

# Оптимальный выбор параметров для восстановления спектров морского волнения по аэрокосмическим изображениям\*

В. Г. Бондур<sup>1</sup>, А. Б. Мурынин<sup>1,2</sup>, В. Ю. Игнатъев<sup>1,2</sup>

vgbondur@aerocosmos.info; amurynin@bk.ru; vladimir.ignatiev.mipt@gmail.com

<sup>1</sup>НИИ аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Россия, г. Москва, Гороховский пер., 4

<sup>2</sup>ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44/2

Рассматривается проблема восстановления спектров морской поверхности по аэрокосмическим изображениям в широком спектральном диапазоне длин волн. В рамках описанной нелинейной модели поля яркости, регистрируемого аппаратурой дистанционного зондирования, предложена модификация восстанавливающего оператора, действующего во всей пространственно-спектральной области. Описан итерационный процесс выбора оптимальных значений параметров модифицированного оператора с использованием подспутниковых измерений для валидации. Представлены результаты проверки работоспособности построенного оператора для различных условий регистрации изображений морской поверхности.

**Ключевые слова:** *пространственный спектр; восстанавливающий оператор; оптимизация по параметрам*

DOI: 10.21469/22233792.2.2.07

## 1 Введение

Различные процессы, происходящие на взволнованной поверхности океана, наиболее полно описываются с использованием пространственно-частотных, пространственных и частотных спектров волнения [1–3]. Эти спектры позволяют получать важную информацию о явлениях, происходящих на поверхности и в приповерхностном слое морей и океанов, об энергетических особенностях морских волн, о характеристиках приводного слоя атмосферы и ветровом режиме [2]. Подход, основанный на пространственно-частотном и частотном спектральном анализе, позволяет выявлять зоны негативных естественных и антропогенных воздействий на водную среду [1, 4].

Для получения информации о состоянии границы раздела океан–атмосфера и о спектрах поверхностного волнения на больших площадях с различным пространственным разрешением в любых, в том числе труднодоступных регионах океана, перспективно использование аэрокосмических методов дистанционного зондирования и методов обработки аэрокосмических изображений [1, 4–10]. Для регистрации двумерных и одномерных пространственных спектров волнения целесообразно применение оптических аэрокосмических изображений высокого пространственного разрешения, позволяющих регистрировать мгновенные распределения полей яркости, которые несут информацию о пространственной структуре морских волн [1, 4–6]. Для адекватной оценки двумерных и одномерных спектров поверхностного волнения по оптическим изображениям должны использоваться специальные методы восстановления характеристик границы раздела атмосфера–гидросфера по данным дистанционного зондирования [1, 4–6, 11–14]. При этом необходимо применять восстанавливающие операторы, которые строятся на основе учета различных

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 14-05-91759, № 16-51-55019.

условий формирования изображений и характеристик аппаратуры [1, 5, 6, 10–14]. В настоящей работе описывается метод построения операторов для восстановления пространственных спектров морского волнения по спектрам оптических аэрокосмических изображений и приводятся результаты его применения.

## 2 Постановка задачи

Взволнованная морская поверхность представляет собой случайное поле возвышений (волновых аппликат) [1]:

$$z = \zeta(x, y, t), \quad (1)$$

где  $\zeta(x, y, t)$  — случайная функция возвышений морской поверхности (поле возвышений);  $(x, y, z)$  — прямоугольная декартова система координат, в которой плоскость  $(x, y)$  совпадает с уровнем спокойной (невзволнованной) водной поверхности;  $t$  — время.

Фиксируя в (1) момент времени  $t = t_0$ , получим двумерную случайную функцию пространственных координат:

$$z = \zeta(x, y, t)|_{t=t_0} = \xi(x, y).$$

Для исследований характеристик поля возвышений морской поверхности в фиксированный момент времени  $z = \xi(x, y)$  используются аэрокосмические изображения, которые регистрируются дистанционными методами. Двумерные поля сигналов, которые представлены на аэрокосмических изображениях, связаны с полем возвышения морской поверхности и могут использоваться для оценки значимых характеристик этой поверхности.

Так как поле возвышений морской поверхности  $\xi(x, y)$  является гауссовским квазистационарным полем, то она достаточно полно описывается спектральной плотностью [2]:

$$\Psi(\mathbf{k}) = \hat{S}[\xi](\mathbf{k}),$$

где  $\hat{S}$  — оператор спектральной плотности, пропорциональный квадрату модуля Фурье-преобразования поля  $\xi(x, y)$ ;  $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$  — волновой вектор.

Поскольку оптические изображения морской поверхности формируются в результате отражения и преломления света по законам геометрической оптики, то при их анализе структуру морской поверхности наряду с полем возвышений  $\xi(x, y)$  удобно характеризовать полями уклонов (или градиентов) вдоль осей [2]

$$\xi_\alpha(x, y) = \frac{\partial \xi(x, y)}{\partial \alpha}, \quad \alpha = x, y. \quad (2)$$

Поле уклонов морской поверхности в произвольном направлении  $\varphi$  (отличном от направлений осей координат) с учетом (2) можно выразить следующим образом:

$$\beta_\varphi(x, y) = \cos \varphi \xi_x(x, y) + \sin \varphi \xi_y(x, y).$$

Учитывая свойства преобразования Фурье, можно связать спектр такого поля уклонов  $\Phi(\mathbf{k}) = \hat{S}[\beta_\varphi](\mathbf{k})$  со спектром поля возвышений  $\Psi(\mathbf{k})$ :

$$\Phi(\mathbf{k}) = (\cos \varphi k_x + \sin \varphi k_y) \Psi(\mathbf{k}). \quad (3)$$

Пространственный спектр  $\Psi(\mathbf{k}, \varphi)$  в полярных координатах  $(k, \varphi)$  описывает распределение волновой энергии по волновым числам  $k = |\mathbf{k}|$  и направлениям, задаваемым волновым азимутом  $\varphi = \arctan(k_x, k_y)$ .

