

УДК 528.8

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН ПО СПЕКТРАМ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2023 г. Академик РАН В. Г. Бондур<sup>1,\*</sup>, В. А. Дулов<sup>1,2</sup>, В. А. Козуб<sup>1</sup>, А. Б. Мурьин<sup>1,3</sup>,  
М. В. Юровская<sup>1,2</sup>, Ю. Ю. Юровский<sup>1,2</sup>

Поступило 10.11.2022 г.

После доработки 11.11.2022 г.

Принято к публикации 14.11.2022 г.

Предложено развитие метода восстановления двумерных пространственных спектров возвышений морского волнения по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения, позволяющее оценивать угловые распределения энергии ветровых волн. Валидация метода выполнена по результатам комплексного эксперимента, который включал спутниковую съемку акватории Черного моря оптической аппаратурой и подспутниковые измерения в контролируемых условиях со стационарной океанографической платформы. Проведено сопоставление углового распределения энергии морских волн, восстановленного по пространственным спектрам фрагментов спутникового изображения, с результатами измерения частотно-угловых спектров по данным, полученным с помощью решетки струнных волнографов. Показано, что результаты измерений дистанционным и контактным методами согласуются в диапазоне длин морских волн от 2.8 до 30 м, причем величина среднего модуля относительной ошибки составляет 0.3.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, аэрокосмический мониторинг, морское волнение, спектры морских волн, спутниковые изображения, струнные волнографы

**DOI:** 10.31857/S2686739722602575, **EDN:** TJKUAM

### ВВЕДЕНИЕ

Измерение спектров морского волнения важно для решения многих фундаментальных и прикладных задач современной океанологии. Информация о таких спектрах используется для обнаружения загрязнений водной среды [1–3], в том числе для мониторинга антропогенных воздействий на морские акватории [1, 2, 4], при исследованиях [4–6] и моделировании [1, 7] различных гидрофизических процессов, происходящих вблизи границы раздела океан–атмосфера, а также в других областях.

Для получения двумерных пространственных спектров поверхностного волнения на больших площадях, в том числе в труднодоступных акваториях морей и океанов, перспективно использова-

ние методов дистанционного зондирования, основанных на обработке изображений, получаемых с воздушных носителей [8, 9], а также космических изображений высокого пространственного разрешения [9–12]. Оценка спектров поверхностных волн по оптическим изображениям, получаемым с аэрокосмических носителей, позволяет сочетать одномоментный охват обширных морских акваторий с возможностью дистанционной регистрации широкого диапазона волновых компонент [9–13].

Для восстановления спектров морского волнения по оптическим аэрокосмическим изображениям используются восстанавливающие операторы, представляющие собой функции, позволяющие преобразовать поля яркости, регистрируемые на таких изображениях, в спектры уклонов морских волн – градиентов поля возвышений для определенных направлений, определяемых законами геометрической оптики [8–10, 14, 16]. Эти операторы строятся с использованием методов численного моделирования на основе учета различных условий формирования аэрокосмических изображений и характеристик аппаратуры дистанционного зондирования [8–12]. Для оценки адекватности методов восстановления спектров волнения по спектрам аэрокосмических изображений производится их валидация с использованием резуль-

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт Российской академии наук, Севастополь, Россия

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

татов измерений контактными методами [10–12, 15, 19].

Чтобы полностью восстановить пространственные спектры полей возвышений морских волн, необходима информация о двух или более спектрах уклонов, соответствующих различным направлениям [8, 17]. Это возможно, если использовать многопозиционный метод, включающий одновременную обработку двух или более изображений, имеющих отличающиеся условия формирования полей яркости и, как следствие, отличающиеся градиенты освещенности поверхности [8]. При обработке одиночных спутниковых изображений многопозиционный метод не может быть применен, поскольку высота съемки значительно превышает размер исследуемого участка морской поверхности и геометрические условия незначительно изменяются в пределах таких изображений. В этих случаях не удастся полностью восстановить двумерные спектры волнения в пределах узких угловых секторов, где наблюдаются дефициты информации о морском волнении [9, 11, 15, 18]. Поэтому актуально развитие методов, позволяющих устранять такие ограничения и определять угловое распределение энергии волн даже по одиночным спутниковым изображениям. Этому и посвящена настоящая работа.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ МЕТОД

Связь двумерных пространственных спектров морского волнения со спектрами полей яркости, регистрируемых по спутниковым оптическим изображениям, можно представить в виде соотношения [9]:

$$\Phi(\mathbf{k}) = \mathbf{R}S(\mathbf{k}), \quad (1)$$

где  $\Phi(\mathbf{k})$  – пространственный спектр уклонов морских волн;  $\mathbf{k}$  – волновой вектор;  $S(\mathbf{k})$  – пространственный спектр спутникового изображения;  $\mathbf{R}$  – математический оператор, обеспечивающий восстановление спектров уклонов по спектрам спутниковых оптических изображений, и поэтому названный восстанавливающим оператором [9].

