

А.Б. Мурынин, Е.А. Лупян

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАНИЦЫ ОКЕАН—АТМОСФЕРА ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Показано, что изолинии уклонов морской поверхности являются фрактальными кривыми и могут характеризоваться дробной размерностью, причем последняя определяется показателем степенного спектра возвышений поверхности. Показано, что при монотонной передаточной функции «уклон—яркость» изолинии изображения могут быть связаны с изолиниями поверхности. Получена зависимость фрактальной размерности изолиний от показателя степени спектра  $p$  для двумерного изотропного случайного поля. Построена обратная функция, позволяющая оценивать спектр поверхности по фрактальной размерности изолиний.

**Введение.** Для многих задач контроля состояния морской поверхности требуется восстановление спектров высот и уклонов волнения по данным дистанционного зондирования, в частности по его оптическим изображениям. И хотя этой проблеме посвящено немало работ (см. [1]–[4] и приведенные там ссылки), эффективные методы ее решения в настоящее время разработаны лишь в линейном приближении, т. е. когда яркость изображения считается пропорциональной уклонам морской поверхности. В ряде же случаев передаточная функция преобразующая поля высот и уклонов поверхности в поле яркости изображения, существенно нелинейна (например, в районах, где на изображениях, полученных как при солнечном, так и при точечном искусственном освещении [5], наблюдается большое число бликов). При этом не удается аналитически связать спектр оптического изображения со спектром волнения, поэтому для восстановления различных спектральных характеристик морского волнения требуется разрабатывать специальные методы решения задачи. Можно идти, в частности, по пути поиска таких характеристик изображения, которые, с одной стороны, не зависели бы от конкретного вида передаточной функции, а с другой — были бы связаны с характеристиками спектра волнения.

В настоящей работе мы покажем, что когда передаточная функция обратима, такой характеристикой для полей волнения, обладающих степенным спектром, является фрактальная размерность изолиний яркости их изображений. (Объяснение понятия фрактальной размерности можно найти в [6, 8]).

**Постановка задачи.** Процесс формирования оптического изображения морской поверхности хорошо описывается в рамках модели зеркального отражения и преломления [4]. В этой модели яркость элемента изображения  $V(x, y)$  является функцией градиента (наклона) элемента морской поверхности  $\alpha$  и может быть представлена в виде

$$V(x, y) = B_0(x, y) + B_1(x', y', \alpha(x', y')), \quad (1)$$

где  $x', y'$  — координаты точек на морской поверхности, которые на изображении имеют координаты  $x, y$ ;  $B_0(x, y)$  — плавный тренд яркости (медленно меняющаяся функция координат), определяемый условиями освещения и не зависящий от состояния морской поверхности. Существует ряд хорошо разработанных методов учета  $B_0$ , поэтому в дальнейшем мы будем анализировать лишь передаточную функцию  $B_1$ , и описывающую модуляцию поля яркости уклонами поверхности. Вид функции  $B_1$  достаточно сложен, так как она зависит в общем случае от большого количества параметров: высоты Солнца над горизонтом или положения источника освещения, наличия атмосферной дымки, вида облачности и других оптических характеристик атмосферы.

В ряде случаев (например, при съемке с достаточно узкопольным объективом),  $B_1$  можно представить в виде  $B_1 = B_1(\alpha(x', y'))$ . Пусть  $B_1$  является монотонной функцией  $\alpha$ . Практически это часто встречающаяся ситуация, которая возникает, например, в условиях солнечного освещения в областях, не захватывающих центральную часть солнечной дорожки, или в условиях диффузного освещения при съемке под настильными углами.

В данном случае существует взаимнооднозначное соответствие между изолиниями яркости и изолиниями поля уклонов  $\alpha(x', y')$ . Действительно, предположим, что исследуются изолинии поля уклонов, определяемые уравнением:  $\alpha(x, y) = h_\alpha$ . Относительное число выбросов  $n$  поля уклонов за порог  $h_\alpha$  однозначно определяется величиной этого порога и плотностью распределения уклонов  $\omega(\alpha)$  на

морской поверхности из соотношения:  $n = \int_{h_\alpha}^{\infty} \omega(\alpha) d\alpha$ .

