

ISSN 0536-101X

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ



ГЕОДЕЗИЯ
и
АЭРОФОТОСЪЕМКА



№3

МОСКВА

1999

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ

Центральный научно-исследовательский
институт "Комета"
Профессор, доктор техн. наук *В.Г.Бондарь*
Кандидат техн. наук *Д.Ц.Литовченко*
Московский государственный университет
геодезии и картографии
С.А.Старченков

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АНТРОПОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Задача обнаружения загрязняющих веществ (ЗВ), попадающих в океан в ходе осуществления человечеством хозяйственной деятельности, а также при утилизации продуктов жизнедеятельности людей, по-прежнему остается весьма актуальной, так как ежегодно растет общая масса ЗВ, попадающих в океан тем или иным путем. Решение этой задачи существенно упрощается при использовании дистанционных методов контроля за состоянием границы раздела океан-атмосфера [1,2], так как применение аэрокосмических средств наблюдения является практически единственным способом реального контроля за состоянием поверхности обширных акваторий Мирового океана [3].

Одним из наиболее перспективных средств контроля за состоянием морской поверхности являются космические радиолокационные системы, что подтверждает опыт применения таких радиолокационных ИСЗ, как "Seasat" (США), ERS-1 и ERS-2 (ЕКА), "Космос-1500", "Космос-1870", "Алмаз-1" (Россия). Анализ данных, полученных этими спутниками, дал возможность получить новые сведения о границе раздела океан-атмосфера, что позволило выделить и сформировать новое научное направление — радиогидрофизику [4,5].

Обработка данных, получаемых современными радиолокационными ИСЗ (например, "Алмаз-1", ERS-1 и ERS-2), может проводиться весьма оперативно вследствие применяемых цифровых методов синтезирования апертуры [6]. Это дает возможность получать радиолокационные изображения в цифровой форме и, таким образом, без промежуточных процедур ввода изображений в ЭВМ проводить их обработку на рабочих

станциях, что значительно повышает точность и скорость обработки.

В настоящей работе проводится анализ радиолокационного изображения с пленками поверхностно-активных веществ (ПАВ), полученного спутником "Алмаз-1", приводятся результаты цифровой обработки изображения с целью получения количественных характеристик пленок ПАВ, а также предлагается метод автоматизированного выделения областей с пленками ПАВ, вызванных сбросом сточных вод, с помощью специализированного программного обеспечения.

1. Физические механизмы радиолокационного обнаружения пленок ПАВ

Радиолокационные методы дистанционных наблюдений морской поверхности обладают высокой чувствительностью к обнаружению различных антропогенных воздействий на прибрежные воды, в том числе таких, как выбросы сточных вод, наличие пленок ПАВ, разливы нефтепродуктов. Наличие локальных загрязнений морской поверхности приводит к подавлению высокочастотной части спектра ветрового волнения, т.е. к образованию сливков, которые наблюдаются на радиолокационных изображениях в виде темных полос и пятен на более ярком фоне [1,7—10].

Результатом воздействия пленок ПАВ, вызванных сбросом сточных вод, является подавление высокочастотных гравитационно-капиллярных компонент волнения, которые в наибольшей степени ответственны за формирование радиолокационного сигнала от морской поверхности.

В соответствии с условием брэгговского резонанса $\lambda = 2\Lambda \sin \theta$, где λ — длина волны электромагнитного излучения; Λ — длина волны компоненты морского волнения; θ — угол падения.

Соответствующая длина волны резонансной компоненты радиолокационного сигнала лежит в области 2—8,8 см для $\theta = 45^\circ$ [11]. Общий диапазон длин электромагнитных волн, в котором уверенно наблюдаются эффекты сливкового выглаживания, обусловленные ПАВ, составляет 2—20 см, несколько смещаясь в сторону больших λ при увеличении угла падения θ .

Существуют оптимальные углы наблюдения [12] для заданных длин волн электромагнитного излучения, однако все они лежат в диапазоне $\theta = 30^\circ—50^\circ$, при этом отсутствует резкий резонансный максимум, что вызвано как физикой процесса, так и широким диапазоном изменчивости параметров пленок. Это позволяет считать радиолокационные станции эффектив-

ным средством обнаружения пленочных сликсов в широком диапазоне углов зондирования.

