

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пр-616

Г.П. Арумов, В.Г. Бондур, А.Е. Попов,  
В.А. Кришталь, В.С. Эткин

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ  
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И ФОТОИЗОБРАЖЕНИИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПРИ НАЛИЧИИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Представлено к печати  
членом-корреспондентом АН СССР  
Н.С. Кардашевым

Экспериментально исследуется возможность обнаружения загрязнений морской поверхности нефтепродуктами по пространственным спектрам ее изображений, получаемых при аэрофотосъемке и при съемке радиолокатором бокового обзора. Приведены одномерные сечения двумерных пространственных спектров радиолокационных и фотоизображений морской поверхности при наличии и отсутствии загрязнений. Показано, что методы радиолокационной и фотосъемки дополняют друг друга.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие космической техники в последние десятилетия открыло новые возможности в исследованиях земной и водной поверхности. Дистанционное зондирование подстилающей поверхности с космических летательных аппаратов базируется на использовании как традиционных методов (например, аэрофотосъемка), так и сравнительно новых (лазерное зондирование, активная и пассивная радиолокация). В связи с этим становится актуальным сравнительный анализ возможностей различных методов при решении некоторых конкретных задач дистанционного зондирования.

Одной из важных прикладных задач космической океанографии является разработка методов оперативного обнаружения и контроля нефтяных загрязнений морской поверхности. Такой контроль на больших площадях удобно осуществлять по изображениям, получаемым различными методами, в частности, по фотозображениям (ФИ) и радиолокационным изображениям (РЛИ). Современные методы обработки изображений (аналоговые и цифровые) позволяют более полно и рационально использовать содержащуюся в них информацию. Применение пространственного спектрального анализа дает возможность по ФИ и РЛИ водной поверхности изучать статистическую структуру волнения, что в дальнейшем может привести к созданию автоматизированных систем обнаружения и контроля нефтяных загрязнений водной поверхности.

В настоящей работе исследуется возможность обнаружения загрязнений морской поверхности нефтепродуктами по пространственным спектрам ее изображений, получаемых при аэрофотосъемке и при съемке с помощью радиолокационной станции бокового обзора (РЛС БО)

## I. СПЕКТРАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ФОРМЫ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Волнение морской поверхности является нестационарным и неоднородным случайным процессом. Статистически полно такой процесс описывается  $n$ -мерной ( $n \rightarrow \infty$ ) функцией распределения вероятностей смещения [1], получение которой в реальных условиях невозможно. Поэтому при решении практических задач приходится пользоваться функциями, дающими более грубое описание статистических свойств морской поверхности. В частности, наибольшее распространение получили двумерная корреляционная функция  $R(x, y)$  и двумерная спектральная плотность  $\Psi(k_x, k_y)$ , которые связаны преобразованием Фурье [1, 2]

$$\Psi(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint R(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy. \quad (1)$$

Распределение вероятностей смещений взволнованной морской поверхности незначительно отклоняется от нормального [3], для которого функции  $R(x, y)$  и  $\Psi(k_x, k_y)$  дают полное статистическое описание процесса. Спектральная плотность  $\Psi(k_x, k_y)$  является важной физической характеристикой этого процесса, определяя распространение энергии по волновым числам (пространственным частотам).

## 2. СВЯЗИ ДВУМЕРНЫХ СПЕКТРОВ ФИ И РЛИ СО СПЕКТРАМИ ВОЛНЕНИЯ.

Операцию преобразования Фурье для получения энергетического спектра двумерного изображения легко осуществить на когерентно-оптическом устройстве [4]:

$$|S(k_x, k_y)|^2 = \frac{1}{(\lambda F)^2} \left| \iint \tau(x, y) \exp[-i(k_x x + k_y y)] dx dy \right|^2,$$

где  $\lambda$  - длина волны оптического анализатора,  $F$  - эффективное фокусное расстояние линзы, осуществляющей преобразование Фурье,

$\tau(x, y)$  - амплитудный коэффициент пропускания негатива. Для интерпретации получаемых таким образом спектров изображений необходимо установить их связь со спектрами волнений.

