

Результаты натурных измерений интенсивности излучения взволнованной морской поверхности на статичных углах зондирования

И.Н. Садовский, Д.С. Сазонов, А.В. Кузьмин

*Институт космических исследований Российской академии наук
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.*

E-mail: ilya_nik_sad@mail.ru

Представлены результаты обработки данных натурного эксперимента по исследованию принципов формирования собственного радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности. Целью работы было выделение корреляционных связей между уходящим излучением системы «морская поверхность - атмосфера» и состоянием границы ее раздела. Излучение регистрировалось двумя радиометрами-поляриметрами с рабочей длиной волны 8 мм на четырех линейных поляризациях. Геометрия морской поверхности определялась с помощью лазерного волнографа. Основным результатом можно считать демонстрацию эффекта смены доминирующего источника излучения при скоростях ветрового потока 5-6 м/с.

Ключевые слова: морская поверхность, яркостная температура, радиометр, ветровое волнение

Results of in-situ measurements of rough sea-surface radiothermal radiation at static viewing angles

I.N. Sadovsky, D.S. Sazonov, A.V. Kuzmin

*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences
Profsoyuznaya street, 84/32, Moscow, 117997, Russia*

E-mail: ilya_nik_sad@mail.ru

The results of data processing from a field experiment aimed at studying the principles of formation of rough sea surface radiothermal radiation are presented. The main task of this work was to identify correlations between the outgoing radiation of the sea surface-atmosphere system and the state of its interface. The radiation was recorded by two radiometer-polarimeters with an operating wavelength of 8 mm at four linear polarizations. The geometry of the sea surface was determined using a laser wave recorder. The main result can be considered a demonstration of the effect of changing the dominant radiation source at wind flow speeds of 5-6 m/s.

Keywords: sea surface, brightness temperature, radiometer, wind waves

Введение

В последнее время основным направлением развития дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса методами пассивной радиометрии является использование полуэмпирических моделей формирования и переноса радиотеплового излучения, составленных на обобщении результатов глобальных измерений, привлечении нейронных сетей и баз данных реанализа. Это позволяет достаточно оперативно формировать продукты ДЗЗ на основе постоянно поступающих спутниковых измерений. Возникающие при этом локальные ошибки решения обратных задач, обусловленные выходящими за пределы обучающих выборок значениями отдельных параметров изучаемого объекта, обычно исключают из готового продукта или устанавливают для них низкий уровень достоверности. В «проблемные» области традиционно попадают внутренние водоемы, шельфовые зоны, районы с экстремально

высоким уровнем волнения и т.п. Для них в большом количестве создаются и постоянно модернизируются «региональные» модели, ориентированные на такие «нештатные» значения параметров. При этом очевидно, что создать полный набор таких моделей под все многообразие возможных ситуаций физически невозможно. По мнению авторов настоящей работы, решением обозначенной проблемы является использование не полуэмпирических моделей, а их строгих, хорошо обоснованных теоретических аналогов с достаточным набором входных параметров, работающих корректно даже при выходе их значений за пределы среднестатистических.

Модель формирования и переноса излучения в системе «океан-атмосфера», описанная в [1] и традиционно развиваемая коллективом сотрудников Института космических исследований РАН, имеет в основе ряд ограничений и приближений, не позволяющих считать ее завершенной. Авторы уверены, что главным сдерживающим фактором на пути развития этой модели продолжительное время являлось отсутствие надежного инструмента определения характеристик ветровых волн/геометрии границы раздела водная поверхность/атмосфера. В работах [2-4] была описана новая методика исследования структуры ветрового волнения, основанная на использовании лазерного излучения. Особенностью предложенного авторами этих работ подхода является возможность совмещения нескольких режимов работы лазерного волнографа, каждый из которых ориентирован на определение характеристик отдельных диапазонов волновых гармоник, начиная с длинных энергонесущих компонент и заканчивая прецизионными измерениями высокочастотной части капиллярного волнения.