Восстанавливающий оператор  $\mathbf{R}$  обычно представляется в виде передаточной функции (пространственно-частотного фильтра), применяемой поэлементно к значениям спектральной плотности спутникового изображения, вычисляемому с использованием дискретного преобразования Фурье [9, 10].

В работах [9, 10, 12, 19] разработан подход к восстановлению пространственных спектров уклонов и возвышений поверхностных волн по аэрокосмическим оптическим изображениям, учитывающий нелинейную модуляцию полей яр-

кости уклонами морской поверхности и включающий параметризацию восстанавливающего оператора  $\mathbf{R}$  в зависимости от набора условий наблюдения. Для адекватного применения многопараметрического восстанавливающего оператора  $\mathbf{R}$  его параметры предварительно уточнялись с учетом различных условий волнообразования [9, 12, 13]. Для этого использовались результаты сопоставления спектров взволнованной морской поверхности, восстановленных по космическим изображениям, с результатами измерений, выполненных с помощью датчиков, установленных как на стационарной гидрофизической платформе, так и на плавучих буйках [11–13, 19]. В результате такого сопоставления предварительно была получена поправка к параметрам восстанавливающего оператора в области степенного спада частотного спектра. Эта поправка соответствовала условиям волнообразованию в акваториях, где наблюдалось смешанное волнение, включающее как ветровые волны, так и зыбь [12, 13].

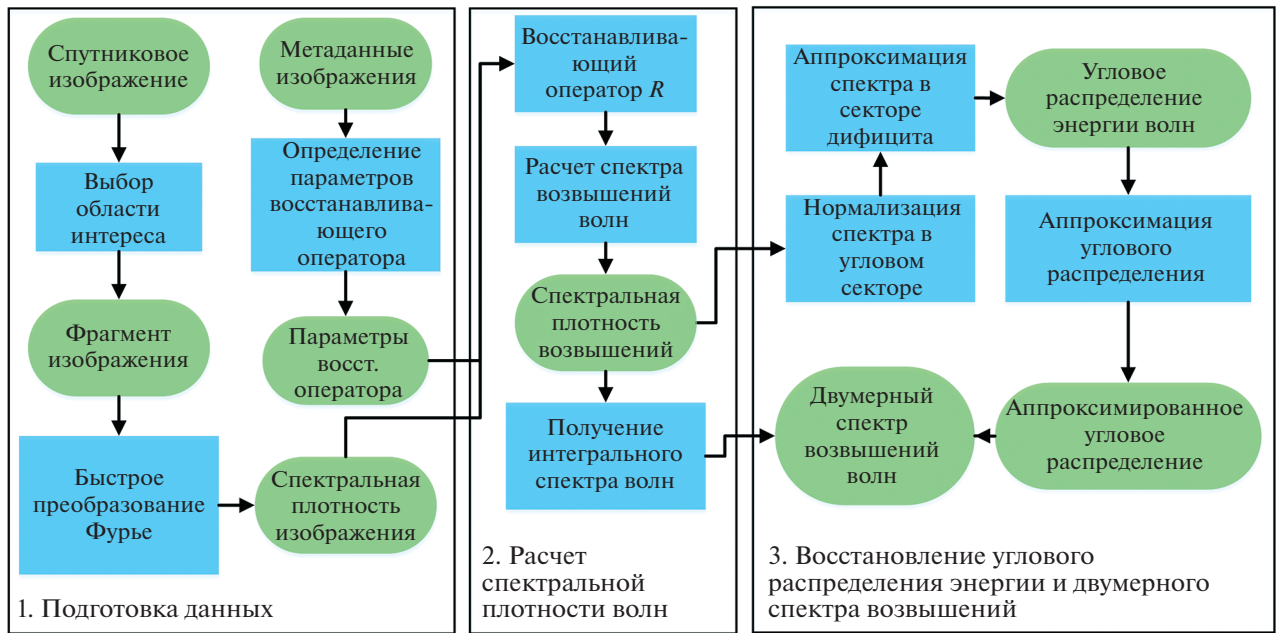
Спектр возвышений морских волн может быть найден из соотношения [9, 10]:

$$\Psi(\mathbf{k}) = \mathbf{R}(\mathbf{W})S(\mathbf{k}) / (k_x \cdot \cos \phi_C + k_y \cdot \sin \phi_C)^2, \quad (2)$$

где  $\phi_C$  – среднее направление градиента освещения морской поверхности в горизонтальной плоскости.

В направлении, ортогональном к направлению  $\phi_C$ , знаменатель выражения стремится к нулю. Угловой сектор в окрестности этого направления является областью дефицита информации о спектральной плотности поля возвышений, поскольку применение соотношения (2) в этом секторе приводит к значительным погрешностям в оценке спектра возвышений. Для преодоления указанного дефицита был разработан многопозиционный метод, описанный в работе [8]. Применение этого метода для космических изображений связано с техническими сложностями, обусловленными особенностями спутниковой съемки (узкие поля зрения спутниковой аппаратуры, сложность проведения одновременной съемки с двух и более позиций и др.) [9–11, 19]. Поэтому для решения задачи применительно к дистанционному зондированию из космоса необходимо развитие метода восстановления двумерных спектров морского волнения по спектрам спутниковых изображений, описывающих распределение волновой энергии по направлениям.