Рассмотрим физические модели формирования поля яркости, фиксируемого на аэрокосмических изображениях. Поле яркости взволнованной морской поверхности формируется в результате отражения от нее излучения, приходящего из верхней полусферы и преломления на ней восходящего светового потока, образующегося при рассеянии в водной толще.

Поле яркости  $L(x, y)$  в фиксированный момент времени состоит из нескольких составляющих, формируемых различными физическими процессами [1]:

$$L(x, y) = L^{(1)}(x, y) + [L^{(2)}(x, y) + L^{(3)}(x, y)]\tau_a,$$

где  $L^{(1)}(x, y)$  — яркость, обусловленная рассеянием в атмосфере в направлении приемника;  $L^{(2)}(x, y)$  и  $L^{(3)}(x, y)$  — яркости, обусловленные отражением от поверхности и излучением, выходящим из-под воды (рассеяние молекулами воды и взвешенными веществами);  $\tau_a$  — коэффициент пропускания атмосферы. Компоненты  $L^{(2)}(x, y)$  и  $L^{(3)}(x, y)$  отражаются и преломляются от элементов морской поверхности в соответствии с законами геометрической оптики, поэтому яркость  $L$  элемента поверхности, имеющего координаты  $(x, y)$ , зависит от направления вектора нормали  $\mathbf{n}$  к поверхности в точке  $(x, y)$ , который в свою очередь связан с локальными уклонами  $\xi_x, \xi_y$  в этой точке:

$$\mathbf{n} = \frac{(-\xi_x, -\xi_y, 1)}{\sqrt{1 - \xi_x^2 - \xi_y^2}}.$$

При разработке математической модели регистрируемого на оптическом изображении сигнала целесообразно разделить в нем составляющие, различным образом связанные с уклонами морской поверхности. Необходимость такого разделения следует из решаемой задачи восстановления спектров уклонов и возвышений поверхности по оптическим изображениям. В соответствии с этим принципом представим сигнал  $L(x, y)$  в виде следующей суммы [1, 11, 12]

$$L(x, y) = L_{\wedge}(x, y, \xi_x(x, y), \xi_y(x, y)) + N(x, y, \xi_x(x, y), \xi_y(x, y)),$$

где  $L_{\wedge}$  и  $N$  — линейная и нелинейная по уклонам составляющие соответственно, формируемые световыми полями в верхней и нижней полусферах, отражаемыми и преломляемыми элементами морской поверхности.

Поле яркости, регистрируемое аппаратурой дистанционного зондирования в фиксированный момент времени, может быть разложено в степенной ряд по уклонам поверхности и представлено в виде [1, 11, 12]:

$$L(x, y) = C_0 + C_x \xi_x(x, y) + C_y \xi_y(x, y) + N(x, y, \xi_x(x, y), \xi_y(x, y)),$$

где  $N$  — нелинейная составляющая сигнала, содержащая члены, пропорциональные  $\xi_x^2(x, y)$ ,  $\xi_y^2(x, y)$ ,  $\xi_x(x, y)$ ,  $\xi_y(x, y)$  и т. д.;  $C_0$ ,  $C_x$  и  $C_y$  — коэффициенты линейной части разложения;  $\xi_x$  и  $\xi_y$  — поля уклонов (градиентов поля возвышений) морской поверхности. Вклад в регистрируемый сигнал нелинейной составляющей  $N(x, y, \xi_x, \xi_y)$  определяется рядом параметров: условиями освещения, состоянием волнения, характеристиками регистрирующей аппаратуры. Аналитические оценки нелинейной составляющей затруднительны, поэтому для решения поставленной задачи используется метод численного моделирования [1, 11–13]. Введем определение восстанавливающего оператора  $\mathbf{R}$ , позволяющего перейти от спектра оптического изображения  $S(\mathbf{k})$ , полученного при известных условиях,

к спектру уклонов морской поверхности  $\Phi(\mathbf{k})$  в направлении, определяемом этими условиями:

$$\Phi(\mathbf{k}) = \mathbf{R}S(\mathbf{k}). \quad (4)$$

При таком определении оператор  $\mathbf{R}$  зависит от многомерного вектора  $\mathbf{W}_R$ , компонентами которого являются параметры условий получения оптического изображения:  $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{W}_R)$ . В линейной модели сигнала при  $N = L_f = 0$  восстанавливающий оператор тождественно равен константе:  $\mathbf{R} = C^{-2}$ .

### 3 Метод формирования восстанавливающего оператора

Разработанный метод построения восстанавливающего оператора является развитием метода, предложенного в работах [1, 5, 6, 10–14]. Для построения восстанавливающего оператора, соответствующего определенным условиям получения изображений, выполнялось прямое численное моделирование оптических изображений при заданном комплексе условий [8–11], после чего строилась аппроксимация пространственно-частотного фильтра [11–14], позволяющего получить пространственный спектр уклонов морской поверхности из спектра аэрокосмического изображения. Для валидации восстанавливающего оператора проводилось сопоставление с данными контактных измерений и стереосъемки морской поверхности со стационарной платформы [3, 5, 6].