Время жизни сликсов, обусловленных ПАВ в области сбросов сточных вод, также зависит от характера загрязнений и скорости ветра. Практически в любом случае оно достигает нескольких часов, а при больших объемах загрязнений — нескольких суток и более.

2. Предварительная обработка радиолокационного изображения

Цифровые методы обработки данных дистанционного зондирования позволяют реализовывать гибкие схемы обработки данных [1,14], что существенно повышает точность интерпретации результатов.

Рассматриваемое радиолокационное изображение обрабатывалось при помощи специализированного ПО, разработанного в ЦНИИ «Комета» [1].

Исходное радиолокационное изображение получено 8 июня 1991 г. РСА спутника «Алмаз», местное время 13:20, нисходящий виток, размеры участка морской поверхности $21 \times 40 \text{ км}^2$, размеры элемента разрешения $5 \times 5 \text{ м}^2$ (рис.1).

Исходное радиолокационное изображение слабоконтрастно, морская поверхность характеризуется практически постоянным уровнем сигнала как в прибрежном районе, так и на значительном удалении от берега. По такому изображению достаточно сложно дешифрировать различные неоднородности морской среды, в том числе такие, которые вызваны пленками ПАВ, стоками рек, канализационными выпусками, нефтяными загрязнениями и другими явлениями. Для улучшения качества изображение было подвергнуто процедуре эквализации, а затем для подавления спектрального шума, характерного для радиолокационных изображений, полученных радиолокаторами с синтезированием апертуры, использован медианный фильтр (рис. 1) [14].

3. Интерпретация выделенных аномалий морской поверхности

Анализ рис. 1 показывает, что вблизи берегов наблюдаются темные полосы, которые не связаны с реальными контрастами в прибрежной зоне (ширина темновых полос примерно 1 км). Они обусловлены изменением усиления приемного тракта РСА на границе море — суши. В центре (рис. 1) наблюдается сложная ячеистая аномалия размерами примерно $4 \times 8 \text{ км}^2$. Структура пятен этой аномалии не коррелирует со структурой при-

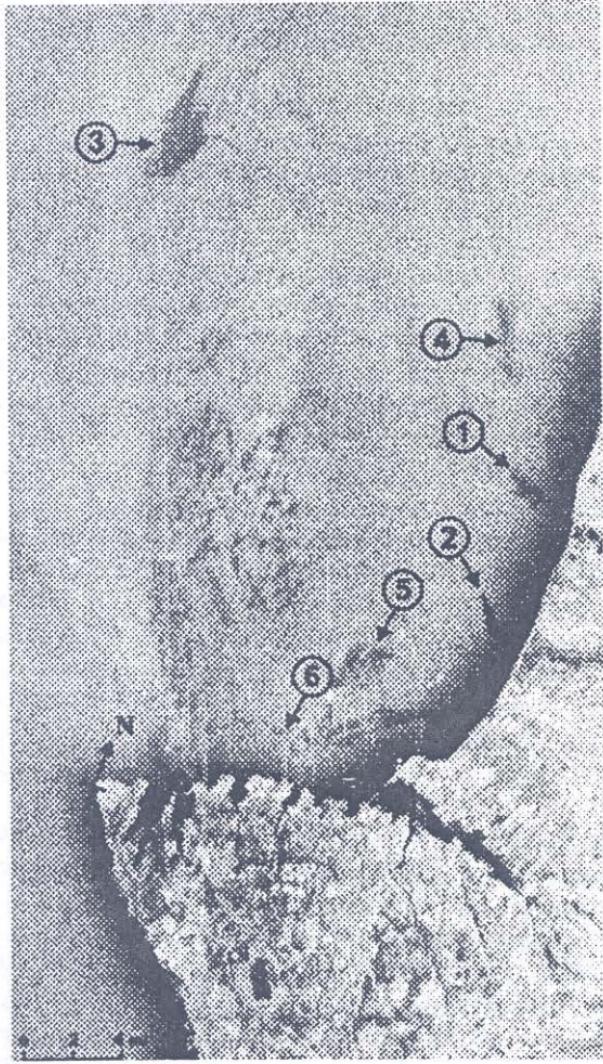


Рис. 1. Радиолокационное изображение прибрежной зоны г. Севастополя после предварительной обработки

брежных течений, поэтому она может интерпретироваться как картина турбулентных конвективных ветровых потоков под локальным облаком, т.е. это образование вызвано атмосферными явлениями и не имеет отношения к загрязнениям морской поверхности [13].