В случае монотонной зависимости  $B_1$  от  $\alpha$ ,  $n$  будет также однозначно определяться соотношением

$$n = \int_{h_\alpha}^{\infty} \omega_b(b) db, \quad (2)$$

где  $h_b = B_1(h_\alpha)$ ,  $\omega_b(b)$  — плотность распределения яркости на изображении. При этом будут однозначно определяться и границы выбросов, т.е. изолинии яркости на изображении. Это соответствует тому, что изолиния поля уклонов на поверхности однозначно отобразится в изолинию поля яркости на изображении. При этом в случае, когда съемка делается без пространственных искажений, форма изолинии яркости не будет зависеть от  $B_1$ , а будет определяться лишь формой изолинии в поле уклонов. Таким образом, в случае монотонной передаточной функции, определяющей формирование изображений, инвариантом является форма изолинии яркости изображения. Поэтому если удастся найти характеристику этой формы, связанную со спектром уклонов (а значит, и высот) морской поверхности, то, даже не зная конкретного вида  $B_1$ , по изображению можно восстанавливать спектральные характеристики морского волнения.

Спектр морского волнения во многих случаях хорошо описывается степенным законом вида  $\Psi(\kappa_x, \kappa_y) \sim \kappa^{-p}$ , где  $\kappa = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}$ . При этом одной из важных задач диагностики и изучения морского волнения является определение показателя  $p$ . Поэтому попробуем найти такую характеристику формы изолинии, которая была бы связана с  $p$ . Отметим, что случайные поля, имеющие степенной спектр в некотором диапазоне масштабов, обладают свойством самоподобия [6, 7]. Такие поля в ряде случаев являются фрактальными и им можно приписать некоторую фрактальную (дробную) размерность, причем эта размерность непосредственно связана с  $p$  (см. [7, 9]).

Фрактальная размерность характеризует именно форму поверхности, а следовательно, и форму ее изолиний, являясь одним из вариантов меры. Кроме того, фрактальная размерность изолиний может быть легко оценена по изображениям (см. [6]–[9]).

Определив фрактальную размерность  $D$  изолиний яркости изображений морской поверхности, мы фактически определим фрактальную размерность  $D_\alpha$  изолиний поля уклонов поверхности  $\alpha(x, y)$ . После этого встает задача исследования связи между  $D_\alpha$  и  $p$ . Решив ее, мы получаем возможность использовать инвариантную для достаточно широкого класса передаточных функций характеристику поля уклонов морской поверхности для анализа спектра волнения.

Как отмечалось в [7], фрактальная размерность изолинии зависит от функции корреляции поверхности, которая в свою очередь определяется ее спектром. В общем случае эта связь достаточно сложная и сильно зависит от уровня, на котором проведена изолиния. Аналитической зависимости между  $p$  и  $D_\alpha$  в общем виде для полей различной размерности вывести аналитически не удастся. (Некоторые соотношения можно получить, если  $\alpha$  является функцией одной переменной [7, 9]). Поэтому приходится прибегать к численным экспериментам.

**Численное моделирование полей с различными спектрами и определение фрактальной размерности их изолиний.** Для выяснения зависимости  $D$  от  $p$  в двумерном случае проводилось численное моделирование полей уклонов для поверхности с заданным спектром, выделение на них изолиний, оценка их фрактальной размерности и построение зависимости

$$D = D(p, n),$$

где  $p$  — показатель спектра;  $n$  — относительное число выбросов, определяющее уровень, на котором проведена изолиния. Как мы видели выше, параметр  $n$  инвариантен по отношению к изменению исследуемых передаточных функций. Поэтому именно им удобно пользоваться при анализе результатов, а не значением порога  $h_\alpha$ , который приходится пересчитывать в пороговое значение яркости на изображение  $h_b$ , меняющееся в зависимости от конкретного вида передаточной функции  $B_1$ .

При моделировании задачи поверхности рассматривается как случайное гауссовское поле возвышений  $z = \xi(x, y)$ , имеющее степенной спектр.  $\Psi = k^{-p}$ . Подробное описание метода, которым проводилось моделирование, можно найти в [9, 10]. После того как поле было синтезировано, задавалась относительная площадь выбросов  $n$  и определялся порог бинаризации  $h$ . Далее изображение бинаризовалось по порогу  $h$  и производилось выделение границ выбросов по алгоритму, приведенному в [9].