а) Фотоснимки

При фотографировании поверхности океана интенсивность излучения, фиксируемого камерой в определенный момент времени и в определенной точке, может быть представлена в виде:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + I_3(x, y), \quad (3)$$

где  $I_1(x, y)$  - интенсивность излучения, обусловленного отражением от взволнованной поверхности;

$I_2(x, y)$  - интенсивность излучения, рассеянного в атмосфере;

$I_3(x, y)$  - интенсивность излучения, рассеянного толщей воды.

При съемке с небольших высот составляющая  $I_2(x, y)$  вносит незначительный вклад в общую интенсивность, регистрируемую камерой. Составляющая интенсивности  $I_3(x, y)$  является существенной в синей-зеленой области спектра, однако, при  $\lambda \geq 0,6$  мкм, что легко достигается применением светофильтра, ее можно пренебречь [5].

Ввиду малости уклонов гравитационных волн, интенсивность отраженного в данной точке излучения в линейном приближении обычно представляется в виде [6, 7, 8]:

$$I(x, y) = I_1(x, y) = I_0(x, y) + A \frac{\partial F(x, y)}{\partial \vec{z}(x, y)}, \quad (4)$$

где  $I_0(x, y)$  - составляющая интенсивности, обусловленная от-

ражением от среднего уровня поверхности океана;  $A$  - константа.

Таким образом, при аэрофотосъемке на негативе регистрируется распределение интенсивности, несущие информацию о пространственной структуре волнения. В случае диффузного освещения водной поверхности связь между спектрами уклонов и спектрами фотографических изображений является линейной и, как показано в ряде работ, её можно представить в виде [6,7,8]:

$$\Psi_{\theta}(k_x, k_y) = C / |S(k_x, k_y)|^2, \quad (5)$$

где  $\Psi_{\theta}(k_x, k_y)$  - пространственный энергетический спектр уклонов для поверхности океана;  $C$  - экспериментальная константа;  $|S(k_x, k_y)|^2$  спектр аэрофотоснимка.

При малых уклонах, что справедливо для не слишком сильного волнения, спектр уклонов связан со спектром возвышений соотношением [1]

$$\Psi_{\theta}(\vec{k}) = |\vec{k}|^2 \Psi_{\zeta}(\vec{k}). \quad (6)$$

Таким образом, по спектрам фотоизображений можно получить информацию о спектрах уклонов или возвышений поверхностного волнения.

#### б) Радиолокационные изображения

Основными рассеивателями радиолокационного сигнала на морской поверхности являются спектральные компоненты волнения, лежащие в узкой окрестности брэгговского волнового вектора  $\vec{k}_B$ , который имеет модуль  $k_B = 2 k_0 \sin \theta_0$  (где,  $k_0$  - волновое число падающей радиоволны,  $\theta_0$  - угол падения, отсчитанный от вертикали), и лежит в плоскости падения радиоволны [2,9]. Образование РЛИ в рамках брэгговской модели определяется модуляцией мелкомасштабных шероховатостей, крупномасштаб-

ными неоднородностями.

Брэгговская модель рассеяния хорошо согласуется с экспериментальными данными, однако не объясняет некоторые особенности рассеяния при настильных углах падения. На горизонтальной поляризации периодически наблюдаются кратковременные "всплески" сигнала, причем моменты их появления хорошо коррелируются с появлением в пределах элемента разрешения одиночных гребней крупных волн, достигших наустойчивого состояния, которые затем обрушиваются с образованием пенного барашка [10, 11]. Механизм образования всплесков в настоящее время не вполне ясен; возможно они представляют собой сигнал, зеркально отраженный от сильно наклоненных участков гладкой воды при обрушивании волн, либо дифрагировавший на остром гребне. В последнее время предложено несколько моделей формирования РЛИ [12, 13, 14]. При образовании РЛИ с помощью РЛС БО яркость изображения в точке, соответствующей площадке разрешения с координатами центра  $(x, y)$ , пропорциональна свертке функции  $f(x, y)$ , описывающей зависимость удельного сечения рассеяния от координат, с импульсной переходной характеристикой тракта РЛС БО  $W(x, y)$ , описывающей отклик системы на рассеяние различных элементов поверхности в пределах площадки разрешения [12].