В июле 2025 года, при участии авторов настоящей публикации был проведен натурный эксперимент по исследованию собственного микроволнового излучения морской поверхности [5]. Измерения выполнялись на стационарной гидрофизической платформе в Черном море близ пгт Качивели (республика Крым) на базе Центра коллективного пользования «Морские исследования и технологии» Морского гидрофизического института РАН. Особенностью указанного эксперимента стало использование упомянутого выше лазерного волнографа для оценки состояния водной поверхности при выполнении синхронных измерений собственного микроволнового излучения, ей (поверхности) соответствующего.

Описанию основных результатов данного эксперимента и посвящена содержательная часть данной работы.

Общая характеристика экспериментальных данных

В рамках выполненных экспедиционных работ проводились измерения интенсивности излучения морской поверхности двумя идентичными радиометрами-поляриметрами 8-мм диапазона. Для изменения их ориентации использовалась автоматическая сканирующая платформа «Траверс-2» (разработанная сотрудниками ИКИ РАН [6]). В 2025 году было принято решение о переходе на новую программу проведения измерений. Вместо непрерывного сканирования, с постоянно меняющимися углами места θ и азимута φ , был определен набор фиксированных значений углов места θ (40° , 53° и 65°) и φ (80° , 125° , 170° и 260°) на которых последовательно выполнялись измерения с временем накопления сигнала 20 сек. Это позволило не только повысить точность измерения шумовых радиометрических сигналов, но и сократило время сбора полного набора измерений (и служебной информации) до 20 минут. Другими словами, в условиях динамически меняющихся условий волнообразования, информация об излучении морской поверхности получалась три раза за час.

Без описания детальной процедуры обработки экспериментальных данных, выделим основные ее этапы: калибровка [7] обоих радиометрических приемников на

всех поляризациях принимаемого излучения (вертикальной, горизонтальной и двух, повернутых относительно вертикальной на ± 45 градусов); теоретическая оценка интенсивности излучения гладкой водной поверхности при тех же параметрах водной среды и приземного слоя атмосферы, что и при выполнении каждого конкретного измерения в экспедиции; расчет величины яркостных контрастов (суть – разница экспериментально измеренного значения яркости и ожидаемого излучения гладкой поверхности) [8]; исключение из всего набора измерений тех значений, которые были получены в условиях сильной облачности, дождя или априори известном влиянии на результаты источников постороннего излучения. В силу того, что частота обновления радиометрической информации и соответствующих измерений лазерного волнографа была различной, финальным этапом обработки экспериментальных данных была интерполяция оптических измерений на временную сетку, соответствующую измерениям радиометров.

В работе анализируются данные, полученные в период с 20 по 29 июля 2025 года. В этом интервале скорость ветра менялась в диапазоне от 0 до 15 м/с. При этом можно выделить три преобладающих направления ветрового потока (цветовая шкала на рис. 1): 230 – 280 градусов (юго-западное), 30 – 100 градусов (северо-восточное) и 330 – 360 градусов (северное). Первые два диапазона представляют наибольший интерес с точки зрения проводимых исследований в силу следующих особенностей: период 21-24 июля характеризуется стабильным юго-западным направлением ветра с умеренной амплитудой (0-10 м/с) и трижды наблюдаемым его суточным ростом/затуханием; 27-29 июля скорость ветрового потока монотонно росла на протяжении полутора суток от 0 до 15 м/с со стабильным северо-восточным направлением.

В указанные периоды лазерный волнограф функционировал в режиме трёхточечных измерений, позволяющих с частотой 30 Гц определять высоту волнения в каждой из них [9]. Лучи располагались в вершинах прямоугольного равнобедренного треугольника с катетами 8 см. Это дало возможность вычислять мгновенные значения уклонов морской поверхности и говорить об исследовании поведения волновых компонент, длиннее 16 см. Данное значение было определено исходя из рабочей длины волны радиометрических приемников – $\lambda_0 = 8$ мм, и являлось верхней границей длинноволнового диапазона волнения (далее – длинные волны) для нее ($\Lambda_{\text{ГР}} = 20 \lambda_0$). Измерения выполнялись непрерывными сериями, каждая из которых составляла 9 минут, 3 серии в час. Полученные за время одной серии мгновенные значения уклонов формировали двумерное поле их распределения, пример которого представлен на рис. 2.

