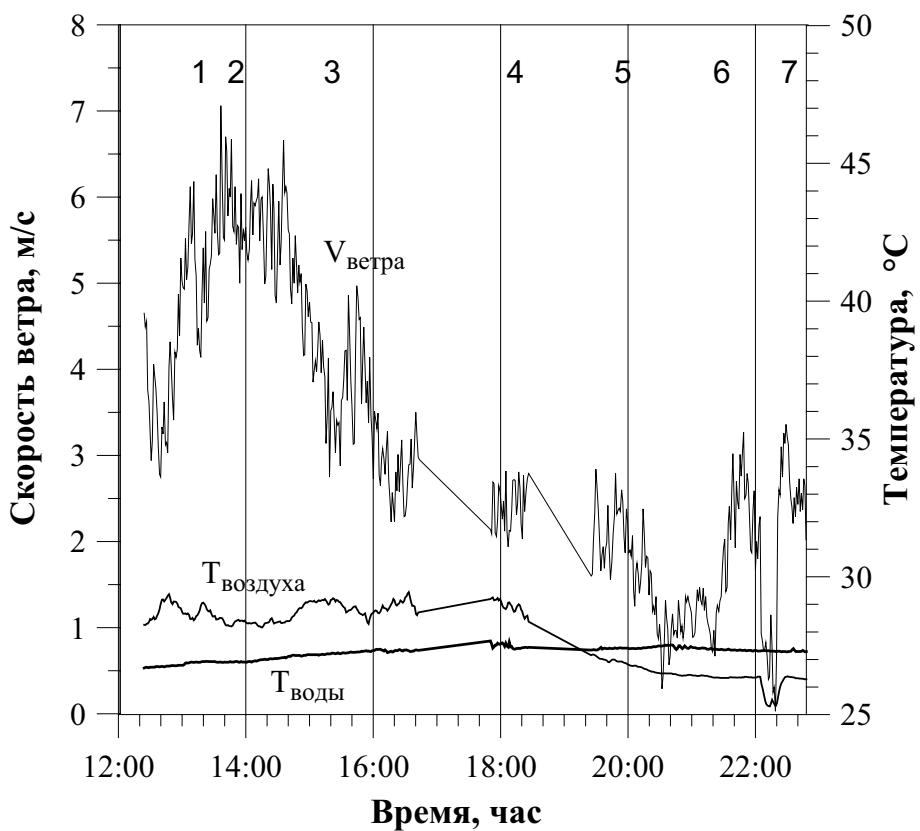


Рис. 5. Изменения скорости ветра, температур воздуха и воды 14-го августа 1999 г. Цифры, показанные в верхней части рисунка, обозначают моменты времени, для которых измеренный радиояркостный контраст дается на рис. 6

Данные радиометрических измерений подтвердили наличие вторичного максимума в спектрах кривизны в области волновых чисел, которым соответствует минимум фазовой скорости [3]. Из результатов следует, что положение максимума немного смещается в область более коротких волн при увеличении скорости ветра. Область «капиллярной отсечки», где вязкая диссипация становится доминирующим фактором, соответствует волновым числам около 10 рад/см.

Восстановление спектров кривизны позволило лучше понять природу гистерезиса в характере отклика радиояркостной температуры на изменения скорости приводного ветра. На рис.9 показан временной ход скорости ветра и спектральной плотности гравитационно-капиллярных волн в двух интервалах волновых чисел: 5-8 и 8-12 рад/см. Видно, что максимум спектральной плотности смещен относительно максимума скорости ветра на 1,5-2 часа. Интересно, что для уклонов гравитационных волн, показанных на рис. бв, подобное запаздывание отсутствует. Напротив, резкое увеличение уклона возникает на начальном участке, когда происходит увеличение скорости ветра.

Заключение

Целью береговых экспериментов на базе ЮО ИО РАН была проверка оригинальных методик, разработанных в ИКИ РАН, для решения ряда фундаментальных и прикладных задач радиофизической диагностики природных сред.