Модель рассеяния, использованная в [12], характеризуется следующими положениями: 1) единственным рассеивателем радиолокационного сигнала в сантиметровом диапазоне является брэгговская компонента ряби; 2) спектральная плотность ряби изотропна и слабо зависит от координат. Отсюда следует вывод, что пространственные вариации удельного сечения рассеяния

(и соответствующие вариации яркости (РЛИ) обусловлены только локальными наклонами поверхности (т.е.  $f(x,y) = f[\theta(x,y)]$ , где  $\theta(x,y)$  - угол наклона), которые создаются крупномасштабными компонентами волнения. Однако в этой модели не учитываются источники вариации сигнала, такие, как отражения от неустойчивых гребней (всплески), анизотропия и пространственные вариации спектральной плотности ряби, вызванные турбулентными неоднородностями приводного ветра, крупномасштабными волнами и т.д. Несмотря на это сравнение одномерного спектра крупномасштабного волнения, полученного с РЛИ, со спектром, полученным контактным методом, показывает высокую степень корреляции между ними [12,15]. Таким образом, для связи спектров РЛИ и спектров поверхностного волнения можно воспользоваться соотношениями, аналогичными (5,6).

### 3. ПОДАВЛЕНИЕ РЯБИ ОРГАНИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПЛЕНКАМИ

Известно [16], что выливание на поверхность моря небольшого количества нефти, масла и других органических веществ приводит к быстрому исчезновению мелкомасштабного волнения на значительной площади. Для чистой воды время затухания составляет  $0,7 \Lambda^2$  сек,  $\Lambda$  - длина волны в см; в присутствии же несжимаемой пленки оно равно  $0,32 \Lambda^{1,75}$  сек для капиллярных волн и  $0,38 \Lambda^{1,25}$  сек для гравитационных. По этим оценкам волна длиной  $\Lambda = 1$  см при наличии пленки затухает в 2,2 раза быстрее, чем на чистой воде [17,18]. Согласно оценкам [19], критическая скорость ветра (скорость при которой достигается



рябь) при наличии пленки увеличивается примерно вдвое. Вывод о сильном влиянии поверхностной пленки на гравитационные волны, который следует из результатов работ [17, 19], не подтверждается наблюдением; по данным наблюдений пленки практически не влияют на волны длиной более 1 м [16].

Косвенное исследование эффекта подавления волн в натуральных условиях, выполненное с помощью скаттерометрических наблюдений [20], показало, что спектр волнения в гравитационно-капиллярной области ( $\lambda = 1,5 - 2,7$  см) при наличии пленки нефти хорошо аппроксимируется зависимостью  $\Psi_f(k) \approx 6 \cdot 10^{-2} k^{-7}$ , тогда как для чистой поверхности аналогичная зависимость получается в виде  $\Psi_f(k) \approx 5 \cdot 10^{-2} k^{-5,25}$ . Из этих оценок следует, что в указанной области спектральная плотность ряби при появлении нефтяной пленки уменьшается примерно в  $0,83 k^{1,75}$  раз (при скорости ветра около 9 м/сек, т.е. превышающей критическое значение).

Таким образом, нефтяные загрязнения изменяют спектр волнения, что, в свою очередь, должно приводить к изменению спектров ФИ и РЛИ.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

##### а) Фотоснимки

Для исследования возможности обнаружения загрязнения поверхности океана нефтью использовались материалы аэрофото-съемки, выполненной при диффузном освещении в одинаковых гидрометеорологических условиях. Поскольку объект съемки при диффузном освещении является слабоконтрастным, с доста-

рябь) при наличии пленки увеличивается примерно вдвое. Вывод о сильном влиянии поверхностной пленки на гравитационные волны, который следует из результатов работ [17, 19], не подтверждается наблюдением; по данным наблюдений пленки практически не влияют на волны длиной более 1 м [16].