Подобные картины позволяли определять следующие параметры волнения: направление главной оси эллипса φ_W получаемого распределения относительно направления «на север» (здесь и далее – направление распространения волнения); значения дисперсии уклонов ветровых волн с пространственным периодом, длиннее $\Lambda_{\text{ГР}}$ – σ_X^2 и σ_Y^2 (для двух ортогональных направлений, переопределенных с учетом угла φ_W , - «по» и «поперек» волнения); коэффициенты асимметрии распределения уклонов для этих направлений: K_X^S и K_Y^S ; коэффициенты эксцесса K_X^E и K_Y^E двумерного распределения уклонов ветровых волн.

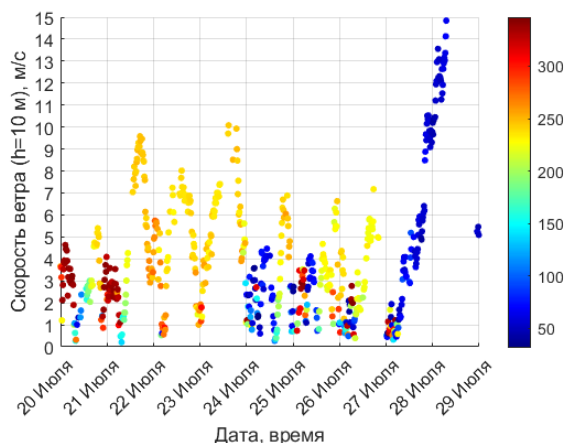


Рис. 1. Поведение вектора скорости ветра, приведенного к высоте $h = 10$ м. Цветовая шкала отражает ориентацию ветрового потока

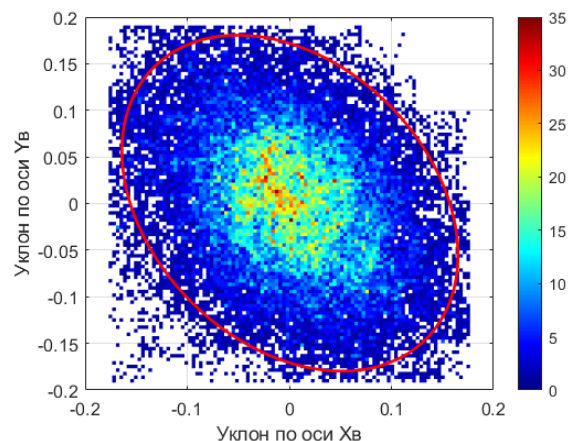


Рис. 2. Пример экспериментально измеренного двумерного распределения уклонов крупных волн в координатных осях волнографа.

Исследование корреляционной связи собственного излучения морской поверхности с параметрами функции распределения уклонов длинных волн

Расчет вклада длинноволновых компонент ветрового волнения в рамках двухмасштабной модели формирования излучения [1] проводится по методу Кирхгофа в приближении геометрической оптики. В рамках указанного подхода поверхность представляется в виде набора элементарных площадок (фацетов), характеризующихся своей пространственной ориентацией/уклоном, с последующей оценкой интенсивности излучения каждого элемента в направлении наблюдателя/прибора. Таким образом, двумерная функция распределения уклонов определяет степень влияния фацета с фиксированной ориентацией на результирующее значение яркости всей поверхности (более детально – см. [10]).

В приближении гауссовости распределения уклонов значения дисперсии в двух ортогональных направлениях («по» и «поперек» направления распространения волнения) полностью определяют ее вид. Соответственно, их вариации представляют первостепенный интерес с точки зрения радиометрических измерений.

Суть выполненных исследований сводилась к анализу диаграмм разброса величин яркостного контраста (на вертикальной и горизонтальной поляризациях) и измеренных волнографом значений дисперсии уклонов крупных волн в направлении их распространения (σ_X^2). Часть из полученных результатов анализа приведена ниже.