Блок-схема, иллюстрирующая предлагаемый метод дистанционного измерения углового распределения энергии по двумерным пространственным спектрам ветровых волн, восстанавливаемых по спектрам спутниковых изображений, приведена на рис. 1. Вычислительные операции предлагаемого метода условно разделены на блоки: (1) подготовка данных, (2) расчет спектраль-



**Рис. 1.** Блок-схема метода дистанционного измерения углового распределения энергии по двумерным пространственным спектрам ветровых волн, восстанавливаемых по спектрам спутниковых изображений.

ной плотности уклонов и возвышений волн, (3) восстановление углового распределения энергии волн и оценка двумерного спектра возвышений.

Операции подготовки данных (блок 1) включают выбор областей интереса на спутниковом изображении и расчет их пространственных спектров, а также формирование набора параметров восстанавливающего оператора с использованием метаданных спутникового изображения.

По подготовленным данным в блоке 2 выполняется восстановление спектров волнения с помощью восстанавливающего оператора, учитывающего нелинейную модуляцию поля яркости уклонами поверхности. Результатом операций блока 2 являются двумерные спектры уклонов и спектры возвышений при всех значениях волнового вектора, не попадающих в угловой сектор дефицита информации.

В блоке 3 выполняется восстановление углового распределения энергии и двумерного спектра возвышений с использованием предлагаемого развития метода, описание которого приведено ниже. Главным направлением развития метода является обеспечение возможности восстановления углового распределения энергии волн в двумерном спектре по одиночным спутниковым изображениям. Для этого используется подход, который применялся ранее при обработке частотно-направленных спектров волнения, определяемых по данным волнографов [19–21, 23]. В соответствии с этим подходом двумерный спектр волнения представляется в полярных ко-

ординатах  $(k, \phi)$ , где  $k$  – волновое число (модуль волнового вектора  $\mathbf{k}$ ),  $\phi$  – волновой азимут, характеризующий направление распространения волновой гармоники с волновым вектором  $\mathbf{k} = [k \cdot \cos \phi, k \cdot \sin \phi]$ .

Двумерный спектр волнения будем рассматривать как произведение

$$\Psi(k, \phi) = \chi(k)D(k, \phi), \quad (3)$$

где  $\chi(k)$  – интегральный одномерный спектр,  $D(k, \phi)$  – безразмерная функция углового распределения энергии морских волн.

Угловое распределение энергии морских волн  $D(k, \phi)$  определяется по двумерному спектру возвышений  $\Psi(k, \phi)$  с использованием соотношения:

$$D(k, \phi) = \Psi(k, \phi) / \int_{\pi}^{\pi} \Psi(k, \phi) d\phi. \quad (4)$$

Валидация метода дистанционного измерения пространственных спектров  $\chi(k)$  для различных условий волнообразования проведена ранее в работах [11, 12, 19]. Поэтому настоящая работа посвящена развитию метода восстановления углового распределения энергии  $D(k, \phi)$  как основной характеристики двумерного спектра морского волнения.

После применения восстанавливающего оператора  $R$  и перехода к спектру возвышений морских волн добавляются три дополнительных шага. Сначала выполняется линейная интерполяция спектра в области дефицита информации о спек-

тре волнения. Данная область представляет собой два симметричных относительно центра сектора, с угловой мерой, порядка  $40^\circ$ . Ее центральные направления ортогональны среднему градиенту поля яркости. Аппроксимация выполняется в тангенциальном направлении с использованием ближайших к зоне дефицита значений восстановленного спектра. Далее производится нормализация по формуле (4).

На финальном этапе угловое распределение энергии волн аппроксимируется с использованием усеченного ряда Фурье, в котором отбрасываются все члены выше вторых гармоник:

$$D_a(k, \phi) = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2} + a_1 \cdot \cos \phi + b_1 \cdot \sin \phi + a_2 \cdot \cos 2\phi + b_2 \cdot \sin 2\phi \right). \quad (5)$$

Разложение (5) используется также и при обработке подспутниковых волнографических данных [19]. При сопоставлении результатов обработки подспутниковых волнографических данных и спектров, восстановленных по спутниковым изображениям, необходимо принимать во внимание, что первые гармоники в спектрах этих изображений отсутствуют ввиду инвариантности отображения на оптических изображениях волн, направленных в противоположенных направлениях, т.е.  $a_1 = b_1 = 0$ . В то же время для волнографических данных параметры  $a_1, b_1$  отличаются от нуля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для апробации предложенного метода использовались результаты комплексного эксперимента, который проводился в сентябре 2021 г. в акватории Черного моря [19]. В ходе проведения этого эксперимента 20 сентября 2021 г. была выполнена спутниковая съемка исследуемой акватории с высоким пространственным разрешением (около 1 м).