Косвенное исследование эффекта подавления волн в натуральных условиях, выполненное с помощью скаттерометрических наблюдений [20], показало, что спектр волнения в гравитационно-капиллярной области ( $\lambda = 1,5 - 2,7$  см) при наличии пленки нефти хорошо аппроксимируется зависимостью  $\Psi_f(k) \approx 6 \cdot 10^{-2} k^{-7}$ , тогда как для чистой поверхности аналогичная зависимость получается в виде  $\Psi_f(k) \approx 5 \cdot 10^{-2} k^{-5,25}$ . Из этих оценок следует, что в указанной области спектральная плотность ряби при появлении нефтяной пленки уменьшается примерно в  $0,83 k^{1,75}$  раз (при скорости ветра около 9 м/сек, т.е. превышающей критическое значение).

Таким образом, нефтяные загрязнения изменяют спектр волнения, что, в свою очередь, должно приводить к изменению спектров ФИ и РЛИ.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

##### а) Фотоснимки

Для исследования возможности обнаружения загрязнения поверхности океана нефтью использовались материалы аэрофото-съемки, выполненной при диффузном освещении в одинаковых гидрометеорологических условиях. Поскольку объект съемки при диффузном освещении является слабоконтрастным, с доста-

точной степенью точности выполняется условие линейной связи амплитудного коэффициента пропускания негатива  $\tau(x, y)$  с интенсивностью отраженного возмущенной поверхностью излучения  $I(x, y)$ . Анализу подвергались изображения чистой поверхности океана и изображения поверхности в разной степени загрязненные нефтью.

Двумерные энергетические спектры изображений регистрировались фотографически с последующим фотометрированием в выборных направлениях. Спектры анализировались в диапазоне пространственных периодов на водной поверхности от 5 см до 100 см.

На рис. 1 представлены усредненные по нескольким реализациям одномерные сечения энергетических спектров для чистой поверхности океана (кривая 1) и для загрязненной нефтью в разной степени поверхности (кривые 2, 3), в зависимости от пространственной частоты  $\nu = \frac{1}{\Lambda}$ , волнового числа  $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$  и пространственного периода  $\Lambda$ . Приведенные одномерные сечения спектров отнормированы по интегральным интенсивностям света, прошедшего через транспарант.

На рис. 1 обнаруживается заметное отличие спектральных плотностей для чистой поверхности и поверхности, загрязненной нефтяной пленкой различной толщины. На рис. 2 приведены контрасты спектров  $-10 \lg \frac{|S_{np}|^2}{|S_{чп}|^2}$  где  $|S_{чп}|^2$  - спектр изображения чистой поверхности,  $|S_{np}|^2$  - спектр изображения поверхности с нефтяной пленкой, в зависимости от пространственной частоты, волнового числа и пространственного масштаба. Из приведенных графиков видно, что величины контрастов растут с

увеличением пространственной частоты, что свидетельствует о более сильном изменении мелкомасштабных волн под действием нефтяной пленки.

Интересной особенностью приведенных одномерных спектров Винера является наличие линейных участков. Кривые, соответствующие пространственным спектрам для волновых чисел  $K > 8,4$  1/см, могут быть представлены зависимостью  $|S(K)|^2 \sim K^{-P}$  где  $P = 2,1$  - для чистой поверхности;

$P = 3,1; 4,2$  - для поверхностей с нефтяной пленкой.

С учетом связи спектров изображений со спектрами уклонов и возмущений морского волнения можно написать

$$\Psi_0(K) \sim K^{-P}; \quad \Psi_F(K) \sim K^{-P-2}.$$

Для чистой поверхности  $\Psi_{F(1)}(K) \sim K^{-4,1}$  при скорости ветра  $\sim 6 \frac{M}{сек}$ . Такой ход спектральной плотности близок к спектру Филлипса [3], соответствующего интервалу равновесия для развитого волнения:

Для спектров высот при наличии нефтяной пленки разной толщины имеем  $\Psi_{F(2)}(K) \sim K^{-5,1}$  и  $\Psi_{F(3)}(K) \sim K^{-6,2}$ , что близко к результатам работы [20].