Существенное ограничение использовавшегося подхода состояло в том, что аппроксимация восстанавливающего оператора, верифицированная с использованием данных комплексных экспериментов, относилась только к ограниченной пространственно-частотной области, а именно: к высокочастотной области степенного спада спектральной плотности морского волнения. Предлагаемый метод построения модифицированного восстанавливающего оператора должен обеспечить получение аппроксимации восстанавливающего оператора во всей пространственно-частотной области, где имеются данные контактных измерений.

Модифицированный восстанавливающий оператор  $\mathbf{R}(\mathbf{k})$  можно представить в виде суперпозиции высокочастотного и низкочастотного операторов [6]:

$$\mathbf{R}(\mathbf{k}) = \mathbf{R}_{\text{low}}(\mathbf{k})\mathbf{R}_{\text{high}}(\mathbf{k}),$$

где  $\mathbf{R}_{\text{high}}(\mathbf{k})$  — восстанавливающий оператор в области высоких частот;  $\mathbf{R}_{\text{low}}(\mathbf{k})$  — восстанавливающий оператор в области низких частот. При этом как  $\mathbf{R}_{\text{high}}$ , так и  $\mathbf{R}_{\text{low}}$  будут зависеть от некоторых свободных параметров, которые представим в виде вектора параметров  $\mathbf{a}$ . В качестве  $\mathbf{R}_{\text{high}}(\mathbf{k})$  будем использовать оператор в известной форме [13, 14]:

$$\mathbf{R}_{\text{high}}(\mathbf{k}) = a_0 \left( (\cos(\varphi - \varphi_c))^{a_3} k^{a_1 + a_2 \cos(\varphi - \varphi_c)} \right). \quad (5)$$

Низкочастотную составляющую восстанавливающего оператора  $\mathbf{R}_{\text{low}}(\mathbf{k})$  будем строить в виде, характерном для большинства аппроксимаций спектров морского волнения [6]:

$$\mathbf{R}_{\text{low}}(\mathbf{k}) = \exp(a_4 k^{a_5}), \quad (6)$$

где  $a_4$  и  $a_5$  — свободные настраиваемые параметры, которые в общем случае зависят от гидрометеорологических условий.

Пространственный спектр уклонов поверхностного волнения  $\Phi(\mathbf{k})$  получается путем применения восстанавливающего оператора к двумерному спектру аэрокосмического изображения [1, 10–14]. Для получения значений компонент вектора  $\mathbf{a}$  будем использовать

данные о спектрах морского волнения, получаемых с помощью контактных измерений с использованием решетки струнных волнографов [5], при этом будем учитывать дисперсионное соотношение для гравитационных волн [2]:

$$\omega^2 = gk.$$

Дисперсионное соотношение связывает циклическую частоту  $\omega = 2\pi/T$  волны, распространяющейся по водной поверхности с временным периодом  $T$ , и пространственную циклическую частоту  $\omega = 2\pi/\Lambda$ . Диапазон пространственных частот, соответствующих частотам, измеряемых контактным методом, в общем случае отличается от диапазона пространственных частот в спектре, восстанавливаемом по спектру аэрокосмического изображения. Область на плоскости пространственных частот  $(k_x, k_y)$ , в которой возможно измерение поверхностных волн как контактным, так и дистанционным методами, назовем общей пространственно-частотной областью  $\Xi_{\text{com}}$ .

Обозначим пространственный спектр уклонов морских волн в общей пространственно-частотной области  $\Phi_{\text{com}}(\mathbf{k})$ , а соответствующий спектр изображения —  $S_{\text{com}}(\mathbf{k})$ . Записав выражение для  $\Phi_{\text{com}}(\mathbf{k})$  в полярных координатах  $(k, \varphi)$ , где  $\varphi = \arctan(k_y/k_x)$ , с учетом (4), получим:

$$\Phi_{\text{com}}(k, \varphi, \mathbf{a}) = \mathbf{R}(k, \varphi, \mathbf{a})S_{\text{com}}(k, \varphi). \quad (7)$$

Тогда спектр возвышений морской поверхности  $\Psi(\mathbf{k})$ , связанный со спектром аэрокосмического изображения  $S(\mathbf{k})$  соотношением (3), в области низких частот определяется по формуле:

$$\Psi_{\text{com}}(k, \varphi, \mathbf{a}) = \frac{\mathbf{R}(k, \varphi, \mathbf{a})S_{\text{com}}(k, \varphi)}{(\cos \varphi k_x + \sin \varphi k_y)^2}, \quad k \in \Xi_{\text{com}}. \quad (8)$$

Поскольку волнографом регистрируются одномерные частотные спектры  $\Psi^{\text{конт}}(\omega)$ , то для калибровки двумерных спектров, получаемых по аэрокосмическим изображениям, необходимо сначала перейти к одномерному пространственному спектру:

$$\chi^{\text{дист}}(k) = C \iint \Psi(k, \varphi) k dk d\varphi, \quad (9)$$

а затем, воспользовавшись дисперсионным соотношением  $\omega^2 = gk$  и условием равенства энергии в элементарном объеме  $\psi(\omega)d\omega = \chi(k)dk$ , к частотному спектру:

$$\psi_{\text{low}}^{\text{дист}}(\omega) = \chi_{\text{low}}^{\text{дист}}(k) \frac{2\omega}{g}. \quad (10)$$