Для вычисления фрактальной размерности выделенной изолинии выполняется покрытие изображения квадратами с размерами сторон  $r = t, 2t, 3t, \dots$ , где  $t$  — шаг дискретизации изображения, и строится зависимость числа элементов покрытия  $N$ , т. е. числа квадратов, в которые попали элементы изображения, яркость которых равна 1, от  $r$ . Фрактальная размерность  $D$  определяется как параметр линейной аппроксимации зависимости  $\ln N(r)$  от  $\ln r$ . Полученное значение фрактальной размерности  $D$  сопоставляется с показателем степенного спектра  $p$ , заданным при синтезе поля уклонов.

Повторение перечисленных процедур при различных значениях показателя  $p$  и параметра  $n$  позволяет получать зависимость  $D(p, n)$ .

**Результаты численного моделирования.** По описанной выше схеме проводилось изучение зависимости фрактальной размерности изолиний от показателей степенных спектров возвышений поверхности. В процессе моделирования были синтезированы случайные поля уклонов для поверхностей,

поле высот которых имеет спектр вида  $k^{-p}$ . При этом значение показателя спектра  $p$  менялось в диапазоне от  $10/3$  до  $4,5$ . Диапазон был выбран так, чтобы охватить характерные ситуации, возникающие на разных стадиях развития морского волнения.

Примеры синтезированных полей уклонов, их бинаризованные при пороге  $n = 0,5$  изображения и соответствующие изолинии приведены на рис. 1.

Эти примеры даны для трех различных значений  $p$ :

1)  $p = 10/3$  (рис. 1, *а*, *б*, *в*) – спектр с таким показателем формируется за счет нелинейных взаимодействий волн [11];

2)  $p = 4$  (рис. 1, *г*, *д*, *е*) – равновесный филлиповский спектр развитого ветрового волнения [12];

3)  $p = 4,5$  (рис. 1, *ж*, *з*, *и*) – спектр волн зыби [13].

Мы видим, что приведенные изображения даже визуально сильно отличаются друг от друга по своей структуре. Так, например, при  $p = 4,5$ , когда поле уклонов  $\alpha(x, y)$  является достаточно гладкой функцией, большинство выбросов поля над заданным порогом являются четко выраженными двумерными областями, их границы (изолинии уклонов) – гладкие одномерные линии. Фрактальная размерность изолиний при  $p = 4,5$ , как будет показано ниже, действительно близка к единице.

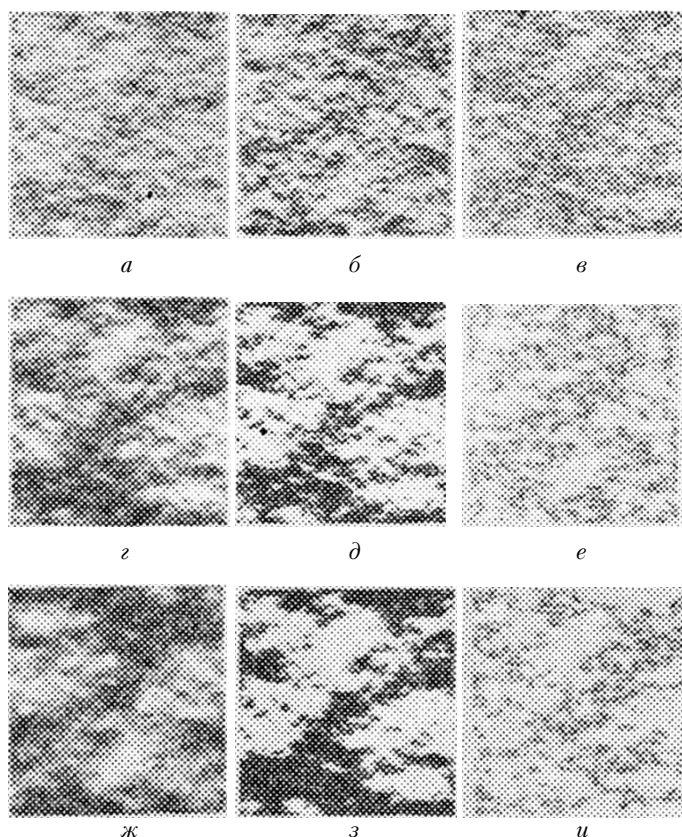


Рис. 1

По мере уменьшения показателя степенного спектра  $p$  увеличивается изрезанность изолиний. При  $p = 10/3$  в некоторых участках изображения даже теряется визуальное различие между бинаризованным полем яркости и его изолиниями. Это хорошо согласуется с тем фактом, что для такого показателя спектра, при стремлении к бесконечности числа учитываемых при формировании поля гармоник, будут возникать разрывы поля  $\alpha(x, y)$  [7]. Размерность отдельных выбросов при этом может стремиться к нулю.