### б) Радиолокационные изображения

Для исследования возможностей обнаружения нефтяных пленок на поверхности моря с помощью средств активной радиолокации, проводилась РЛ съемка чистой морской поверхности и областей, загрязненных нефтепродуктами, с последующей обработкой РЛ-изображений на когерентном оптическом анализаторе спектра пространственных частот.

РЛ-изображения получены с помощью дуполяризаационной РЛС Б0 сантиметрового диапазона с полосой обзора 15 км.

Визуально состояние чистой поверхности моря в процессе съемки характеризовалось наличием системы ветровых волн, гребни которых были ориентированы преимущественно перпендикулярно к направлению ветра, причем большая часть гребней достигала стадии обрушения с образованием пенных барашков.

На рис. 3 приведены сечения нормированных энергетических спектров РЛ-изображений чистых участков морской поверхности и участков, покрытых нефтяной пленкой, в направлении, совпадающем с направлением распространения волн. Ярко выраженный максимум в спектре чистой поверхности (кривая - 1) соответствует энерго-несущей компоненте, в данном случае развитой системе ветрового волнения со средней длиной волны 110 м. Кривая 2 (спектр участка, покрытого нефтью) иллюстрирует подавление максимума в спектре РЛ-изображения. Поскольку данные гравитационные волны не подвержены влиянию нефтяных пленок, этот эффект, по-видимому, связан, в первую очередь, с уменьшением обрушений и с подавлением волнения в капиллярной и коротковолновой гравитационно-капиллярной областях спектра. В свою очередь, это приводит к резкому снижению уровня отраженного РЛ сигнала, формирующего РЛ-картину и к выглаживанию спектра РЛ-изображения. Таким образом, несмотря на сравнительно невысокую разрешающую способность РЛС Б0 (~ 20 метров), РЛ съемка с последующим анализом спектра пространственных частот РЛ-изображения в области, соответствующей гравитационной области спектра волнения, позволяет эффективно обнаруживать зоны морской поверхности загрязненные нефтью.

## ВЫВОДЫ

1). Проведенные эксперименты продемонстрировали возможность применения пространственного спектрального анализа РЛ и фотографических изображений для обнаружения загрязнений морской поверхности нефтяной пленкой.

2). Методы фото и РЛ съемки дополняют друг друга в решении задачи обнаружения нефтяных загрязнений. Фотосъемка дает возможность исследовать пространственный спектр волнения в высокочастотной области, а съемка с помощью РЛС Ю, отражая изменение мелкомасштабных составляющих волнения (за счет резонансного механизма рассеяния радиоволн), позволяет исследовать спектр в низкочастотной области.

3). Наиболее сильному выглаживанию под действием нефтяной пленки подвергаются коротковолновые составляющие спектров фотоизображений и выглаживание усиливается с увеличением толщины нефтяной пленки. Одномерные сечения энергетических спектров возвышений для чистой поверхности моря допускают интерпретацию в виде  $\Psi_f(k) \sim k^{-4,1}$ , что близко к спектру Филлипса для интервала равновесия, и интерпретацию для спектров в области нефтяных пленок меньшей и большей толщины в виде соответственно

$$\Psi_f(k) \sim k^{-5,1}; \quad \Psi_f(k) \sim k^{-6,2}$$

4). Обнаружение нефтяных загрязнений с помощью спектрального анализа изображений, полученных радиолокатором бокового обзора с широкой зоной захвата и относительно небольшим пространственным разрешением ( $\sim$  десятков метров) может производиться