В качестве меры различия спектров, полученных дистанционным и контактным методами, используем функцию [6]

$$\text{dist}(\psi_{\text{com}}^{\text{дист}}(\omega), \psi_{\text{com}}^{\text{конт}}(\omega)) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\psi_{\text{com}}^{\text{дист}}(\omega_i) - \psi_{\text{com}}^{\text{конт}}(\omega_i)}{\psi_{\text{com}}^{\text{конт}}(\omega_i)} \right)^2}, \quad (11)$$

где  $\omega_i, i = 1, \dots, n$ , — значения частоты по калибровочным данным;  $\psi_{\text{com}}^{\text{дист}}(\omega)$  и  $\psi_{\text{com}}^{\text{конт}}(\omega)$  — частотные спектры, полученные на основе спутниковых и контактных данных. Оптимальные значения компонент вектора параметров  $\mathbf{a} = (a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$  находятся путем минимизации функции (11):

$$\mathbf{a} = \arg \min_{\mathbf{a}} \text{dist} \left( \psi_{\text{com}}^{\text{дист}}(\omega), \psi_{\text{com}}^{\text{конт}}(\omega) \right). \quad (12)$$

Опишем процедуру построения модифицированного восстанавливающего оператора  $\mathbf{R}(\mathbf{k})$ . В области высоких частот восстанавливающий оператор полностью определяется формулой (5), а в области низких частот он определяется формулой (6). При этом оптимальные значения параметров  $\mathbf{a}$  могут быть вычислены в результате оптимизационного процесса, который может быть представлен в виде последовательности этапов. Блок-схема метода формирования модифицированного восстанавливающего оператора для получения спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений приведена на рис. 1. Входными данными процедуры реализации метода являются контактные данные, получаемые от решетки струнных волнографов, аэрокосмические оптические изображения, а также набор параметров оптимизационного процесса:

- начальные значения компонент вектора параметров  $\mathbf{a}$ ;
- интервалы сходимости этих параметров  $a_i \in (a_{i,\min}, a_{i,\max}), i = 0, \dots, 5$ ;
- шаги дискретизации по компонентам параметра  $a_i$ ;
- параметры, определяющие границы области  $\Xi_{\text{com}}$  на плоскости  $k_x, k_y$ ;
- начальное значение ошибки  $\text{err}_0 = 1$ .

Вычислительная процедура реализации метода состоит из нескольких рабочих процессов [6].

В **1-м рабочем процессе** выполняется анализ данных наземных контактных измерений. В этом процессе выполняются следующие вычислительные операции (см. рис. 1):

- 1) по аэрокосмическому изображению определяются значения  $\omega_i, i = 1, \dots, n$ , для области  $\Xi_{\text{com}}$ ;
- 2) производится аппроксимация данных, полученных при контактных измерениях частотного спектра волнения  $\psi_{\text{low}}^{\text{конт}}(\omega)$ , и вычисляются значения аппроксимирующей кривой в точках  $\omega_i, i = 1, \dots, n$ .

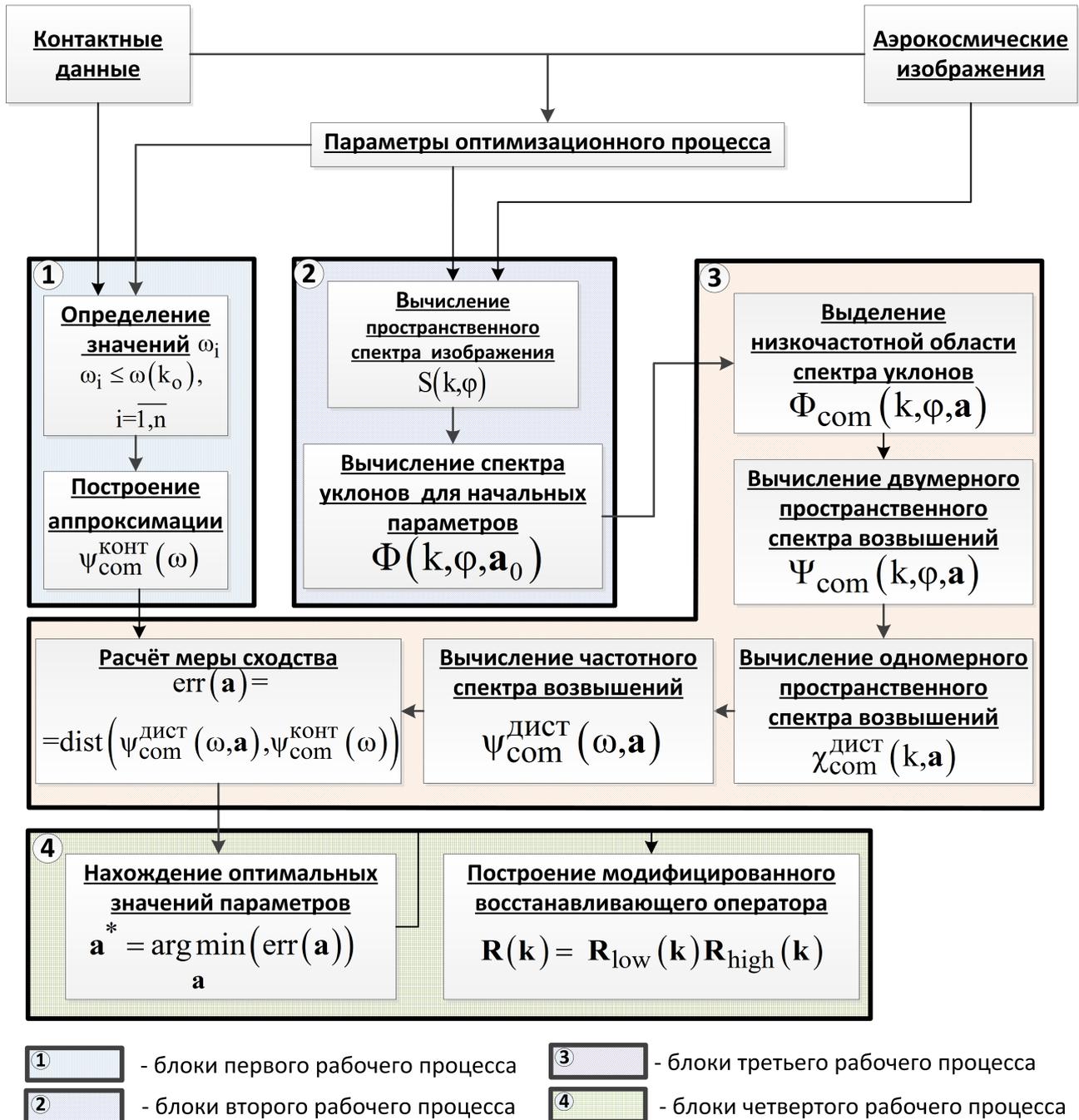
Эти параметры используются далее в **3-м рабочем процессе** процедуры построения восстанавливающего оператора, описанном ниже.