Убедимся, что изолинии действительно фрактальны. Для этого рассмотрим зависимость числа элементов покрытия  $N$  от размера квадратов  $r$  (радиуса покрытия). Зависимости  $\lg(N)$  приведены на рис. 2 для разных значений  $p$ . Видно, что эти зависимости с хорошей точностью можно приблизить прямыми. Наклон прямых и будет определять фрактальную размерность изолиний (см. [9]). Для сравнения на рис. 2 приведены также зависимости  $\lg(N)$  для поля, спектр которого имеет узкий максимум при длине волны  $\Lambda$ . Эта зависимость имеет довольно резкий излом при  $r = \Lambda$  и ее уже нельзя считать линейной, соответственно не имеет смысла говорить и о фрактальной размерности изолинии такого поля на исследуемых масштабах.

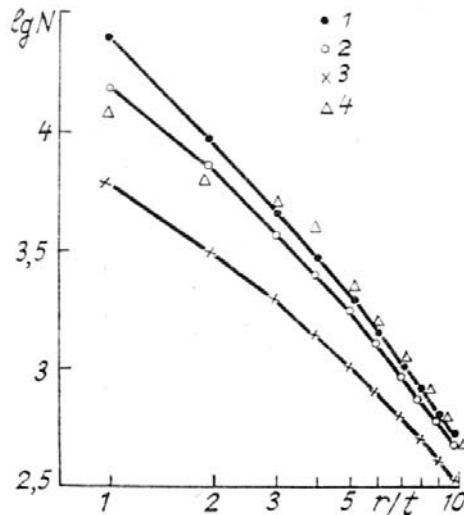


Рис. 2. Зависимость числа элементов покрытия  $N$  от радиуса покрытия  $r$  ( $1-p = 10/3$ ;  $2-p = 4$ ;  $3-p = 4,5$ ;  $4$  – нестепенной спектр с локальным максимумом)

На рис. 2 видно также, что прямые, соответствующие различным значениям показателя степенного спектра, имеют разный наклон. Это значит, что фрактальная размерность изолинии таких полей различна. Зависимости фрактальной размерности от  $n$  и  $p$  приведены на рис. 3.

Рис. 3, *a* показывает, как зависит фрактальная размерность изолиний  $D$  от  $n$  при различных спектрах. Наиболее резкие изменения происходят при малых  $p$ . Это качественно объясняется тем, что при медленно спадающих спектрах в формировании поля практически на всех уровнях  $n$  участвует большое число независимых гармоник. При этом структуру изолинии с  $n \sim 0,5$  определяют некоррелированные гармоники, поэтому эти изолинии будут сильно изломанными линиями с большой фрактальной размерностью. При малых  $n$  структура изолиний зависит от характера выбросов поля, которые определяются также большим числом гармоник, но уже скоррелированных [14]. Как уже говорилось, размерность таких выбросов может стремиться к нулю, соответственно будет стремиться к нулю и размерность изолиний.