В низкочастотной области спектра пространственных частот, соответствующей длинным гравитационным волнам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Физика океана, т. I, в сб. Океанология, М., "Наука", 1978.
2. Ф.Г.Басс, И.М.Фукс. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. "Наука", М., 1972 г.
3. О.М.Филлипс. Динамика верхнего слоя океана. М., "Мир", 1969.
4. К.Престон. Оптические когерентные вычислительные машины. М., "Мир", 1974г.
5. А.П.Иванов. Физические основы гидроптики. Минск, 1975.
6. R.S. Kasevich et al., Analysis and Optical Processing of Sea Photographs for Energy Spectra. IEEE transaction on geos. electr., 1972, GE-1, v. 10, N 1.
7. D. Stilwell, R.O. Pulon. Directional Spectra of Surface Waves from Photographs. J-1 of Geoph. Res., 1974, 79, 1277.
8. А.А.Загородников и др. Материалы 4 Всесоюзного совещания по теории инвариантности и теории чувствительности автоматических систем, ч. III АН СССР, АН УССР, Киев, 1971г.
9. I.W. Wright. IEEE trans., 1968, AP-16, 2, 247.
10. M.W. Long. IEEE trans., 1974, AP-22, 5. 667.
- II. А.И.Калмыков, А.С. Курекин, Ю.А.Лементя, В.В.Пустовойтенко. Препринт № 40 ИРЭ АН УССР, Харьков, 1974.
12. А.А.Загородников. Радиолокационная съемка морского волнения с летательных аппаратов. Гидрометеиздат. М., 1978.
13. C. Elachi. W.E. Brown. IEEE trans., 1977, AP-25, 1, 84.
14. C. Elachi, Bound-Layer Meteorol., 1978, 13, 165.
15. O.H. Shemdin, W.E. Brown et al. Bound-Layer Meteorol., 1978. 13. 193.
16. I.C. Gottifredi, G.I. Jameson. J. Fluid Mech., 1968, 32.



17. Г.Ламб. Гидродинамика, ГИТТЛ., М.-Л, 1947.
18. A.E. Gargett. B.A. Hughes. J. Fluid Mech., 1972, 52, 1, 179.
19. J.W. Miles. Proc. Roy. Soc. Lond., 1967, A297, 459.
20. K. Krisher. J. Geophys. Res., 1973, 78, 12, 1952.