Проведенные радиометрические измерения с пирса Южного отделения института океанологии РАН им. П.П. Ширшова позволили получить новые данные о радиоуплором излучении взволнованной морской поверхности. Установка измерительной системы на неподвижном основании обеспечила возможность точной юстировки и калибровки радиометров. Впервые построены зависимости радиояркостной температуры от скорости приводного ветра на различных углах наблюдения в миллиметровом диапазоне на длинах волн 0,8 и 0,3 см. Детально исследована динамика радиометрического отклика в условиях переменного ветра. Обнаружен новый эффект, заключающийся в том, что при уменьшении скорости ветра радиояркостная температура уменьшается с некоторым запаздыванием, величина которого составляет 1–2 ч. Радиояркостные контрасты диапазона 0,8 см использовались для определения спектра кривизны гравитационно-капиллярных волн и среднеквадратичного уклона крупных волн. Показано, что положение вторичного максимума находится в области волновых чисел, соответствующих минимуму фазовой скорости. Область ка-

пиллярной отсечки, где механизмы вязкой диссипации начинают играть доминирующую роль, находится на волновых числах около 10 рад/см.

Серии экспериментов, проведенные в г. Геленджике в 1999–2004 гг. на территории Южного отделения Института океанологии РАН, продемонстрировали, что Голубая бухта с прилегающими акваториями может с большим успехом использоваться как база для фундаментальных и прикладных радиофизических и океанологических исследований. Эта база может использоваться не только для проведения береговых измерений, но и должна развиваться как полигон подспутниковых измерений космических систем дистанционного зондирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 00-05-64508-а и 05-05-64451-а) и INTAS (проекты 97-10569 и 03-51-4789).