Слики, образованные речными стоками р. Кача и р. Бель-

бек (позиции 1 и 2 на рис. 1), наблюдаются как локальные вытянутые пятна с размерами порядка $0,3 \times 2$ км 2 , имеющие четкие границы.

Контрасты усредненного сигнала в области сликов U_s по отношению к фону U_o , вычисленные по формуле $K_A = 20 \times \lg (U_s/U_o)$, вызванных речным стоком, довольно высоки: $-5,4 \pm 0,5$ дБ (рис. 1, позиция 1) и $-7,9 \pm 1,9$ дБ (рис. 1, позиция 2). Основной тип загрязнений — концентрация бытовых ПАВ и нефтепродуктов, а также повышенное содержание биогенных ПАВ из-за того, что распресненные воды в зонах речного стока отличаются повышенной первичной биологической активностью. Характерные черты сликов, вызванных слабым речным стоком: простая структура, четкая локализация, значительный контраст, стационарность. На рис. 1 (позиция 3) наблюдается обособленный слик сложной формы, типичный для локального слива загрязненных вод с корабля. Слик находится в зоне действия струи стабильного прибрежного течения (с юга на север), и поэтому он переносится течением целиком. За время существования подобный слик был перемещен от источника на несколько километров, что подтверждается отсутствием вблизи слива его источника — надводного корабля. Амплитудный контраст пятна относительно фона составляет $-3,4 \pm 0,7$ дБ. Характер пленки — нефтепродукты, предположительный возраст — 2—5 часов, приблизительные размеры $1,5 \times 3$ км 2 .

Наиболее четкие границы слик имеют в направлениях с запада и востока, тогда как границы в направлениях с севера и юга имеют ощущимую размытость, т.е. струйное течение оказывает более существенное воздействие на разрушение сликового пятна, чем пассивное растекание пленки ПАВ по морской поверхности. Западнее слива наблюдается небольшое увеличение среднего уровня яркости радиолокационного изображения, которое можно объяснить увеличением ветрового разгона над сликом, что позволяет идентифицировать направление ветра для данного кадра — с юго-востока на северо-запад.

На рис. 1 (позиция 4) виден слик меньшей видимости, в 3 км от берега. На необработанном изображении (рис. 1) данный слик не наблюдается, поскольку его контраст меньше уровня спектральных флуктуаций. Процедура медианной фильтрации позволяет надежно выделить контуры слика. Слик имеет размеры $0,5 \times 2,5$ км 2 , что сравнимо с размерами предыдущего слика. Однако его амплитудный контраст значительно меньше ($-2,8 \pm 0,8$ дБ), что свидетельствует о другом типе пленки ПАВ (бо-

лее тонкая и растяжимая пленка). Форма и положение слика (он является продолжением линии стока реки Кача, если учитывать направление прибрежного течения), дают основание предполагать две возможные причины его возникновения: а) слив ПАВ с надводного судна; б) кратковременный залповый выброс ПАВ в стоке реки Кача. Вероятность обоих вариантов примерно одинакова.

Слик, вызванный сливом нефтепродуктов с крупного судна (рис. 1, позиция 5), которое находится на якорной стоянке в 3—4 км напротив входа в Севастопольскую бухту, имеет вид яркого пятна. Размеры пятна — порядка $1,5 \times 1,5$ км², амплитудный контраст $-4,6 \pm 1,1$ дБ. Пятно вытянуто по направлению прибрежного течения, границы относительно четкие, контраст пятна имеет существенную неравномерность, что отличает его от других наблюдавшихся сливов. Это можно объяснить продолжительностью сброса загрязняющих веществ с судна (не менее нескольких часов), а также их различным химическим составом и, следовательно, различными физическими свойствами сбрасываемых веществ. Это приводит к различной упругости пленки в различных частях слика и к различиям в степени подавления ряби.