Как следует из рис. 3 – можно отметить практически полное отсутствие чувствительности яркости к вариациям дисперсии уклонов на малых вертикальных углах наблюдения (в эксперименте – 40°) на вертикальной поляризации принимаемого излучения. Этот эффект повторяется для всех азимутальных углов и любых начальных условий волнообразования и сохраняется в широком диапазоне значений дисперсии уклонов, вплоть до 0,013 (что соответствует вариациям уклонов поверхности $\pm 6,5^\circ$). Для угла места 65° зависимость излучения от σ_X^2 носит линейный (или близкий к линейному) характер для скоростей ветра 0-5 м/с (рис. 4), вызванное, скорее всего, возрастающей ролью переотраженного поверхностью излучения атмосферы.

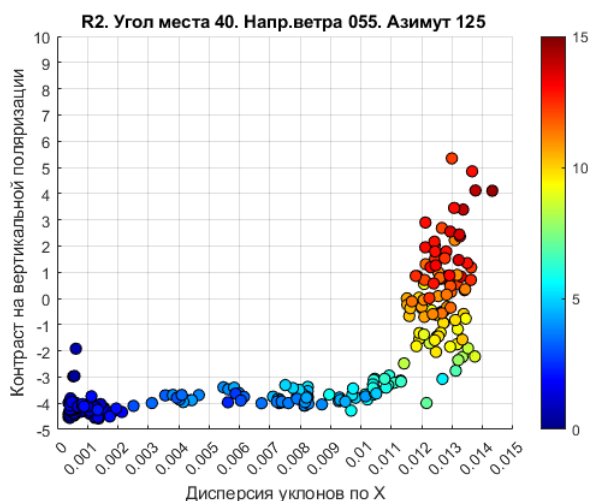


Рис. 3. Зависимость приращения яркости на вертикальной поляризации от дисперсии уклонов крупных волн. Параметры наблюдений даны в заголовке рисунка.

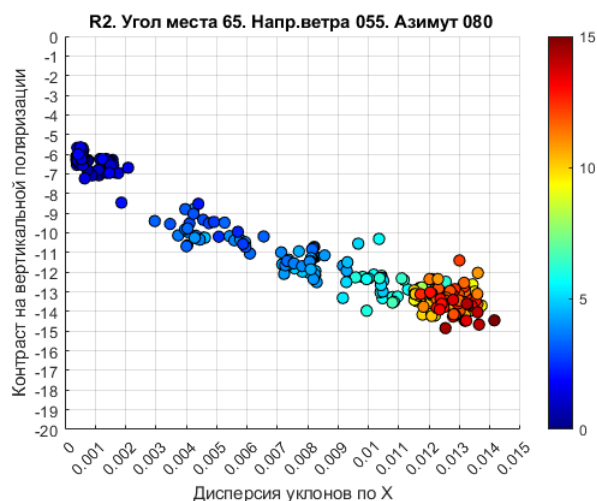


Рис. 4. Зависимость приращения яркости на вертикальной поляризации от дисперсии уклонов крупных волн. Цветовая шкала соответствует мгновенным значениям скорости ветра.

Отсутствие чувствительности к характеристикам длинноволновой части волнения позволяет выделить наиболее интересный результат исследований – смену доминирующего механизма генерации излучения при скоростях ветра 5-6 м/с, наблюдаемый в правой части рис. 3. Видно, что при достижении указанных скоростей, рост величины дисперсии практически прекращается, однако увеличение интенсивности ветрового воздействия сопровождается существенным ростом излучения поверхности. При этом у отмеченного эффекта на вертикальной поляризации имеется несколько особенностей. Во-первых, как показывают результаты эксперимента, его «запуск» зависит именно от интенсивности ветра (выше 5-6 м/с) и может наблюдаться при любых значениях дисперсии уклонов. Данная ситуация представлена на рис. 5, где для группы данных, относящихся к 21-23 июля (направление ветра 245°), режим дополнительной генерации был зафиксирован при значениях дисперсии 0,007 – 0,008, а для измерений 27-28 июля (направление ветра 55°) – при уровне развития волнения, характеризуемого значениями 0,012 – 0,013. При этом в момент «запуска» этого механизма генерации в обоих случаях скорость ветра была равна 5-6 м/с. Второй особенностью запуска дополнительного режима генерации излучения можно считать его практически полное отсутствие на вертикальном угле визирования 65° (рис. 4). Здесь наблюдается полная остановка роста излучения при достижении значений σ_X^2 некоторого значения (зависящего от условий волнообразования, но соответствующего каждый раз скорости ветра 5-6 м/с). При этом дальнейший рост скорости ветра (с 6 до 17 м/с) не приводит к изменениям яркости поверхности. Случай запуска дополнительного режима генерации на угле 65° был зафиксирован лишь в одной ситуации (см. рис. 6), когда радиометры были ориентированы «по» направлению распространения волнения.