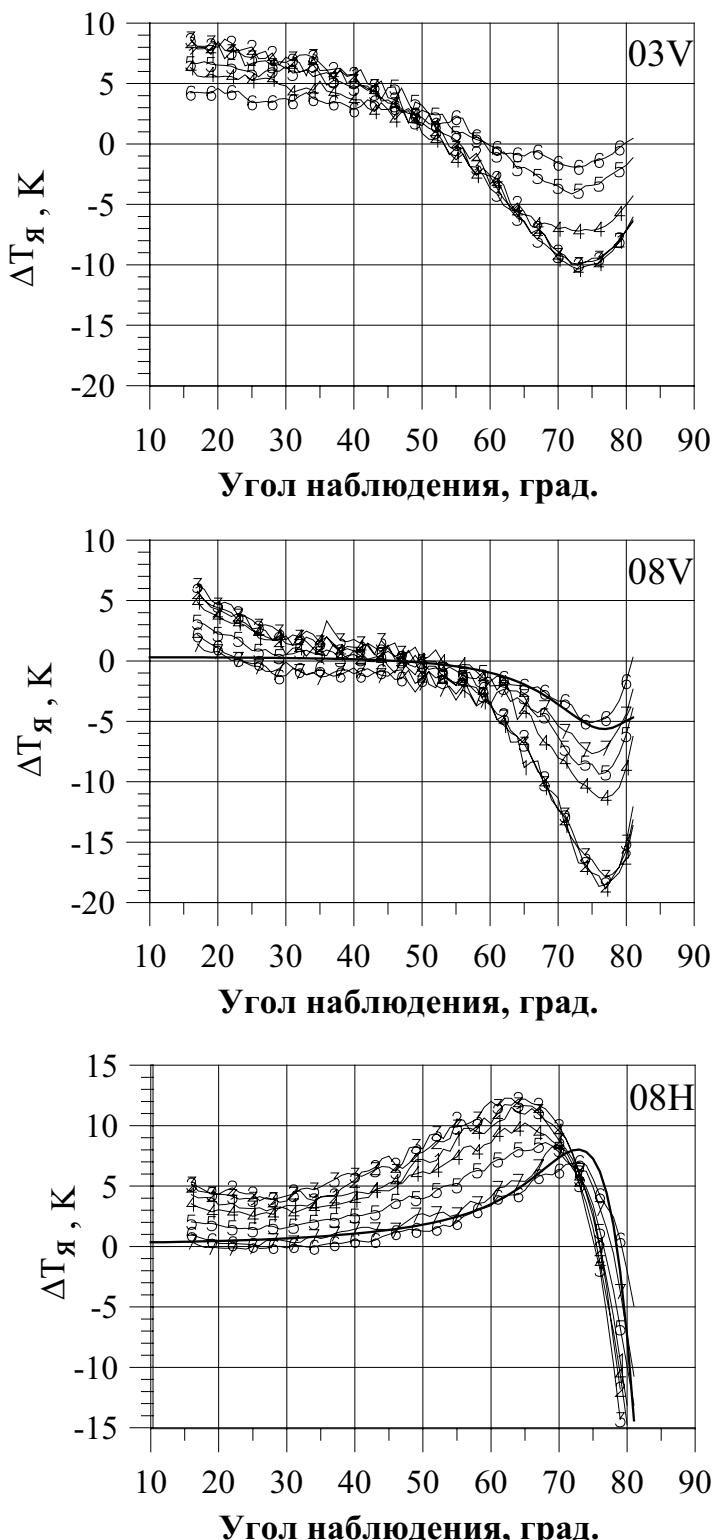


Рис. 6. Радиояркостный контраст на длинах волн 0,3 и 0,8 см. Вертикальная поляризация: длина волны 0,3 см (03V), длина волны 0,8 см (08V). Горизонтальная поляризация: длина волны 0,8 см (08Н). Моменты времени, соответствующие различным символам, показаны на рис. 5

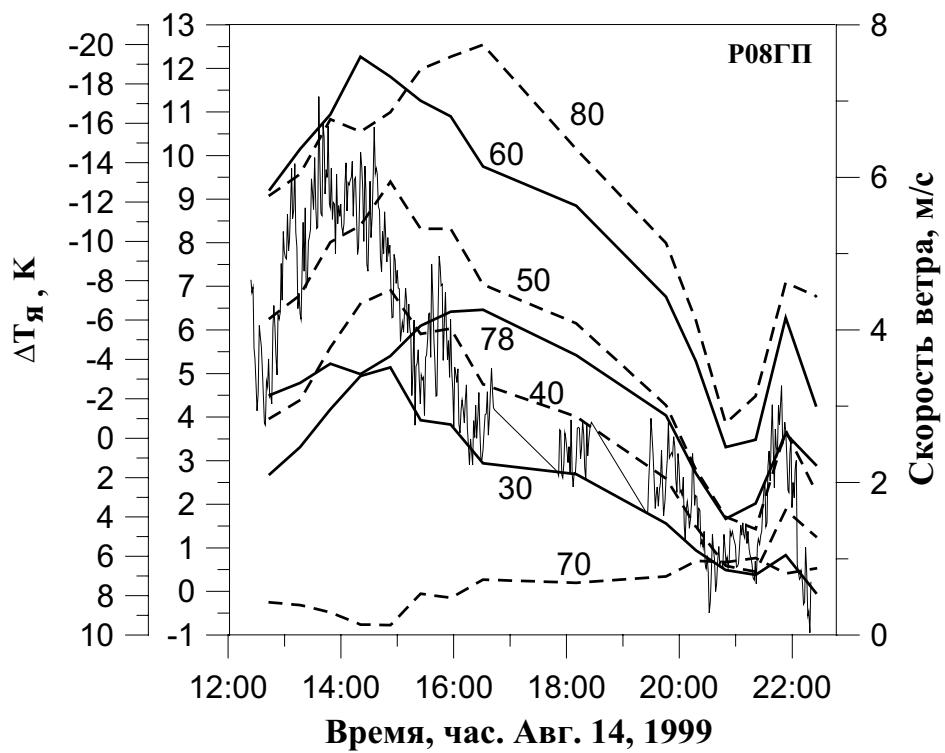


Рис. 7. Сопоставление динамики радиояркостного контраста на различных углах наблюдения с изменениями скорости ветра: длина волн 0,8 см, горизонтальная поляризация; цифры у кривых обозначают угол наблюдения. Для углов наблюдения 0° , 78° и 80° следует использовать инвертированную ось радиояркостного контраста