Во **2-м рабочем процессе** выполняется обработка аэрокосмических изображений. На вход **2-го процесса** поступают: фрагменты аэрокосмических изображений морской поверхности и начальные значения параметров  $a_{i,0}$ . В процессе выполняются следующие операции:

- 1) вычисляется двумерный пространственный спектр аэрокосмического изображения  $S(k, \varphi)$ ;
- 2) по формуле (7) вычисляется начальная оценка спектра уклонов в области  $\Xi_{\text{com}}$  для начальных параметров  $a_{i,0}$ .

Эти характеристики используются в **3-м рабочем процессе** процедуры построения восстанавливающего оператора. В **3-м процессе** осуществляется перебор значений свободных параметров восстанавливающего оператора, задаваемого формулой (6), с заданными шагами в заданных диапазонах их изменения. При этом выполняются следующие операции:

- 1) на каждом шаге по формуле (7) вычисляется пространственный спектр уклонов  $\Phi_{\text{com}}$  для области  $\Xi_{\text{com}}$ ;
- 2) по формуле (8) вычисляется двумерный пространственный спектр возвышений  $\Psi_{\text{com}}(k, \varphi, \mathbf{a})$  для области  $\Xi_{\text{com}}$ ;



**Рис. 1** Блок-схема метода формирования модифицированного восстанавливающего оператора для получения спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений

- 3) по формуле (9) вычисляется одномерный пространственный спектр возвышений  $\chi_{\text{low}}^{\text{дист}}(k, \mathbf{a})$ ;
- 4) по формуле (10) вычисляется интегральный частотный спектр для области низких частот  $\psi_{\text{low}}^{\text{дист}}$ ;
- 5) по формуле (11) рассчитывается мера различия спектров, построенных по результатам контактных измерений и по дистанционным данным  $\text{err} = \text{dist}(\psi_{\text{com}}^{\text{дист}}(\omega), \psi_{\text{com}}^{\text{конт}}(\omega))$ .

В завершение **3-го процесса** проверяется условие остановки итерационного процесса, соответствующее минимальной ошибке  $\text{err}_0$ . В **4-м рабочем процессе** процедуры построения восстанавливающего оператора определяются значения компонент вектора параметров, которые минимизируют меру различия (11) между  $\psi_{\text{com}}^{\text{дист}}(\omega)$  и  $\psi_{\text{com}}^{\text{конт}}(\omega)$ . Затем строится модифицированный восстанавливающий оператор.

## 4 Вычислительные эксперименты

Проверка работоспособности разработанного метода проводилась с использованием результатов комплексных экспериментальных исследований. При этом выполнялась совместная обработка космических изображений высокого пространственного разрешения и данных, полученных при синхронных контактных измерениях с помощью решетки струнных волнографов. Оптимальные значения параметров восстанавливающих операторов рассчитывались описанным выше методом. Изучалась также применимость разработанного метода для измерений характеристик ветрового волнения при различных условиях волнообразования. В процессе исследований использовались результаты подспутниковых измерений частотных спектров возвышений морской поверхности с помощью решетки струнных волнографов, полученные в ходе экспериментов, проведенных в акватории Черного моря в районе пос. Кацивели со стационарной океанографической платформы. В ходе этих экспериментов были получены космические изображения исследуемой акватории с помощью оптической аппаратуры спутника GeoEye с пространственным разрешением 0,5 м. Экспериментальные исследования проводились при различных условиях [6]

- Эксперимент №1 — для случая слабого ветрового волнения (скорость ветра  $w_b$  от 0 до 2 м/с) в присутствии волн зыби (эксперимент проведен 16 сентября 2012 г.).
- Эксперимент №2 — для случая развитого ветрового волнения при скорости ветра  $w_b = 10\text{--}11$  м/с (эксперимент проведен 24 сентября 2015 г.).