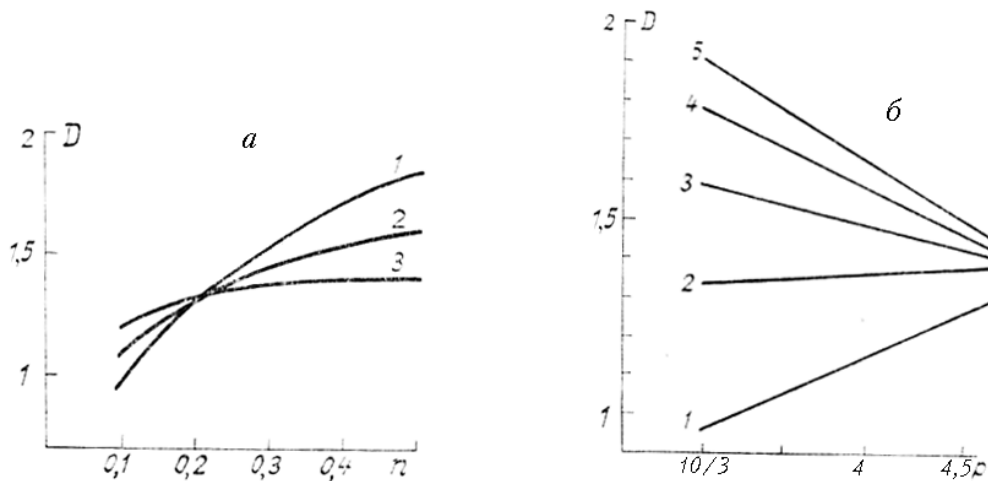


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности  $D$  от: относительного количества выбросов  $n$  ( $1-p = 10/3$ ;  $2-p = 4$ ;  $3-p = 4,5$ ) (*a*); показателя спектра возвышений  $p$  ( $1-n = 0,1$ ;  $2-n = 0,2$ ;  $3-n = 0,3$ ;  $4-n = 0,4$ ;  $5-n = 0,5$ ) (*б*)

В случае больших  $p$  зависимость фрактальной размерности от  $n$  очень слабая. В этом случае поведение поля в достаточно большом диапазоне  $n$  определяется длинноволновыми компонентами. При уменьшении  $n$  размерность все равно начинает падать и независимо от показателя спектра при  $n$ , стремящемся к нулю,  $D$  стремится к нулю. Отличие  $D$  от единицы при  $n \sim 0,5$  в случае гладких полей, например, с  $p = 4,5$ , видимо, связано с тем, что фрактальную размерность мы рассматриваем как некоторую промежуточную асимптотику в ограниченном диапазоне масштабов [6].

На рис. 3, *б* приведена зависимость  $D$  от  $p$  для различных  $n$ . Мы видим, что их поведение сильно зависит от уровня  $n$ . С точки зрения задачи выделения участков поверхности с различными пока-

зателями  $p$  оптимальной является бинаризация при  $n = 0,5$ . Во-первых, при этом значении  $n$ , как видно на рис. 3, б, зависимость  $D(p)$  является наиболее крутой. Во-вторых, при  $n = 0,5$  наибольшее количество элементов изображения принадлежит исследуемой изолинии, что уменьшает (в сравнении с другими значениями  $n$ ) погрешность определения размерности изолинии  $D$ , а следовательно, и связанного с ней показателя спектра  $p$ . Для практического применения очень важным является тот факт, что зависимость  $D$  от  $p$  в исследуемом диапазоне является линейной (рис. 3, б). Это легко позволяет решить задачу нахождения  $p$  при известной фрактальной размерности изолинии  $D$ . Зависимость  $D$  от  $p$  можно представить в виде

$$D(p) = \beta_0(n) + \beta_1(n)(p-3). \quad (3)$$

Весовые функции  $\beta_1(n)$  и  $\beta_0(n)$  найдены на основе численного моделирования. Они приведены на рис. 4. Ими легко можно воспользоваться для решения поставленной задачи, т. е. для нахождения показателя спектра по экспериментально определенной фрактальной размерности.

**Применение полученных результатов.** Изложенные выше результаты позволяют реализовать предлагаемую методику обработки оптических изображений морской поверхности. Обработка осуществляется путем устранения тренда яркости; анализа гистограммы яркости и вычисления порога  $h_b$ , соответствующего заданному значению относительной площади выбросов  $n$ ; выделения границы; вычисления фрактальной размерности  $D$  и расчета показателя  $p$  по формуле (3).

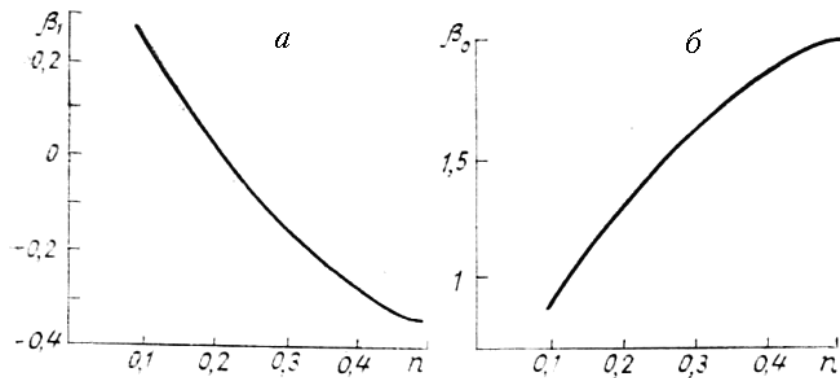


Рис. 4. Весовые функции  $\beta_1(n)$  (а),  $\beta_0(n)$  (б)