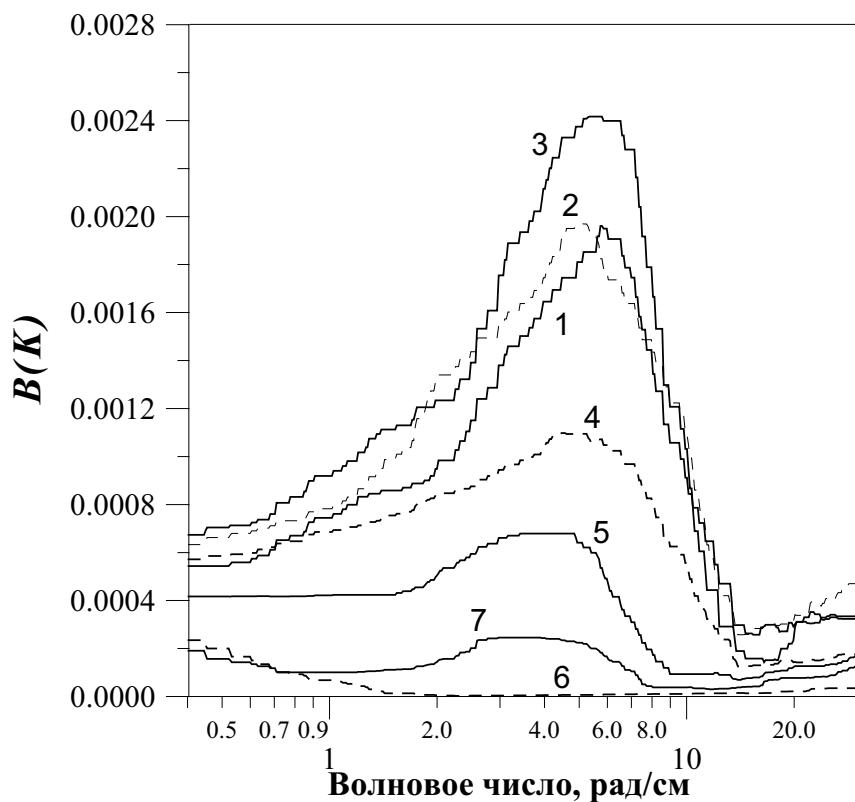


Рис. 8. Спектр кривизны, восстановленный по радиометрическим измерениям на длине волн 0.8 см. $B(K)$ – усредненная по азимутальному углу спектральная плотность. Цифры соответствуют рис. 5

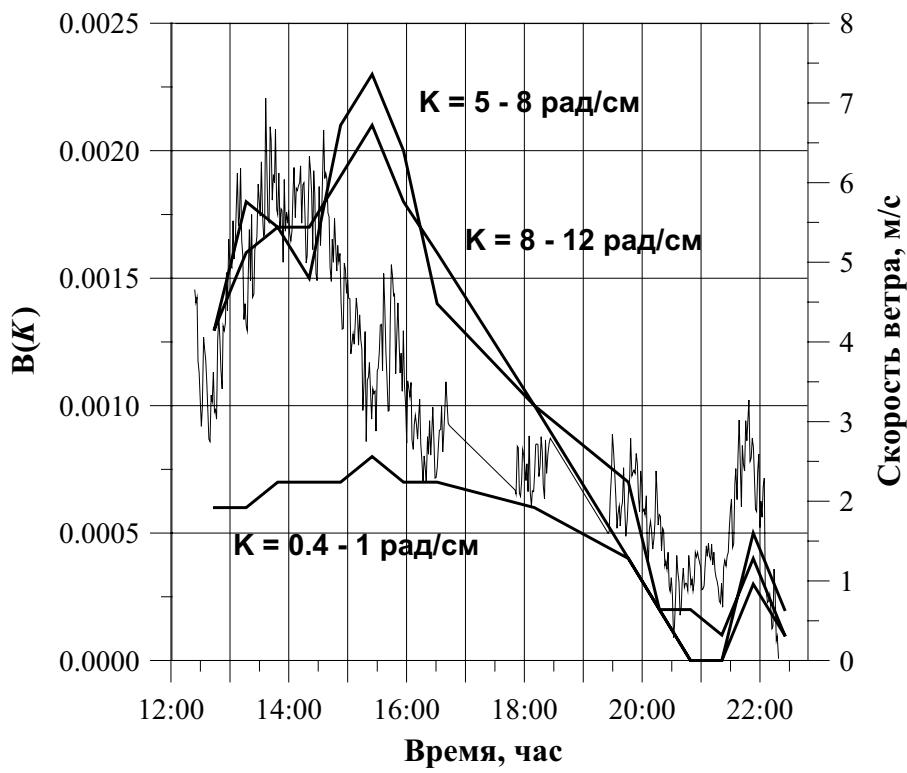


Рис. 9. Временная динамика спектральной плотности кривизны в различных интервалах гравитационно-капиллярной области. Тонкая линия показывает изменения скорости ветра.

Литература

1. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Раев М.Д., Скворцов Е.И., Александров Д.В. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик 1999-2000), М., КДУ, 143 с., 2003
2. Трохимовский Ю.Г. Модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // Исслед. Земли из космоса, 1997, № 1, с. 39-49.
3. Kuzmin A.V., Pospelov M.N. Retrieval of Gravity-Capillary Spectrum Parameters by Means of Microwave Radiometric Techniques // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 43, No.5, 2005.