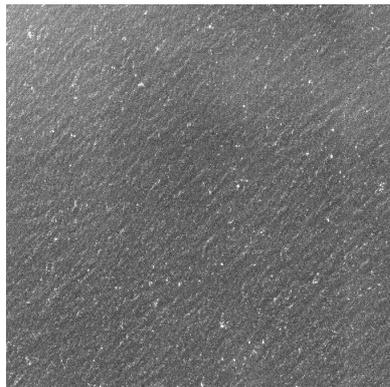
На рис. 2 представлены некоторые результаты восстановления спектров уклонов и возвышений ветрового волнения для эксперимента №2, с использованием восстанавливающего оператора  $\mathbf{R}(\mathbf{k})$ . По спектру фрагмента космического изображения (см. рис. 2, а) восстановлен двумерный спектр уклонов, показанный на рис. 2, в. По восстановленному двумерному спектру уклонов рассчитан одномерный частотный спектр возвышений, который сопоставлен одномерным частотным спектрам возвышений, рассчитанным по данным струнных волнографов на рис. 2, б. Наблюдается хорошее соответствие между данными дистанционных и контактных измерений во всем частотном диапазоне.

На рис. 2, б приведена также известная аппроксимация Тоба для интервала равновесия частотного спектра морского волнения, которая описывается формулой [15]:

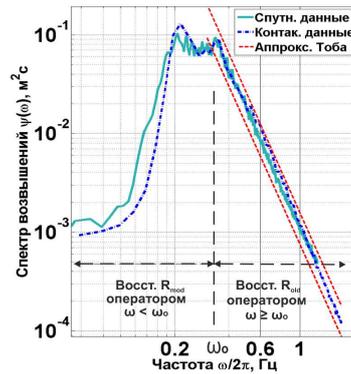
$$S(\omega) = \alpha g u_* \omega^{-4},$$

где  $u_*$  — динамическая скорость;  $\alpha$  — коэффициент, определяемый эмпирически и равный 0,06 и 0,11 для двух показанных пунктирных линий.

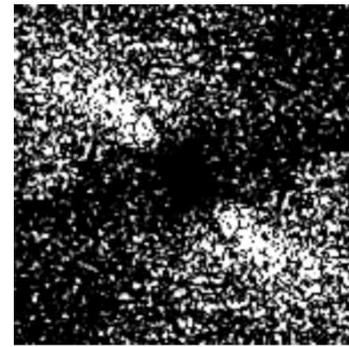
Далее на рис. 2г для сравнения приведен двумерный пространственный спектр уклонов, восстановленный оператором  $\mathbf{R}_{\text{high}}$ , построенным с использованием первых четырех компонент вектора  $\mathbf{a}$  и действующим только в области степенного спада спектральной мощности уклонов. В восстановленном двумерном спектре уклонов на рис. 2, г наблюдаются явные искажения в низкочастотной области, что подтверждается ходом одномерного частотного спектра возвышений, сопоставленного на рис. 2, д со спектром, полученным по



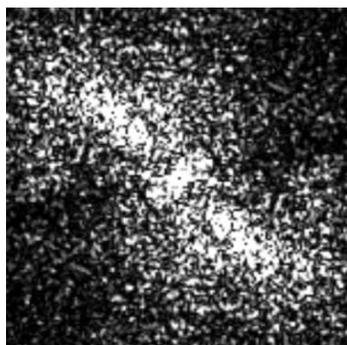
(а) Фрагмент космического изображения



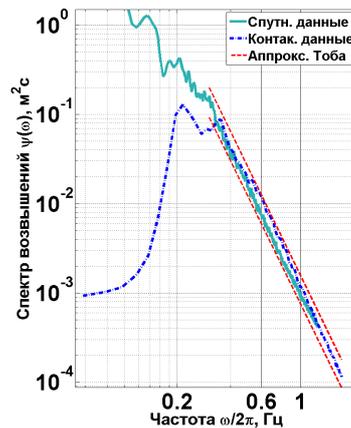
(б) Сопоставление одномерных частотных спектров возвышений, полученные из двумерного спектра уклонов с данными струнных волнографов



(в) Восстановленный двумерный спектр уклонов



(г) Двумерный пространственный спектр уклонов, восстановленный восстанавливающим оператором  $R_{high}$ , в котором наблюдаются искажения в низкочастотной области

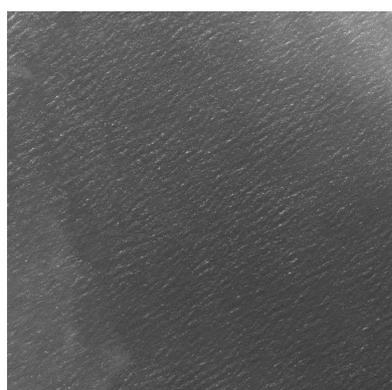


(д) Сопоставление с данными струнных волнографов одномерных частотных спектров возвышений, полученные из двумерного спектра уклонов при наличии искажений в низкочастотной области

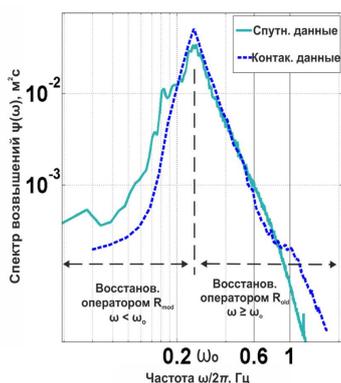
**Рис. 2** Сопоставление восстановленных спектров ветрового волнения с данными струнных волнографов

контактным данным. Расхождение спектров в низкочастотной области значительно, что свидетельствует о необходимости включения низкочастотной компоненты восстанавливающего оператора  $R_{low}(k)$ .