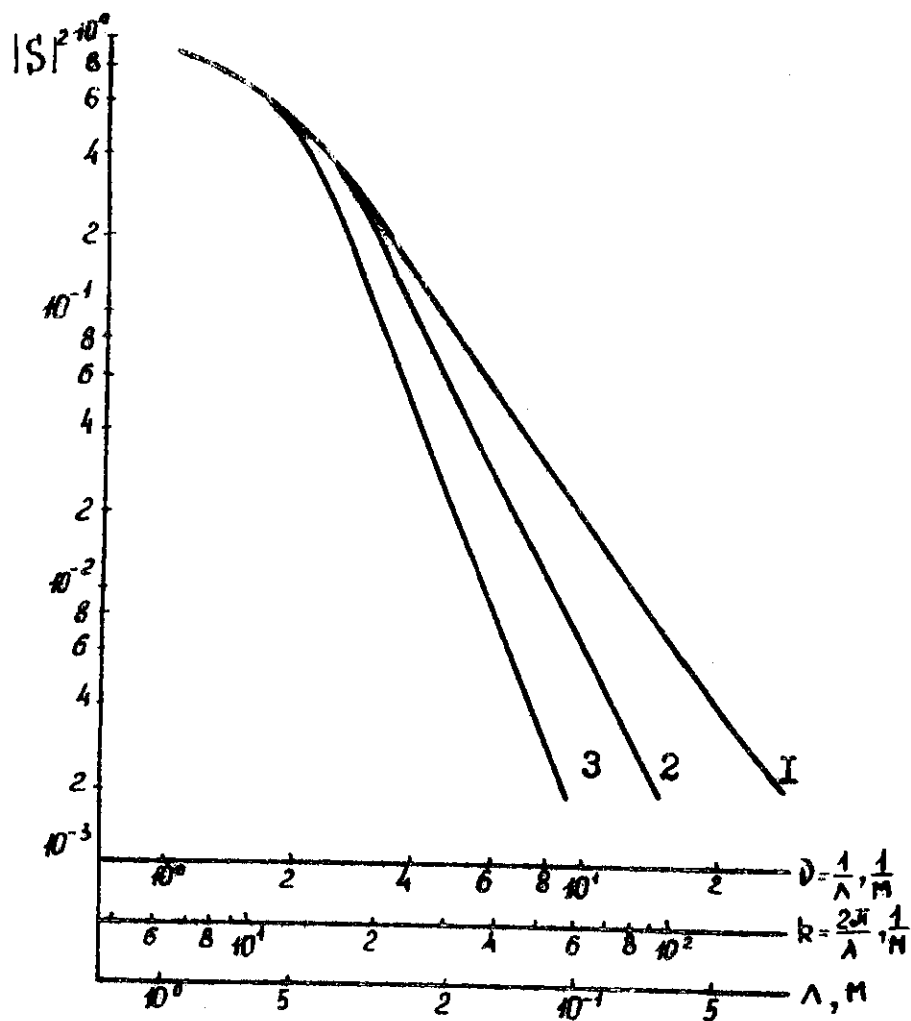


Рис. 1 Сечения нормированных энергетических спектров фотоизображений чистой морской поверхности (кривая 1) и поверхности с нефтяной пленкой большей (кривая 3) и меньшей (кривая 2) толщины.

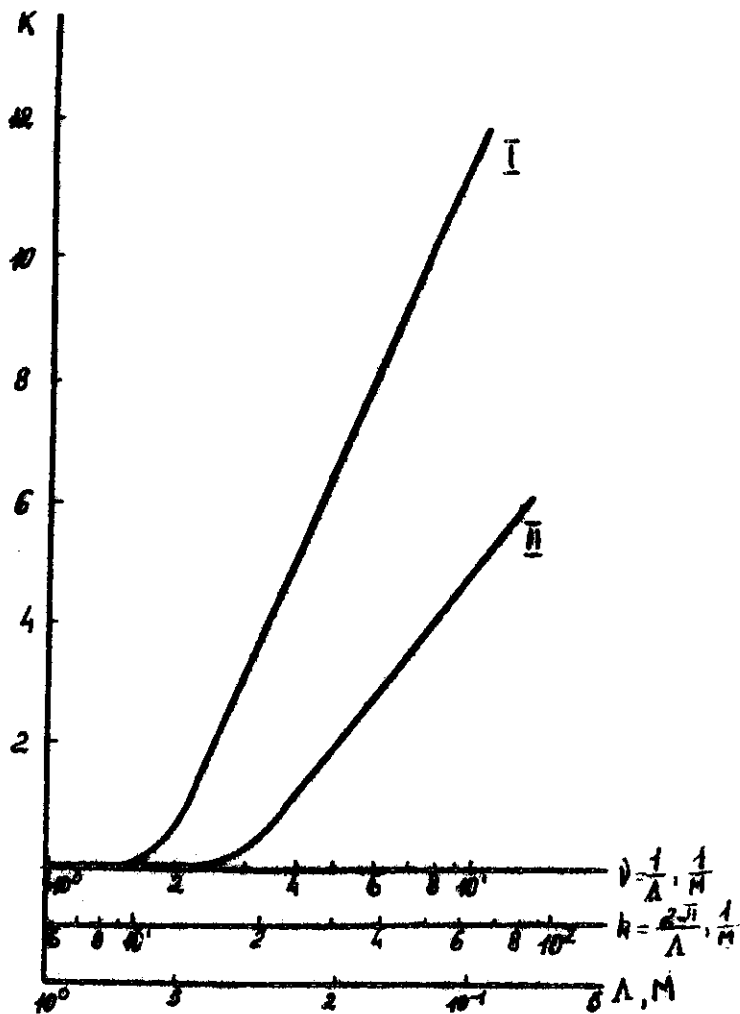


Рис. 2 Контрасты спектров изображений чистой поверхности и поверхности с нефтяной пленкой  $K = -10 \lg \left| \frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{чп}}} \right|^2$  для большей (кривая I) и меньшей (кривая II) толщины пленки.