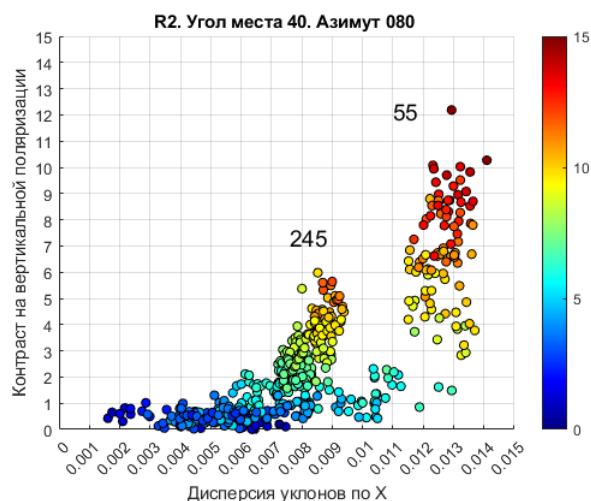


Рис. 5. К демонстрации «запуска» вторичного источника генерации излучения. Пояснения даны в тексте.

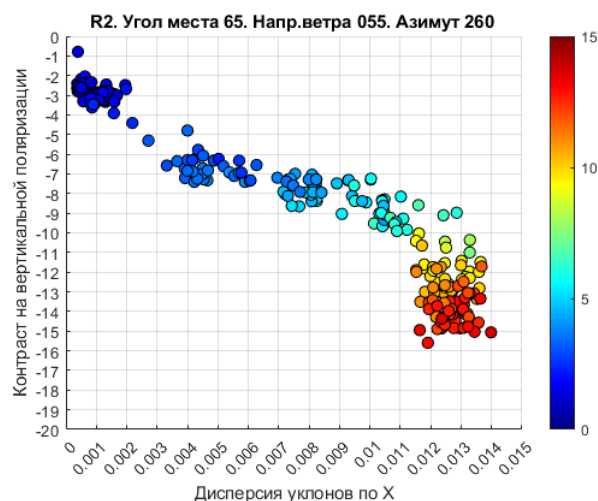


Рис. 6. Единственный случай «запуска» вторичного источника генерации для угла места 65° на вертикальной поляризации.

Отдельно следует остановиться на особенностях поведения ветровой зависимости на угле места 53°. Традиционно, измерения на этом угле считаются независимыми от состояния/геометрии поверхности и используются для решения задачи восстановления температуры поверхности океана (см. рис. 7). При этом режим подключения дополнительного источника излучения срабатывает здесь не всегда. При небольших скоростях ветра (<10-12 м/с) зависимость быстро приходит в насыщение и выполняется условие независимости излучения от скорости ветра (вариации не более 1-2 К). Однако при больших значениях ветрового потока (рис. 8) дополнительный источник вносит существенных вклад в изменение яркости (вплоть до 5 К при 17 м/с) и, что особенно важно, обладает существенной азимутальной анизотропией.

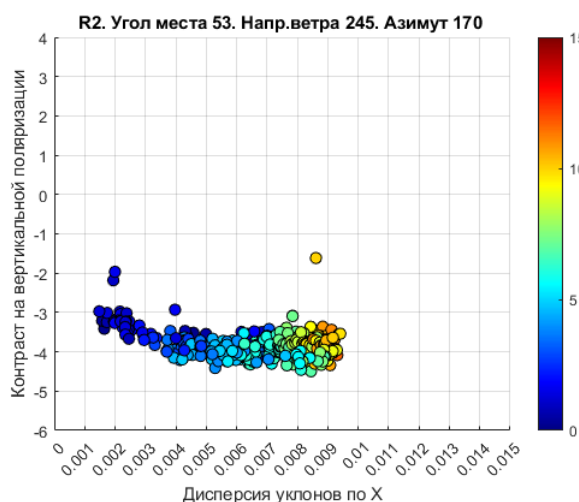


Рис. 7. Зависимость приращения яркости на угле места 53° от характеристик длинных поверхностных волн. Вертикальная поляризация.