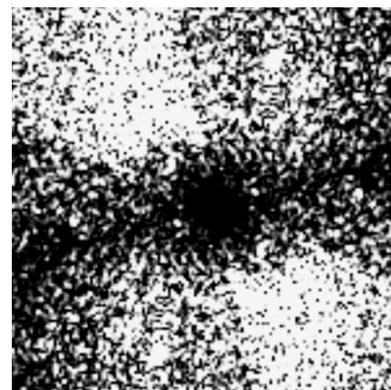
На рис. 3 представлены некоторые результаты восстановления спектров уклонов и возвышений ветрового волнения в присутствии волн зыби (эксперимент № 1), аналогичные приведенным на рис. 2 [6]. Сопоставление одномерного частотного спектра возвышений, рассчитанного по восстановленному спектру уклонов, с одномерным частотным спектром возвышений, рассчитанным по данным струнных волнографов, также демонстрирует хо-



(а) Фрагмент космического изображения



(б) Сопоставление одномерных частотных спектров возвышений, полученные из двумерного спектра уклонов с данными струнных волнографов



(в) Восстановленный двумерный спектр уклонов

**Рис. 3** Сопоставление восстановленных спектров ветрового волнения с данными струнных волнографов [6]

Параметры аппроксимации восстанавливающего оператора, полученные разработанным методом

| $a_0$  | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,0005 | -0,43 | 0,29  | 0,23  | -0,3  | -0,8  |

рошее соответствие между данными дистанционных и контактных измерений во всем частотном диапазоне.

В таблице приведены оптимальные значения компонент вектора  $\mathbf{a}$  параметров аппроксимации восстанавливающего оператора, полученные в результате оптимизации по формуле (12). Начальные значения  $\mathbf{a}_0$  в процедуре оптимизации задавались следующим образом. В качестве параметров аппроксимации  $a_{1,0}$ ,  $a_{2,0}$  и  $a_{3,0}$  использовались значения, полученные в работе [6]. Начальные значения параметров низкочастотной части оператора задавались эмпирически:  $a_{4,0} = 0,5$  и  $a_{5,0} = 0,5$ . Для  $a_{0,0}$  использовалась эмпирическая зависимость дисперсии уклонов от скорости приповерхностного ветра [16]. Скорость ветра определялась по экспериментальным данным, полученным на океанографической платформе.

## 5 Заключение

Разработан метод построения оператора для восстановления спектров уклонов и возвышений морского волнения по спектрам аэрокосмических оптических изображений в широком диапазоне частот. Оптимальные параметры такого восстанавливающего оператора определяются итерационным путем при сопоставлении спектров аэрокосмических изображений со спектрами характеристик морского волнения, измеренными с высокой точностью струнными волнографами в контролируемых условиях.

В результате численной оптимизации подобраны значения параметров нелинейных восстанавливающих фильтров, работающих в различных условиях, как для развивающегося

волнения, так и в присутствии волн зыби. Расхождение спектров волнения, восстановленных по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения и подспутниковым данным при оптимальных значениях параметров, невелико и составляет  $\sim 0,1$ , что свидетельствует об адекватности предложенного метода построения восстанавливающего оператора.

Разработанный метод может использоваться при дистанционных исследованиях состояния поверхностного волнения, в том числе при космическом мониторинге естественных и антропогенных воздействий на морские акватории.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект №2015/Н8).

## Литература

- [1] *Бондур В. Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии. — В кн. “Новые идеи в океанологии” М.: Наука, Т1: Физика. Химия. Биология, 2004. С. 55-117.
- [2] *Давидан И. Н., Лопатухин Н. И., Рожков В. А.* Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. 284 с.
- [3] *Барановский В. Д., Бондур В. Г., Кулаков В. В., Малинников В. А., Мурынин А. Б.* Калибровка дистанционных измерений двумерных пространственных спектров волнения по оптическим изображениям // Исследование Земли из космоса, 1992. № 2. С. 59–67.
- [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. № 6. С. 827–846.
- [5] *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. doi: 10.7868/S0205961416010048.
- [6] *Бондур В. Г., Дулов В. А., Мурынин А. Б., Игнатъев 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. 717–728.
- [7] *Бондур В. Г., Старченков С. А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- [8] *Бондур В. Г., Савин А. И.* Принципы моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды // Исследование Земли из космоса, 1995. № 4. С. 24–33.
- [9] *Бондур В. Г.* Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса, 2000. № 5. С. 16–27.
- [10] *Бондур В. Г.* Моделирование двумерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры методом фазового спектра // Исследование Земли из космоса, 2000. № 5. С. 28–44.
- [11] *Мурынин А. Б.* Восстановление пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям в нелинейной модели поля яркости // Исследования Земли из космоса, 1990. № 6. С. 60–70.
- [12] *Бондур В. Г., Мурынин А. Б.* Восстановление спектров поверхностного волнения по спектрам изображений с учетом нелинейной модуляции поля яркости // Оптика атмосферы и океана, 1991. Т. 4. № 4. С. 387–393.

- [13] *Мурынин А. Б.* Параметризация фильтров, восстанавливающих пространственные спектры уклонов морской поверхности по оптическим изображениям // Исследования Земли из космоса, 1991. № 5. С. 31–38.
- [14] *Бондур В. Г., Мурынин А. Б.* Методы восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений // Исследования Земли из космоса, 2015. № 6. С. 3–14. doi: 10.7868/S0205961415060020.
- [15] *Toba J.* Local balance in the air–sea boundary process // Oceanogr. Soc. Japan, 1973. Vol. 29. Iss. 5. P. 209–225. doi: 10.1007/BF02108528.
- [16] *Cox C., Munk W.* Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun’s glitters // J. Opt. Soc. Amer., 1954. Vol. 44. Iss. 11. P. 838–850. doi: 10.1364/JOSA.44.000838.