На радиолокационном изображении (рис. 1, позиция 6) существует сливовая зона, образованная канализационным стоком в районе г. Севастополя. Она имеет вид длинной извилистой полосы, имеющей начало в месте расположения одного из вспомогательных городских канализационных выпусков (1 км южнее устья р. Бельбек, объемный сток менее 0,3 м³/с).

Контрастные характеристики аномалии, вызванной канализационным стоком, заметно отличаются от характеристик речных сливов (позиции 1 и 2 на рис. 1). Контраст составил $-6,4 \pm 1,2$ дБ, достигая максимального значения у берега и уменьшаясь с удалением от берега. Данный slick, обусловленный сбросом сточных вод, при средней ширине 200—300 м прослеживается на длину порядка 6—8 км, что значительно больше, чем длина любых других сливов на рис. 1. Это говорит об ином характере диссипации канализационных сточных вод, относительно речных выносов и пленок нефтепродуктов — разрушение сливов происходит медленнее, и, хотя контрастность слика меньше, его устойчивость к диссипации выше. Таким образом, физико-химические параметры загрязнений оказывают влияние на характер радиолокационных изображений сливов.

Направление полосы слика, обусловленного глубинным сбросом сточных вод, соответствует направлению прибрежно-

го противотечения, возникающему из-за втягивающей силы струи основного прибрежного течения юг-север в районе мыса Херсонес. При этом все другие слики на рис. 1 имеют тенденцию смещаться на север, что говорит о сложности структуры прибрежных течений.

Наиболее вероятная причина этих эффектов — заглубленный характер канализационного стока и приблизительное совпадение плотностей сточных вод и окружающей морской воды. В результате этого всплытие канализационных стоков происходит достаточно медленно, длина слива возрастает, при этом перенос сточных вод определяется не поверхностным течением и ветровым сносом, а глубинным течением, имеющим иное направление.

4. Классификация аномалий морской поверхности

При обработке радиолокационных изображений рассчитывались 2 типа информативных признаков: среднее значение и дисперсия сигналов в окне 250×250 пикселей (что соответствует размеру участка морской поверхности $1,25 \times 1,25 \text{ км}^2$).

Для автоматизированного выделения аномалий, вызванных различными загрязнениями морской поверхности, использовалась методика, которая заключается в следующем. На первом этапе производится обучение системы распознавания, суть которого состоит в создании двух обучающих классов — "фон" и "загрязненные участки". В каждом классе формируется выборка значений информативных признаков, рассчитываются их статистические характеристики и определяются соответствующие пороги для разделения этих классов [15].

На втором этапе анализируется исследуемая выборка. По значениям информативных признаков этой выборки производится отнесение участков морской поверхности к одному из двух, названных выше, классов с использованием различных критериев (Неймана-Пирсона, Фишера, отношения правдоподобия и др. [15]). Пороговые уровни для такой процедуры берутся из обучающей выборки.

Для формирования обучающих выборок были выбраны участки, соответствующие фону и совокупности всех, хорошо выделяемых, областей загрязнений (3), кроме аномалии, вызванной канализационным стоком (рис. 1, позиция 6), и обособленного слива, обусловленного пленками ПАВ (рис. 1, позиция 3), используемые для формирования обучающих выборок. Каждый участок этих выборок разбивался на фрагменты размером $1,25 \times 1,25 \text{ км}^2$ (в масштабе морской поверхности), что

соответствовало 250×250 пикселей в изображении. Фоновая обучающая выборка имела объем $N = 81$, а обучающая выборка для загрязнений — $N = 30$. По каждому фрагменту рассчитывались среднее значение радиолокационного сигнала $m[U]$ и дисперсия $D[U]$ в окне, которые являются информативными признаками и используются для классификации. Для повышения эффективности классификации по дисперсии проводилась операция нормировки, заключающаяся в вычитании из измеренного значения $D[U]$ среднего значения дисперсии для фона: $D_h[U] = |D[U] - m[D_\Phi]|$.