Подспутниковые измерения выполнялись с Черноморской исследовательской платформы Морского гидрофизического института РАН, которая располагается примерно в 500 м от берега [18, 20, 23]. Подспутниковые измерения включали: регистрацию волн с помощью решетки из шести струнных волнографов [20, 22, 25]; регистрацию метеопараметров (скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, температура воды в верхнем слое моря); видеорегистрацию морской поверхности для оценки вектора скорости течения в приповерхностном слое воды [19, 24].

В момент пролета спутника скорость юго-западного ветра составляла 8.34 м/с, а высота волн — 0.61 м. В промежуток времени 8:00–9:00 LT, охватывающий момент пролета спутника, ветер был

стабильным и его скорость сохранялась на том же уровне. При этом во время эксперимента происходила эволюция волнового поля (высота волн возрастала с 0.5 м до 0.65 м) при стабильной скорости ветра [19].

Обработка подспутниковых данных проводилась по методикам, описанным в [19].

Рисунок 2 демонстрирует сглаженные угловые распределения энергии морских волн, полученные с помощью представления (5), на основании данных контактных измерений, выполненных с помощью решетки струнных волнографов (рис. 2 а), а также с использованием спектров волнения, восстановленных по фрагментам размером  $512 \times 512$  пикселей спутникового изображения, полученного вблизи морской платформы (рис. 2 б). Угловая функция была визуализирована в координатах  $(k \cos \phi, k \sin \phi)$ , где угол  $\phi$  — направление распространения волны. Такое представление дает наглядную информацию об угловом распределении энергии морских волн.

Для более детального анализа соответствия результатов дистанционных и контактных измерений угловых распределений энергии было проведено их сопоставление для волн различных длин  $\Lambda$  от 2.6 до 28.4 м. Результаты такого сопоставления приведены на рис. 3, где представлены одномерные разрезы угловых распределений, приведенных на рис. 2, для различных длин волн. Разрезы, восстановленные по спектрам фрагментов спутникового изображения и аппроксимированные по формуле (4), показаны красными линиями, а разрезы, измеренные по данным струнных волнографов показаны синими линиями.

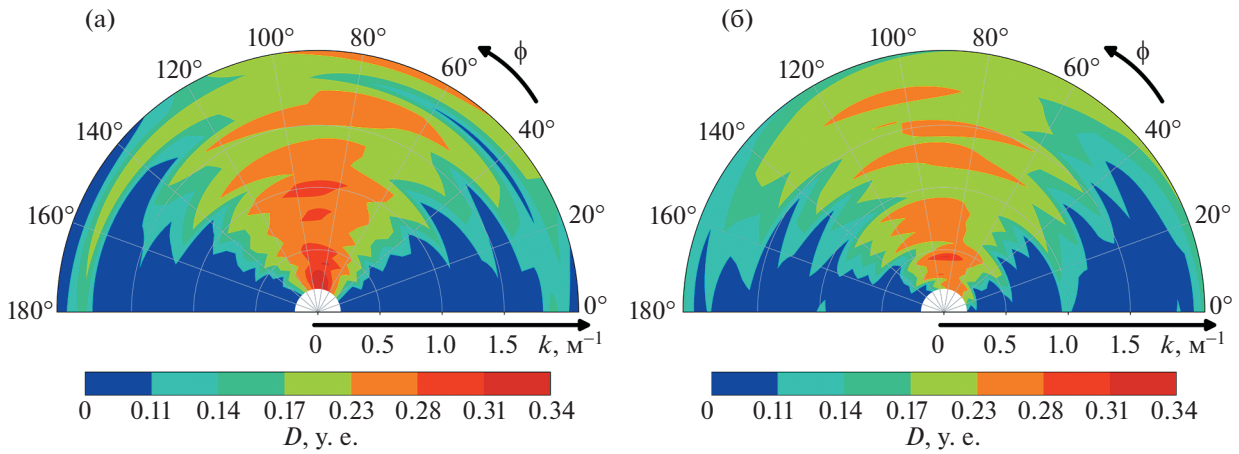
По осям координат на рис. 3 отложены:  $\phi$  — волновой азимут;  $D = D_a(k, \phi)$  — угловое распределение, вычисленное по формуле (5) при  $k = 2\pi/\Lambda$ .