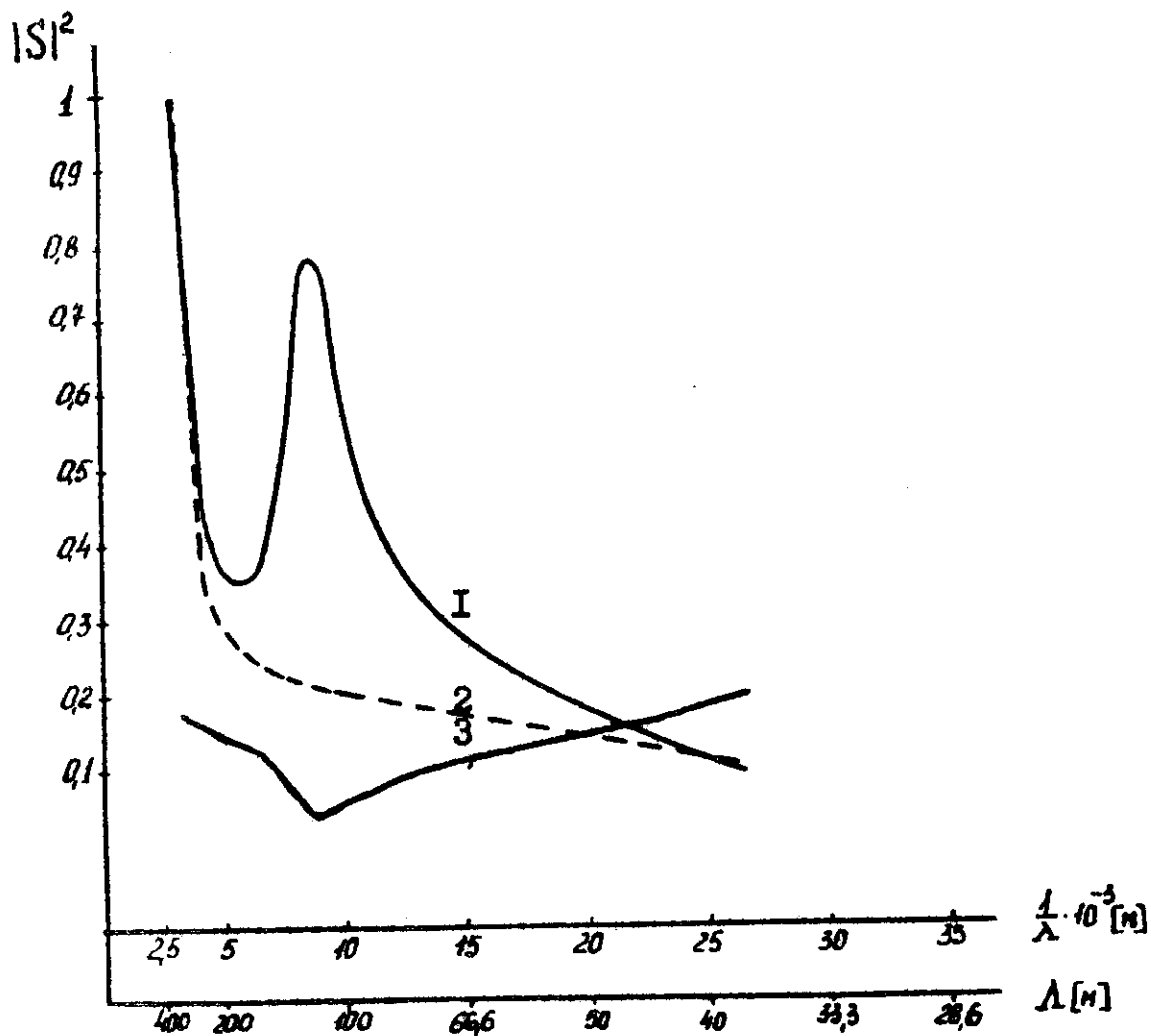


Рис. 3 Сечения нормированных энергетических спектров радиолокационных изображений чистой морской поверхности (кривая 1) и участка поверхности с нефтяной пленкой (кривая 2). Отношение спектров чистой и загрязненной нефтью поверхности (кривая 3).