Затем рассчитывались гистограммы для каждого признака в исследуемых классах и их моменты до четвертого порядка включительно.

Расчет гистограмм для признаков $m[U]$ и $D_h[U]$ проводился на одинаковой масштабной сетке (рис.2).

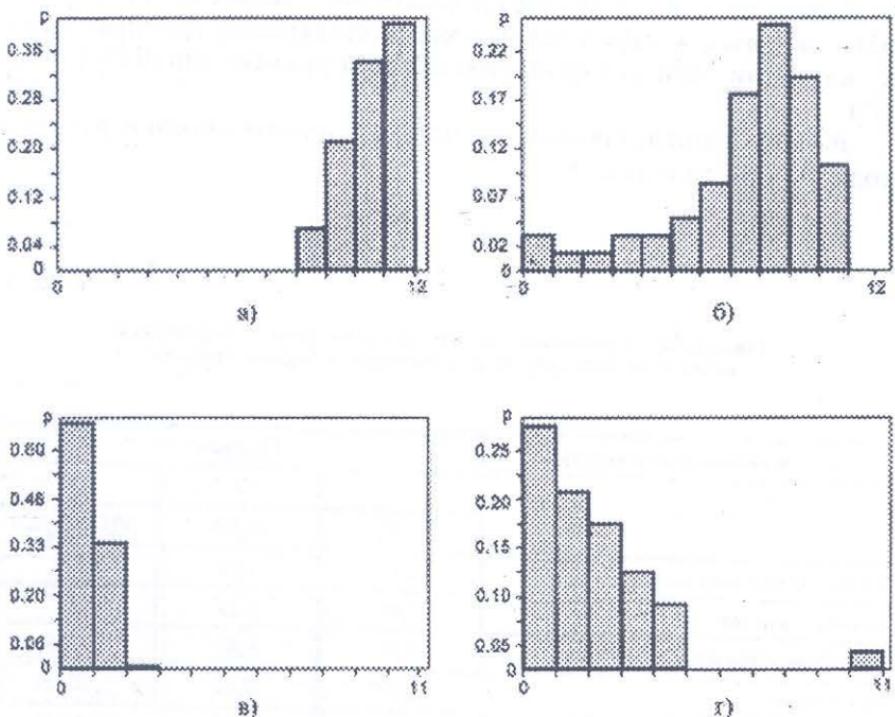


Рис. 2. Гистограммы распределений для среднего значения радиолокационных сигналов фона (а) и загрязнений (б), гистограммы распределений и их параметры для дисперсии радиолокационных сигналов фона (в) и загрязнений (г)

В табл. 1 (колонки 2 и 3) приведены значения различных типов межклассовых расстояний [16] для анализируемых типов информативных признаков фона и загрязнений. Анализ результатов расчета межклассовых расстояний показывает, что наиболее эффективным признаком является среднее значение сигнала $m[U]$ в выбранном окне.

Это заключение сделано на основании попарного сравнения межклассовых расстояний, которые оказались в большинстве случаев для первого признака больше, чем для второго признака, за исключением расстояния Евклида. Однако расстояние Евклида для признака $D_h[U]$ не является показательным, так как в нем не учитывается дисперсия $D[D_h]$, которая в данном случае почти на порядок превышает значение $m[D_h]$ для обоих классов, что будет приводить к значительным ошибкам в классификации.

Другим подходом к оценке степени разделимости классов является применение статистических критериев. При обработке был использован критерий Неймана — Пирсона, суть которого сводится к такой установке, разделяющей границы между классами, при которой фиксируется уровень ошибки I рода (P_1).

В табл. 2 представлены расчеты величины ошибки второго рода P_{II} при задании P_1 .