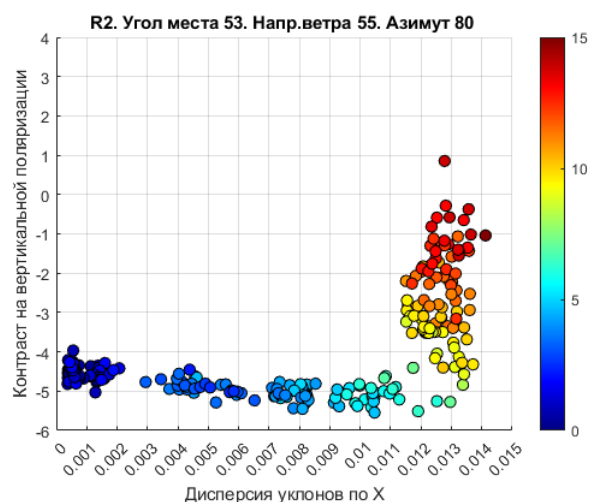


Рис. 8. Зависимость приращения яркости на угле места 53° от дисперсии уклонов с «включением» дополнительного механизма генерации излучения. Вертикальная поляризация.

На горизонтальной поляризации отклик радиотеплового излучения на изменение геометрии поверхности имеет, в большинстве случаев, большую амплитуду, чем на

вертикальной. Это позволяет с хорошей детальностью наблюдать эффект «насыщения» излучения, отмеченный ранее. Более того, удастся выделить несколько интервалов скоростей ветра, в которых излучение имеет характерные особенности поведения. На рис. 9 приведен пример подобного «каскадного» увеличения яркости. Возможно выделить следующие диапазоны скоростей ветра: 0-2, 2-5, 5-10, 10-14 и 14 и более м/с.

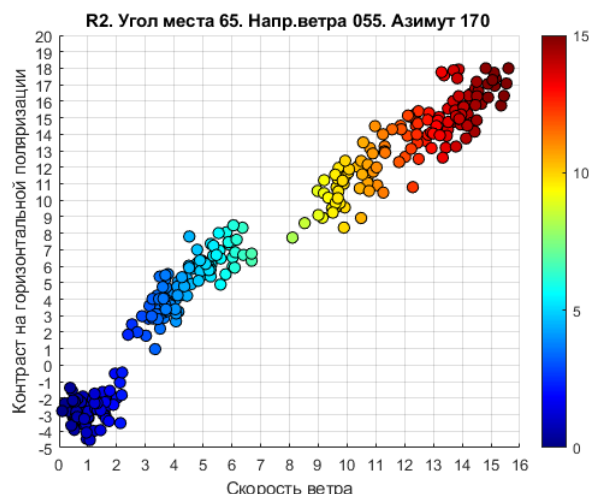


Рис. 9. Пример «каскадного» увеличения яркости на горизонтальной поляризации.

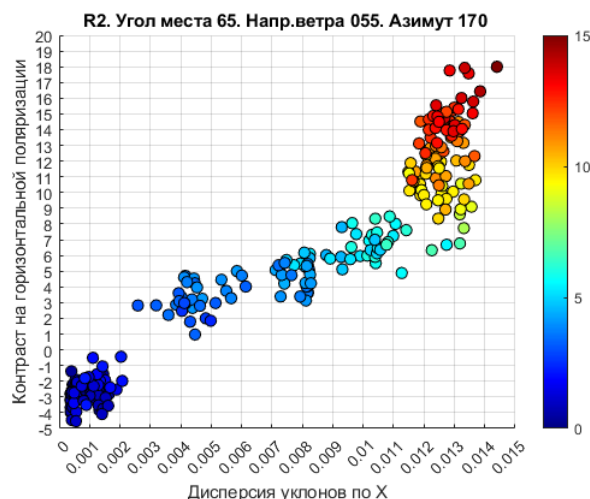


Рис. 10. Значения яркостного контраста, представленные на рис. 9, в виде зависимости от дисперсии уклонов крупных волн.