Для численного сравнения угловых распределений, полученных при обработке контактных данных и восстановленных по фрагментам спутникового изображения, полученного вблизи морской платформы, использовалась величина среднего модуля относительной ошибки [19]

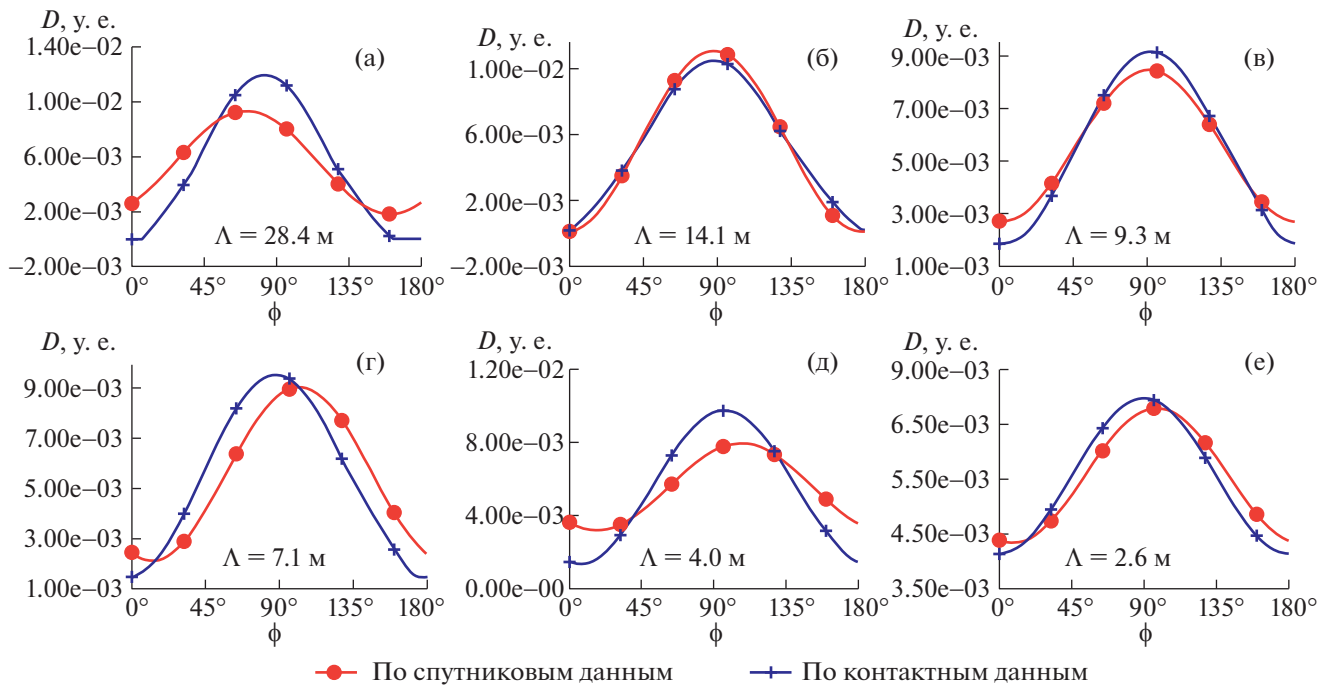
$$M(\Psi_c, \Psi_N) = E[|1 - \Psi_N/\Psi_c|], \quad (6)$$

где  $\Psi_c, \Psi_N$  — сравниваемые спектры, полученные по результатам контактных и дистанционных измерений,  $E[.]$  — оператор математического ожидания.

Для анализируемого диапазона длин волн (от 2.6 до 30 м) величина среднего модуля относительной ошибки составила  $M = 0.3$ . Эта величина близка к результатам работы [19], где было проведено сравнение одномерных интегральных спектров для исследуемого диапазона длин волн и получены значения  $M$ , изменяющиеся от 0.2 до 0.4 на различных расстояниях от платформы.



**Рис. 2.** Сглаженные угловые распределения энергии морских волн, измеренные различными методами: (а) по данным решетки струнных волнографов; (б) с использованием спектра волнения, восстановленного по спутниковому изображению.