Таблица 1

Межклассовые расстояния между классами фона и загрязнений, вызванных пленками ПАВ и канализационными стоками

Тип межклассового расстояния	Признак		
	2	3	4
1	$m[U]$	$D_h[U]$	$\{m[U], D_h[U]\}$
Колмогорова-Смирнова	0,87	0,64	-
Крамера-фон Мизеса	1,43	0,28	-
Джеффриса-Матуситы	1,55	0,66	-
Бхаттакария	1,48	0,44	1,568438
Дивергенция	15,21	3,87	94,84011
Махalanобиса	3,44	1,31	-
Евклида	28,71	158,21	-

Ошибки I и II родов при распознавании загрязнений от фонового класса, рассчитанные с использованием критерия Неймана-Пирсона

Информативный признак	Тип ошибки	Значение ошибки				
$m[U]$	I рода	0,001	0,053	0,180	0,263	0,450
	II рода	0,194	0,097	0,050	0,009	0,002
$D_n[U]$	I рода	0,003	0,105	0,300	0,0369	0,400
	II рода	0,847	0,417	0,020	0,014	0,004

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, показывает, что наилучшее решение может быть достигнуто при классификации по среднему значению сигнала $m[U]$. Например, при ошибке I рода $P_1=0,053$, ошибка II рода составляет $P_{II}=0,097$, в то время как при классификации по дисперсии $D_n[U]$ при ошибке $P_1=0,105$ ошибка II рода составляет $P_{II}=0,417$.

После обучения системы распознавания проводится классификация исследуемых участков морской поверхности на аномальные и фоновые. Было выбрано 2 района — район канализационного выпуска в окрестности г. Севастополя (позиция 6 на рис. 1) и район с удаленным сликом (позиция 3 на рис. 1).

При выделении слика, образованного пленками ПАВ, использовалась реализация фрагментов изображения такого же пространственного масштаба ($1,25 \times 1,25 \text{ км}^2$), как и при обучении. По каждому фрагменту рассчитывались значения информативных признаков $m[U]$ и $D_n[U]$. Для классификации применялась процедура, основанная на критерии Неймана-Пирсона, который производил отнесение каждого фрагмента к одному из двух классов, фону или загрязнению. Проведенные расчеты показали, что наименьшие ошибки (одно ложное обнаружение, т.е. фрагмент отнесен к классу "аномалия", хотя он расположен в удалении от него на 4 км) в распознавании получены для значения ошибки первого рода $P_1 = 0,053$ (рис. 3). Выделение канализационного стока проводилось по такой же методике.

Заключение

Полученные результаты демонстрируют эффективность радиолокационных методов контроля за состоянием морской по-