Совместное рассмотрение рис. 9 и 10, позволяет сделать заключение о том, что длинноволновые компоненты волнения оказывают значимое влияние лишь на первых двух интервалах. При этом инвариантность излучения в диапазоне 0-2 м/с, отмеченная для угла места 65° , скорее всего, вызвана тем, что возникающие неоднородности на поверхности имеют локальный характер и при большом пятне усреднения (как это имеет место при настильных углах наблюдения) занимают лишь часть излучающей поверхности. В то время как для меньших вертикальных углов и, соответственно, малых размерах пятна наблюдения, зависимость яркости от развития длинных волн присутствует даже в этом диапазоне скоростей ветра. Следует отметить, что продемонстрированный «каскадный» характер роста излучательной способности имеет ярко выраженную зависимость от азимутального угла, проявляющуюся по-разному с изменением скорости ветра.

Сохранение функциональной зависимости интенсивности излучения поверхности от дисперсии уклонов крупных волн при уже «подключившемся» дополнительном источнике генерации излучения (рис. 11) свидетельствует о том, что длинные волны продолжают оказывать влияние на общее значение яркости. При этом величина вклада зависит не только от вертикального угла наблюдения (рис. 12), но и от взаимной ориентации плоскости наблюдения и генерального направления распространения волнения. Последний факт может быть использован также для анализа пространственной неоднородности структуры ветровых волн.

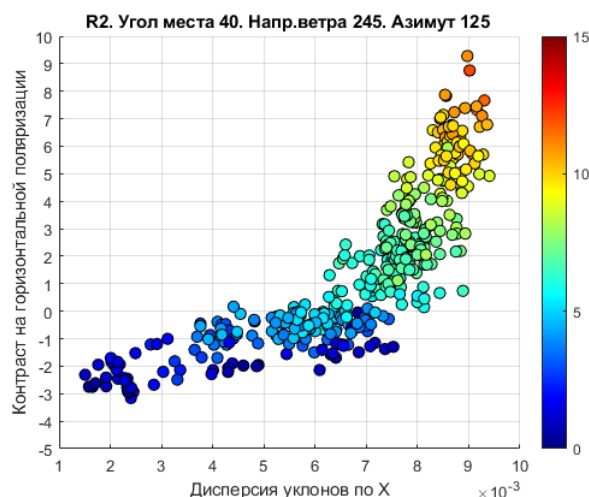


Рис. 11. Зависимость яркостного контраста на горизонтальной поляризации от дисперсии уклонов крупных волн. Угол места 40°.

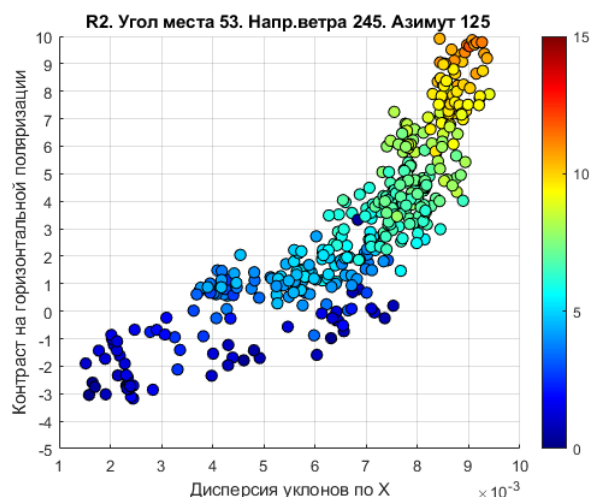


Рис. 12. Зависимость яркостного контраста на горизонтальной поляризации от дисперсии уклонов крупных волн. Угол места 53°.