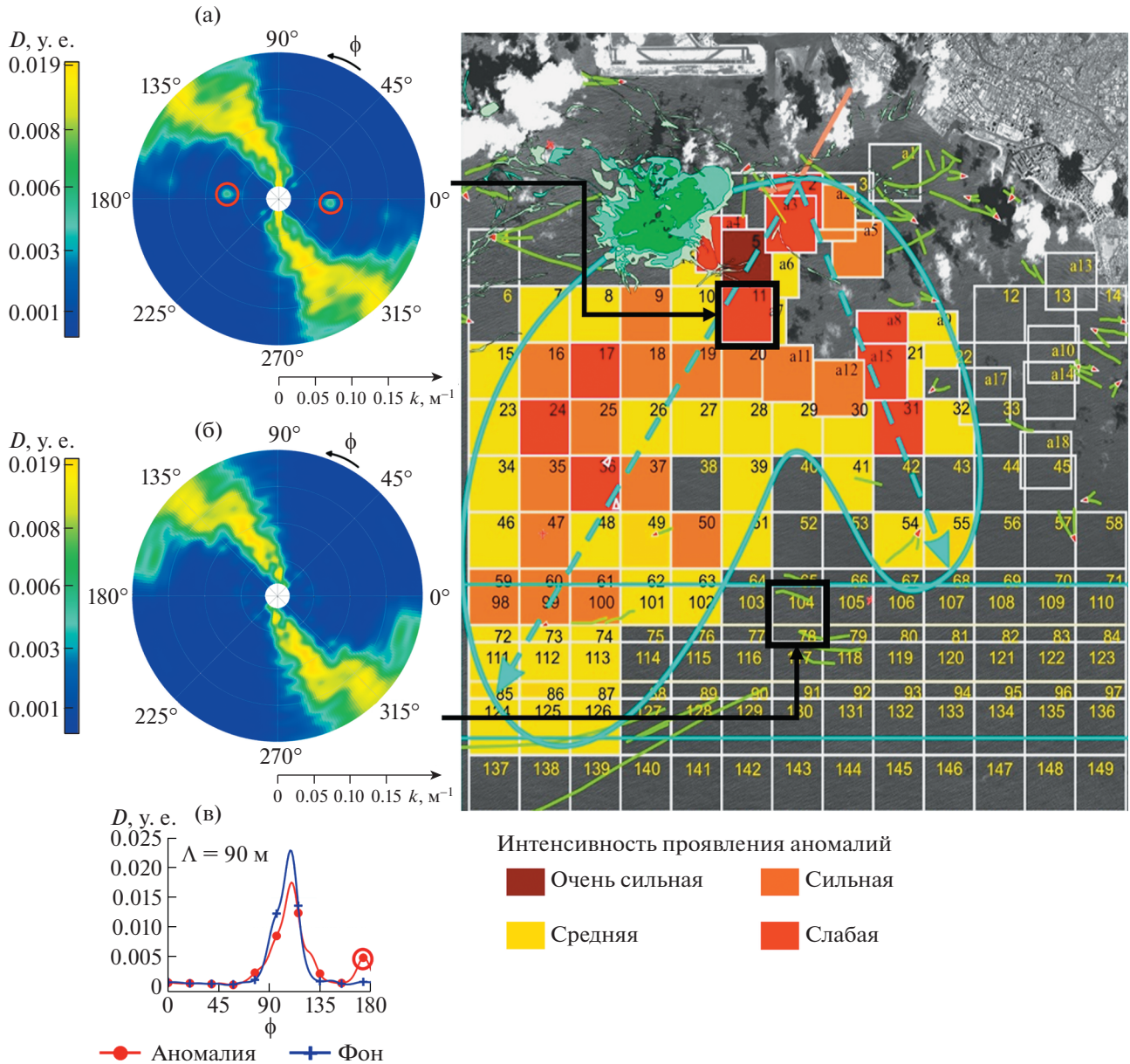


**Рис. 3.** Угловые распределения энергии волн различной длины, оцененные различными методами: распределения, восстановленные по спектрам фрагментов спутникового изображения и аппроксимированные по формуле (5) (красные линии); распределения, оцененные по данным решетки струнных волнографов (синие линии) при различных длинах волн  $\Lambda$ : а)  $\Lambda = 28.4$  м, б)  $\Lambda = 14.1$  м, в)  $\Lambda = 9.3$  м, г)  $\Lambda = 7.1$  м, д)  $\Lambda = 4.0$  м, е)  $\Lambda = 2.6$  м.

Предложенное развитие метода восстановления спектров морского волнения по спектрам спутниковых изображений может использоваться для мониторинга аномальных процессов и явлений в океане. В качестве примера приведем результаты исследований аномалии, вызванной глубинным стоком в акваторию бухты Мамала, описанные в работах [1, 2, 4, 5].

На рис. 4 а показана приведенная в работе [1] панорама аномальных участков морской поверхности, связанных с воздействием турбулентных струй, вызванных стоком через заглубленное сбросовое устройство. Аномальные участки морской поверхности (размером  $1.33 \times 1.33$  км<sup>2</sup>) выделялись по появлению дополнительных узких (среднее уширение  $\Delta\bar{\Lambda} \sim 4$  м) спектральных гар-





**Рис. 4.** Результаты исследования углового распределения энергии волн в области аномалий, вызванных глубинным сбросом: а) панорама аномальных участков морской поверхности, выделенных по пространственным спектрам фрагментов спутникового изображения [1]; (б, в) угловые распределения энергии волнения, полученные по спектрам морских волн, восстановленным по спектрам аномального и фонового фрагментов спутникового изображения; (г) сравнение фонового и аномального углового распределений энергии морских волн с длиной 90 м, полученным по спектрам волнения, восстановленным для аномального фрагмента № 11 (кривые красного цвета) и для фонового фрагмента № 104 (кривые синего цвета) спутникового изображения.

моник в двумерных пространственных спектрах фрагментов спутникового изображения высокого пространственного разрешения. Средний пространственный период для этих спектральных компонент составлял величину  $\bar{\Lambda} = 90$  м.

Эти спектральные гармоники удовлетворяют условию [1]:  $\Delta\lambda \ll \Lambda$ , где  $\Lambda$  – пространственный период для этих узких спектральных гармоник.