Метод оценки спектра волнения, основанный на анализе фрактальной размерности изолиний яркости, имеет ряд преимуществ в сравнении с другими методами решения этой задачи. Основным его достоинством является инвариантность по отношению к условиям освещения. Метод применим в любых условиях, обеспечивающих монотонную зависимость между яркостью элементов морской поверхности и их уклонами в некотором направлении.

Такая монотонность наблюдается в подавляющем большинстве ситуаций естественного освещения морской поверхности. Наиболее существенное значение имеет возможность оценки спектров поверхности по бликовой составляющей поля яркости. Это позволяет использовать как блики в области солнечной дорожки, так и изображения, формируемые системами искусственной импульсной подсветки, предназначенными для работы в темное время суток [5]. Основным ограничением предлагаемого метода является его ориентация на анализ степенных спектров. С помощью него можно, правда, определить, что исследуемый спектр не является степенным, но нельзя изучить структуру нестепенного спектра.

Существенным развитием метода может стать исследование корреляции между различными гармониками поверхностных волн при помощи анализа зависимости фрактальной размерности изолинии от ее уровня. Это особенно важно, потому что в настоящий момент существует много задач, в которых существенным становится взаимодействие между различными гармониками.

1. Титов В. Е. // Изв. АН СССР. Сер. ФЛО. 1982. Т. 18. № 2. С. 215–216.
2. Лупян Е. А. // Исследование Земли из космоса. 1988. № 3. С. 31–35.
3. Большаков А. Н., Бурдюгов В. М., Гродский С. А., Кудрявцев В. Н. // Исследование Земли из космоса. 1988. № 5. С. 11–18.
4. Monaldo F. M., Kasevich R. S. Daylight Imagery of Ocean Surface Waves for Wave Spectra, J. Phys. Oceanography. 1982. V. 11. P. 272–283.
5. Бондур В. Г., Борисов В. Д., Генин В. М., Кулаков В. В., Крутиков В. А., Мурынин А. Б., Тихоступ М. Т. // Тр. 9 Всесоюз. Симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 2. Исследования метеопараметров атмосферы. Томск, 1987. С. 292–296.
6. Баренблатт Г. И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 234 с.
7. Зельдович Я. Б., Соколов Д. А. // УФН. 1985. Т. 146. Вып. 3. С. 493–506.
8. Mandelbrot B. B. Fractal, Form, Chance and Dimension, W.H. Freeman, San Francisco 1977.

9. Лупян Е. А., Мурынин А. В. Возможности фрактального анализа оптических изображений морской поверхности. М., 1989. 30 с. (Препринт/ИКИ АН СССР, ПР-1521).
10. Аржененко Н. И., Бондур В. Г., Мурынин А. Б. //Теренос изображений в земной атмосфере. Томск, 1988. С. 134–138.
11. Захаров В. Е., Заславский М. М. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. № 3. С. 282–291.
12. Филлипс О. М. Динамика верхнего слоя океана. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 319 с.
13. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в мировом океане. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 256 с.
14. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640 с.

Институт космических исследований АН СССР,  
Москва

Поступила в редакцию  
27 сентября 1989 г.

**A. V. Murynin, E. A. Lupyán. Restitution of Spatial Spectral Characteristics of the «Ocean-Atmosphere» Boundary Based on the Optical Sounding Data.**

We analyze the constant-brightness lines on sea surface and their connection with constant-steepness lines and spectra of surface elevations. It is shown that constant-steepness lines are fractal, i. e. they have fractional dimension determined by the spectral index of surface elevations. It is also shown that for monotonous transfer function «steepness-brightness» the constant-brightness lines can be determined from constant-elevation lines. We obtain the dependence of the fractal dimension of the level lines on the spectral index of two-dimensional isotropic random field. The inverse function is obtained, which allows to deduce the spectrum of surface elevations from fractal dimension of contour lines. The obtained results can be used for estimation of spatial spectra of sea surface from images obtained both under natural conditions and for artificial illumination.