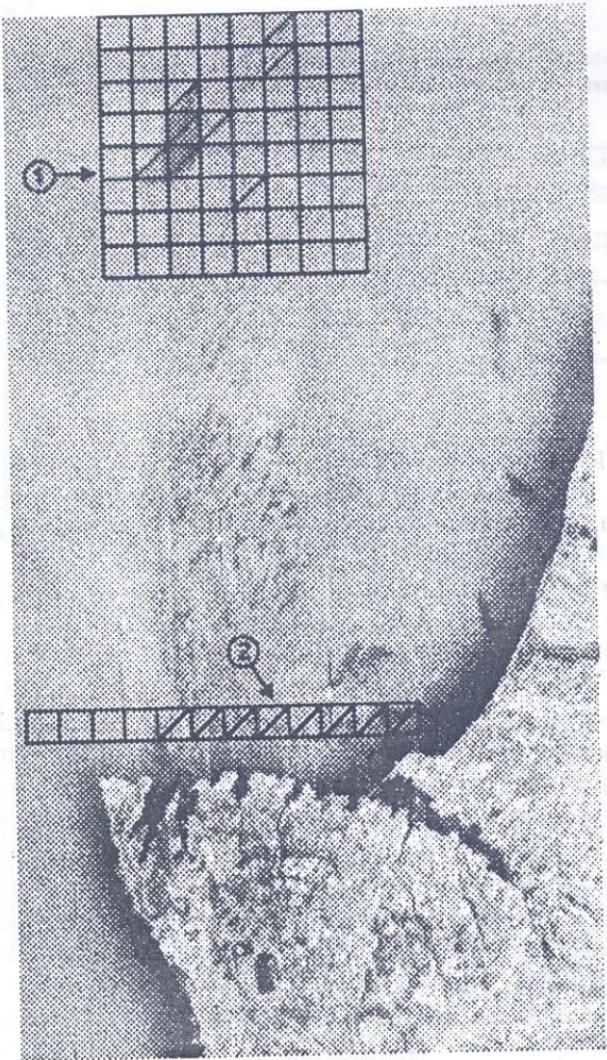


Рис. 3. Результаты классификации радиолокационного изображения с использованием критерия Неймана-Пирсона для фрагмента с удаленным слишком (1) и с канализационным стоком (2). Косой чертой показаны участки загрязнения, пустые — фон

верхности, а также эффективность цифровой обработки радиолокационных, позволяющей получить как качественные параметры, так и количественные характеристики сливков. Показана целесообразность предварительной обработки с целью вер-

ной интерпретации явлений на морской поверхности, зафиксированных на радиолокационном изображении. Предложенная методика автоматизированного выделения аномалий морской поверхности подтверждает теоретические предпосылки об использовании статистических и кластерных методов классификации различных явлений в океане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондур В.Г. Новые методы дистанционного мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории. — Вопросы радиоэлектроники, 1998, №1, 20 с.
2. Бондур В. Г. Оперативная дистанционная оценка состояния границы раздела атмосфера— океан по пространственным спектрам изображений // В книге: Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987.
3. Аванесова Г.Г., Воляк К.И., Шугай И.В. Измерения характеристик волнения самолетным локатором бокового обзора.— Труды Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР, т. №156. М.: Наука, 1984.
4. Салганник П.О., Ефремов Г.А., Неронский А.Б. и др. Радиолокационное зондирование Земли с ИСЗ "Космос-1870" // Исследования Земли из космоса, 1990, №2, с. 70-79.
5. Челомей, Ефремов Г.А., Литовченко К.Ц. и др. Радиолокация морской поверхности с высоким разрешением с ИСЗ "Космос-1870" // Исследования Земли из космоса, 1990, №2, с. 80-90.
6. Неронский Л.Б., Коберниченко В.Г., Зраенко С.М. Цифровое формирование радиолокационных изображений земной поверхности в радиолокаторе с синтезированной апертурой космического аппарата "Алмаз-1" // Исследования Земли из космоса, 1993, №4, с. 33-43.
7. Бондур В.Г., Воляк К.И. Оптический пространственный спектральный анализ изображений морской поверхности. Исследования по гидрофизике // Тр. ФИАН СССР. М.: Наука, 1984, с. 63-78.
8. Арумов Г.П., Бондур В.Г. и др. Пространственный спектральный анализ радиолокационных и фотографических изображений морской поверхности при наличии нефтяных загрязнений. Препринт ИКИ АН СССР, Пр-616, 1981, 19 с.
9. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985, 375 с.
10. Alpers W., Huhnerfuss H. Radar signatures of oil films floating on the sea surface and the Marangoni Effect // J. Geoph. Res., 1988, v. 93, n.C4, p.3642-3648.
11. Калмыков А.И., Пичугин А.П. Особенности обнаружения неоднородностей морской поверхности радиолокационным методом // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, т. 17, № 7, 1981.
12. Keshava P. Singh, A. Laurence Gray, Robert K. Hawkins, Robert A. O'Neil. The Influence Oil on C-and Ku— Band Ocean Backscatter./ / IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, v. GE— 24, №5, September 1986.
13. Калмыков А.И., Никитин П.А., Пичугин А.П. и др. Об упорядоченных мезомасштабных структурах на поверхности океана, выявленных по данным радиолокационных съемок из космоса // Исследования Земли из космоса, 1985, №3, с. 41-47.
14. Pratt W. K. Digital Image Processing. // New York: John Wiley & Sons, Inc., 1978, 386 p.

15. Fukunaga K. Introduction to statistical pattern recognition. //New York:
Academic Press, 1972, 253 p.
16. Duran B.S., Odell P.L. Cluster Analysis. // New York. 1974, 78 p.
-