Такие спектральные гармоники можно назвать “квазимонохроматическими”. Эти “квазимонохроматические” спектральные гармоники вызваны поверхностными проявлениями возмущений, связанных с внутренними волнами, генерируемыми турбулентными струями глубинных стоков [1]. Подобных спектральных гармоник нет в фоновых спектрах. Такие эффекты подробно описаны в работе [1].

На рис. 4 а различными цветами отмечены фрагменты спутникового изображения, соответствующего участкам морской поверхности размерами  $1.33 \times 1.33 \text{ км}^2$ , с различной интенсивностью проявления аномалий, выделенных по спектрам фрагментов космического изображения [1].

На рис. 4 б в качестве примера показано угловое распределение энергии морских волн, полученное по двумерному спектру волнения, восстановленному с использованием предложенного метода, для фрагмента № 11 спутникового изображения, расположенного юго-западнее диффузора сбросового устройства в области поверхностного проявления аномалии морской поверхности, вызванной заглубленным стоком. В полученном угловом распределении энергии отчетливо различимы “квазимонохроматические” волновые компоненты с пространственным периодом 90, генерируемые внутренними волнами, обусловленными воздействием турбулентных струй глубинного стока [1]. Эти “квазимонохроматические” спектральные компоненты выделены на рис. 4 б красными кружками.

Для сравнения на рис. 4 в показано угловое распределение энергии, полученное аналогичным методом для фонового участка акватории (фрагмент 104), расположенного на расстоянии около 13 км к югу от диффузора. На этом рисунке не проявляются спектральные компоненты, подобные приведенным на рис. 4 б, которые соответствуют аномальному участку морской поверхности.

Участки поверхности, для которых были получены угловые распределения, отмечены на рис. 4 а черными квадратами.

На рис. 4 г для сравнения приведены угловые распределения энергии морских волн с длиной 90 м для направлений 0–180°, полученные по спектрам волнения, восстановленным с использованием развитого метода, для аномального № 11 (кривая красного цвета) и для фонового № 104 (кривая синего цвета) фрагментов спутникового изображения исследуемой акватории. На угловом распределении энергии волн, полученном на аномальном участке акватории (красная кривая), наблюдается отчетливый локальный максимум в направлении ~170 градусов, который выделен красным кружком.

В угловом распределении энергии волн, полученных на фоновом участке акватории (синяя кривая), отмеченные локальные максимумы отсутствуют.

Эти результаты соответствуют результатам пространственной спектральной обработки космических изображений высокого пространственного разрешения, приведенных в работе [1].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное развитие метода дистанционного измерения двумерных пространственных спектров ветрового волнения по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения (~1 м) позволяет получать оценки углового распределения энергии морских волн даже при наличии ограничения углового сектора и дефицита спектральных данных вследствие однопозиционного характера спутниковой съемки. Такие оценки, основанные на дистанционных измерениях, представляют несомненный практический интерес.

Угловые распределения волн, восстановленные в настоящей работе по двумерным пространственным спектрам спутниковых изображений, согласуются с результатами контактных измерений струнными волнографами. При этом величина среднего модуля относительной ошибки составила около 0.3 для диапазона длин волн от 2.6 до 30 м.

На основании результатов обработки спутниковых данных, полученных в области воздействия на поверхность внутренних волн, создаваемых турбулентными струями, вызванными глубинными стоками, продемонстрирована возможность использования предложенного метода для исследования и мониторинга аномалий, возникающих на морской поверхности и в приповерхностных слоях морей и океанов, проявляющихся в изменениях спектров волнения.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // *Waste Water – Evaluation and Management*, 2011. ISBN978-953-307-233-3. P. 155–180. <https://doi.org/10.5772/16134>. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
2. *Bondur V., Tsidilina M.* Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
3. *Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // *Исследование Земли из космоса*. 2012. № 4. С. 3–11.

4. Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., Долотов Ю.С., Здоровеннов Р.Э., Петров М.П., Цидилина М.Н. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
5. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о.Оаху (Гавайи) // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
6. Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P. Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science*. 2018. V. 14. № 1. P. 87–103. <https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
7. Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В. Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 6. С. 805–820.
8. Бондур В.Г., Мурынин А.Б. Восстановление пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям с учетом нелинейной модуляции поля яркости. // *Оптика атмосферы*. 1991. Т. 3. № 4. С. 387–393.
9. Бондур В.Г., Мурынин А.Б. Методы восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 6. С. 3–14. <https://doi.org/10.7868/S0205961415060020>
10. Bondur V., Muryinin A. The Approach for Studying Variability of SeaWave Spectra in a Wide Range of Wavelengths from High-Resolution Satellite Optical Imagery // *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. 9. 823. <https://doi.org/10.3390/jmse9080823>
11. Бондур В.Г., Дулов В.А., Мурынин А.Б., Юровский Ю.Ю. Исследование спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн по спутниковым и контактными данным // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 7–24. <https://doi.org/10.7868/S0205961416010048>
12. Бондур В.Г., Дулов В.А., Мурынин А.Б., Игнатьев В.Ю. Восстановление спектров морского волнения по спектрам космических изображений в широком диапазоне частот // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 6. С. 716–728. <https://doi.org/10.7868/S0002351516060055>
13. Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Мурынин А.Б. Восстановление спектров морского волнения по космическим изображениям высокого разрешения при различных условиях волнообразования // *Исследование Земли из космоса*. 2020. № 3. С. 45–58. <https://doi.org/10.31857/S0205961420030021>
14. Kudryavtsev V., Yurovskaya M., Chapron B., Collard F., Donlon C. Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: Directional spectrum retrieval and validation // *J. Geophys. Res. (Oceans)*. 2017. V. 122. № 2. P. 1369–1383. <https://doi.org/10.1002/2016JC012425>
15. Yurovsky Y.Y., Kudryavtsev V.N., Grodsky B., Chapron S.A. Validation of Doppler Scatterometer Concepts using Measurements from the Black Sea Research Platform // *Doppler Oceanography from Space (DOFS)*. 2018. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/DOFS.2018.8587275>
16. Yurovskaya M.V.; Dulov V.A.; Chapron B.; Kudryavtsev V.N. Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography // *J. Geophys. Res.* 2013. 118. P. 4380–4394. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20296>
17. Большаков А.М., Бурдюгов В.М., Гродский С.А., Кудрявцев В.Н. Определение спектра энергонесущих поверхностных волн по изображению солнечного блика // *Исследование Земли из космоса*. 1988. № 5. С. 11–18.
18. Dulov V.A., Yurovskaya M.V. Spectral Contrasts of Short Wind Waves in Artificial Slicks from the Sea Surface Photographs. *Physical Oceanography*, [e-journal]. 2021. 28 (3). P. 348–360. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-3-348-360>
19. Bondur V., Dulov V., Kozub V., Muryinin A., Yurovskaya M., Yurovsky Y. Validation of the satellite method for measuring spectra of spatially inhomogeneous sea waves // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. 10. 1510. <https://doi.org/10.3390/jmse10101510>
20. Dulov V., Kudryavtsev V., Skiba E. On fetch- and duration-limited wind wave growth: Data and parametric model. // *Ocean Modelling*. V. 153, September 2020, 101676. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101676>
21. Krogstad H.E. Conventional analysis of wave measurement arrays. In: Hauser D., Kahma K.K., Krogstad H.E., Lehner S., Monbaliu J., Wyatt L.R. (Eds.), *Measuring and Analysing the Directional Spectra of Ocean Waves*. Office for Official Publications of the European Communities, 2005. P. 56–71.
22. Leckler F., Ardhuin F., Peureux C., Benetazzo A., Bergamasco F., Dulov V. Analysis and interpretation of frequency–wavenumber spectra of Young wind waves // *J. Phys. Oceanogr.* 2015. 45. P. 2484–2496. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0237.1>
23. Yurovsky Yu.Yu., Dulov V.A. MEMS-based wave buoy: Towards short wind-wave sensing // *Ocean Engineering*. V. 217. 2020, 108043 (13 p). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108043>
24. Yurovsky Y.Y., Kudryavtsev V.N., Grodsky B., Chapron S.A. Validation of Doppler Scatterometer Concepts using Measurements from the Black Sea Research Platform // *Doppler Oceanography from Space (DOFS)*, 2018. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/DOFS.2018.8587275>
25. Шокуров М.В., Дулов В.А., Скиба Е.В., Смолов В.Е. Ветровые волны в прибрежной зоне Южного берега Крыма – оценка качества моделирования на основе морских натурных измерений // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 2. С. 230–241.



## RETRIEVING ANGULAR DISTRIBUTIONS OF SEA WAVE ENERGY ACCORDING TO SATELLITE IMAGERY SPECTRA

Academician of the RAS **V. G. Bondur<sup>a,#</sup>, V. A. Dulov<sup>a,b</sup>, V. A. Kozub<sup>a</sup>, A. B. Murynin<sup>a,c</sup>,  
M. V. Yurovskaya<sup>a,b</sup>, and Yu. Yu. Yurovsky<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Federal Research Center "Informatics and Management", of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info*

Here we elaborate the method for retrieval of 2D spatial spectra of sea wave elevations using high-resolution satellite imagery. Such an elaboration allows us to assess angular distributions of wind wave energy. The method was validated based on the results of a comprehensive experiment that involved optical satellite imaging of the Black Sea water area and sea truth measurements under controlled conditions using a stationary oceanographic platform. Angular distribution of sea wave energy, retrieved by spatial spectra of satellite image fragments, were compared with the results of measurements of frequency-angular spectra using data from an array of string wave recorders. It has been demonstrated that the results of measurements by remote and in-situ methods are consistent in the range of sea wavelengths from 2.8 to 30 m, and the mean absolute error is 0.3.

*Keywords:* remote sensing, aerospace monitoring, sea waves, sea wave spectra, satellite imagery, string wave recorders