Поступила в редакцию 30.08.2016

## Parameters optimization in the problem of sea-wave spectra recovery by airspace images\*

*V. G. Bondur*<sup>1</sup>, *A. B. Murynin*<sup>1,2</sup>, and *V. Yu. Ignatiev*<sup>1,2</sup>

vgbondur@aerocosmos.info; amurynin@bk.ru; vladimir.ignatiev.mipt@gmail.com

<sup>1</sup>ISR “AEROCOSMOS,” 4 Gorokhovskii per., Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal Research Center “Computer Science and Control” of RAS, 44/2 Vavilova Str., Moscow, Russia

The problem of the sea surface spectra reconstruction on aerospace images over a wide wavelength range is considered. Within the described nonlinear model of the brightness field, registered by remote sensing equipment, a modification of recovery operator, which acts in the whole spatio-spectral domain has been proposed. The iterative process of selecting the optimal values of the modified parameters for the operator is presented using the ground truth measurements for validation. The results of the test performance for constructed operator under different registration conditions of the sea surface images are analyzed.

**Keywords:** *spatial spectrum; recovery operator; optimization of the parameters*

**DOI:** 10.21469/22233792.2.2.07

## References

- [1] Bondur, V. G. 2004. *Aerospace methods in modern oceanology*. New Ideas in Oceanology. V.1. Physics. Chemistry. Biology. Moscow: Nauka. P. 55–117.
- [2] Davidan, I. N., N. I. Lopatukhin, and V. A. Rozhkov. 1978. *Vetrovoe volnenie kak veroyatnostnyy gidrodinamicheskiiy protsess*. Leningrad: Gidrometeoizdat. 284 p.
- [3] Baranovskii, V. D., V. G. Bondur, V. V. Kulakov, V. A. Malinnikov, and A. B. Murynin. 1992. Calibration of remote measurements of two-dimensional spatial spectra of wind waves by optical images. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing] 2:59–67.
- [4] Bondur, V. G., N. N. Filatov, Yu. V. Grebenyuk, Yu. S. Dolotov, R. E. Zdrovenov, M. P. Petrov, and M. N. Tsidilina. 2007. Studies of hydrophysical processes during monitoring of the anthropogenic impact on coastal basins using the example of Mamala Bay of Oahu Island in Hawaii. *Oceanology* 47(6):769–787.

---

\*The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants 14-05-91759 , 16-51-55019).

- [5] Bondur, V. G., V. A. Dulov, A. B. Murynin, and Yu. Yu. Yurovskiy. 2016. A study of sea-wave spectra in a wide wavelength range from satellite and in-situ data. *Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics* Vol.52, 9:888–903 doi: 10.1134/S0001433816090097.
- [6] Bondur, V. G., V. A. Dulov, A. B. Murynin, and V. Yu. Ignatiev. 2016. Retrieving sea wave spectra using satellite imagery spectra in a wide range of frequencies. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 52(6):637–648.
- [7] Bondur, V. G., and S. A. Starchenkov. 2001. Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for treatment and classification of space images]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodesiya i aerofotos"emka* 3:118–143. (In Russian.)
- [8] Bondur, V. G., and A. I. Savin. 1995. Printsipy modelirovaniya poley signalov na vkhode apparatury DZ aerokosmicheskikh sistem monitoringa okruzhayushchey sredy [Principles of modeling of field signals at input of remote sensing instrumentation of aerospace environmental monitoring systems]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing] 4:24–33.
- [9] Bondur, V. G. 2000. Metody modelirovaniya poley izlucheniya na vkhode aerokosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya [Methods of the emission model field formed at the entrance of airspace remote sensing system]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing] 5:16–27.
- [10] Bondur, V. G. 2000. Modelirovanie dvumernykh sluchaynykh poley yarkosti na vkhode aerokosmicheskoy apparatury metodom fazovogo spektra [Simulation of two-dimensional random fields on the input brightness aerospace equipment by phase spectrum]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing] 5:28–27.
- [11] Murynin, A. B. 1990. Vosstanovlenie prostranstvennykh spektrov morskoy poverkhnosti po opticheskim izobrazheniyam v nelineynoy modeli polya yarkosti [Restoration of the spatial spectrum of the sea surface from the optical images in a nonlinear model of brightness field]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing] 6:60–70.
- [12] Bondur, V. G., and A. B. Murynin. 1991. Vosstanovlenie spektrov poverkhnostnogo volneniya po spektram izobrazheniy s uchetom nelineynoy modulyatsii polya yarkosti [Recovery spectra of surface waves on the spectra of the image based on the brightness of the nonlinear field modulation]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Ocean Optics] 4(4):387–393.
- [13] Murynin, A. B. 1991. Parametrizatsiya fil'trov, vosstanavlivayushchikh prostranstvennye spektry uklonov morskoy poverkhnosti po opticheskim izobrazheniyam [Parametrization of filters restoring spatial spectra of slopes of sea surface using optical images]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing] 5:31–38.
- [14] Bondur, V. G., and A. B. Murynin. 2015. Methods for retrieval of sea wave spectra from aerospace image spectra. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* Vol.52, 9:877–887. doi: 10.1134/S0001433816090085.
- [15] Toba, J. 1973. Local balance in the air–sea boundary process. *Oceanogr. Soc. Japan* 29(5):209–225. doi: 10.1007/BF02108528.
- [16] Cox, C., and W. Munk. 1954. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitters. *J. Opt. Soc. Amer.* 44(11):838–850. doi: 10.1364/JOSA.44.000838.

Received August 30, 2016