Выводы

Совместная обработка данных натурных измерений интенсивности собственного излучения морской поверхности и результатов определения пространственной структуры волнения лазерным волнографом в настоящее время продолжается. Очевидно, что представленные результаты должны быть дополнены анализом зависимости яркости от дисперсии уклонов крупных волн в направлении, перпендикулярном направлению распространения волнения. Помимо этого, общий характер распределения уклонов крупномасштабных волновых компонент, определяющих их излучения, будет зависеть и от коэффициентов эксцесса и асимметрии [11].

При этом уже к настоящему моменту удалось получить новые сведения о принципах формирования излучения взволнованной морской поверхности, а также доказательства существующих теоретических представлений об этом процессе. В частности – в явном виде продемонстрировать эффект смены доминирующего механизма формирования излучения при скоростях ветра 5-6 м/с и изучить некоторые его особенности. Очевидно, что в качестве этого «вторичного» источника излучения выступают короткие гравитационно-капиллярные волны. Привлекаемая схема лазерного волнографа позволяет исследовать пространственную динамику этой части ветрового волнения [12]. В свою очередь, это открывает уникальную возможность выделения вклада в общее излучение поверхности коротковолновых гармоник и изучения закономерностей его (излучения) формирования в естественных условиях, что было ранее недоступно.

Работа выполнена в рамках госзадания ИКИ РАН (тема "Мониторинг").

Литература

1. Trokhimovskii Yu.G. The model for microwave thermal emission of sea surface with waves // Earth Observation Remote Sensing. 1997. V. 1. P. 39–49.
2. Sterlyadkin V.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., Likhacheva M.V. Scanning laser wave recorder with registration of “Instantaneous” sea surface profiles // Atmospheric and Oceanic Technology. 2021. V.38. No.8. P.1415–1424. DOI:10.1175/JTECH-D-21-0036.1.

3. *Стерлядкин В.В., Куликовский К.В.* Измерение капиллярных волн лазерным волнографом // Russian Technological J. 2022. Т.10. №5. С.100–110. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110.
4. *Серлядкин В.В.* Задача восстановления профиля морской поверхности по видеоизображению лазерных лучей// Океанология. 2024. Т. 64. № 4. С.396-407. DOI: 10.31857/S0030157424030022.
5. *Кузьмин А.В., Куликовский К.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В.* Комплексные экспериментальные исследования динамики развития ветровых волн на морской поверхности// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025 (в печати).
6. *Кузьмин А.В., Садовский И.Н., Горшков А.А., Ермаков Д.М.* «Приборная платформа для надводных измерений морской поверхности и атмосферы» // Исследование Земли из Космоса 2020, № 1, с.83-91. DOI: 10.31857/S0205961420010054.
7. *Сазонов Д.С., Садовский И.Н., Пашинов Е.В., Кузьмин А.В..* Метод наклонной калибровки радиометрического приёмника в натурных условиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 40-50. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-40-50.
8. *Садовский И. Н., Кузьмин А. В., Поспелов М. Н.* Исследование параметров спектра ветрового волнения по данным дистанционных радиополяриметрических измерений//Исслед. Земли из космоса. 2009. №2. С.3–10.
9. *Sterlyadkin V.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., Likhacheva M.V.* Scanning laser wave recorder with registration of “Instantaneous” sea surface profiles // Atmospheric and Oceanic Technology. 2021. V.38. No.8. P.1415–1424. DOI:10.1175/JTECH-D-21-0036.1.
10. *Садовский И.Н.* Особенности учета вклада длинноволновых компонент волнения в приращение излучательной способности морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 228–239.
11. *Садовский И.Н., Сазонов Д.С.* Оценка влияния асимметрии крупных волн на собственное излучение морской поверхности// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т.21. №6. С. 331–343. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-331-343.
12. *Лихачева М.В., Стерлядкин В.В., Куликовский К.В.* Лазерный метод измерения капиллярных волн на морской поверхности/ // Моря России: приоритеты, практика, прогноз. The Seas of Russia: Priorities, Practice, Forecast: тезисы докладов IX Всероссийской научной конференции, г. Севастополь, 22–26 сентября 2025 г – С. 75.