

УДК 551.465

## РАСПОЗНАВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ ДЕШИФРОВОЧНЫХ ПРИЗНАКОВ

*Г.Я. Красовский, д-р техн. наук  
(Институт проблем национальной безопасности  
РНБО Украины)*

*А.Н. Трофимчук, д-р техн. наук  
(Институт телекоммуникаций и  
глобального информационного пространства  
НАН Украины)  
В.А. Слободян  
А.Н. Брашеван  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»)*

*Предложен алгоритм автоматического распознавания типов загрязнений на морской поверхности, основанный на методе выделения признаков по взаимной корреляции выделенного контура и контуров тестовых фигур. Разработанная методика дает возможность с достаточной вероятностью определить характер аномального явления морских акваториях.*

*Запропоновано алгоритм автоматичного розпізнавання типів забруднень на морській поверхні, оснований на методі виділення ознак по взаємній кореляції виділеного контуру й контурів тестових фігур. Розроблена методика дає можливість із достатньою ймовірністю визначити характер аномального явища морських акваторіях.*

*The algorithm of automatic recognition of types of pollution on the sea surface, based on a method of allocation of signs on mutual correlation of the allocated contour and contours of test figures is offered. The developed technique gives the chance with sufficient probability to define character of the abnormal phenomenon sea water areas.*

### **Введение**

Основными факторами антропогенного загрязнения моря являются: речной сток; береговой сток; абразия берегов; разливы

© Г.Я. Красовский, А.Н. Трофимчук, В.А. Слободян, А.Н. Брашеван, 2008

нефти и нефтепродуктов разного происхождения [1]. В первую очередь, интенсивному загрязнению подвергаются прибрежные воды. Для повышения эффективности мониторинга их экологического состояния необходимо быстро и эффективно определять тип загрязнений, а также их генезис и следствия. Это можно сделать на основе тематического дешифрирования космических снимков.

Базируясь на практическом опыте тематической обработки космических снимков с разными типами загрязнений, выделены наиболее информативные естественные дешифровочные признаки каждого типа загрязнения, характерные для Черного и Азовского морей. Все они систематизированы и описаны словесно [2]. Однако, для эффективного мониторинга морских акваторий оказывается недостаточным применение только естественных дешифровочных признаков. Для автоматизации процесса идентификации аномального явления на морской поверхности необходимо выделение искусственных дешифровочных признаков.

### **1. Исследование информативности тестовых фигур с применением вероятностного анализа признаков**

Для достижения цели предложен метод выделения признаков по взаимной корреляции исследуемого контура и контуров набора тестовых фигур. Такой подход использовался, например, в распознавании рукописного текста [3, 4]. На основе полученных в [5] результатов разработан алгоритм автоматического определения типа загрязнения.

Корреляционный анализ тестовых фигур показал, что из 10 предложенных фигур (рис. 1) для дальнейшего анализа целесообразно использовать 8, т.к. две из них коррелированы со всеми остальными фигурами [5].

Используя метод, описанный в [5], были сформированы выборки данных для каждого типа загрязнения. Загрязнения одного типа были объединены в суммарную выборку. По полученным данным строились гистограммы, определялись значения математического ожидания и дисперсии каждого класса при исследовании каждой тестовой фигуры. Анализ показал, что исследуемые законы распределения можно считать нормальными (рис. 1.1).

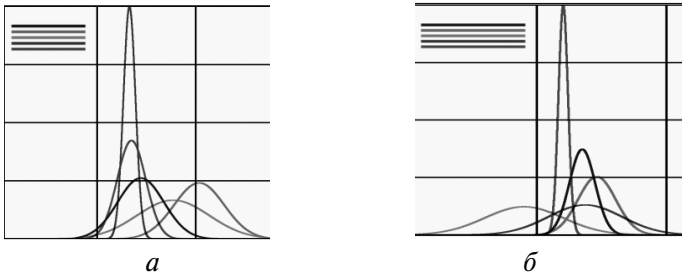


Рис. 1.1. Плотности распределения типов загрязнения для квадрата (а) и пятиугольника (б)

Для дальнейшего анализа в качестве решающего правила был выбран байесовский классификатор (1.1) [6]. Со статистической точки зрения он соответствует оптимальному качеству классификации.

$$P(a_k|\vec{x}) = \frac{f(\vec{x}|a_k)}{\sum_{j=1}^M f(\vec{x}|a_j)} \quad (1)$$

где  $P(a_k|\vec{x})$  — апостериорная вероятность.

Расчет вероятностей по формуле Байеса дал возможность сформировать матрицы ошибок определения типов загрязнений по каждой тестовой фигуре. Анализ полученных результатов позволил выделить наиболее информативные тестовые фигуры — треугольник, квадрат и пятиугольник. Вероятность правильного распознавания типов загрязнений по этим фигурам варьируют от 0,6 до 0,9 (табл. 1.1).

## 2. Алгоритм распознавания типов загрязнений морских акваторий

Результаты корреляционного и вероятностного анализа использовались для построения алгоритма определения типов загрязнений морских акваторий (рис. 2.1). Процесс распознавания причины аномального явления на морской поверхности включает в себя следующие этапы:

**Таблица 1.1 — Матрицы ошибок по выделенным тестовым фигурам**

	ПЯТИ-УГОЛЬНИК	Абразия берега	«Цветение» фитопланктона	Речной сток	Нефтяные загрязнения	Береговой сток
		1	2	3	4	5
1	Абразия берега	0,31	0,06	0,11	0,26	0,26
2	Цветение фитопланктона	0,06	0,80	0,12	0,01	0,01
3	Речной сток	0,19	0,45	0,16	0,09	0,10
4	Нефтяные загрязнения	0,01	0	0	0,85	0,14
5	Береговой сток	0,18	0	0,01	0,46	0,35
	КВАДРАТ	Абразия берега	«Цветение» фитопланктона	Речной сток	Нефтяные загрязнения	Береговой сток
		1	2	3	4	5
1	Абразия берега	0,62	0,18	0,01	0	0,18
2	Цветение фитопланктона	0,35	0,51	0,01	0,05	0,08
3	Речной сток	0,08	0,03	0,77	0,01	0,12
4	Нефтяные загрязнения	0,24	0,28	0,19	0,12	0,16
5	Береговой сток	0,05	0	0,01	0	0,93

1. Получение космических снимков Черного и Азовского морей;
2. Выделение контура аномального участка на морской поверхности;
3. Преобразование контура фигуры в развертку;
4. Аппроксимация контура;
5. Создание математической модели выделенного контура;
6. Расчет коэффициентов корреляции исследуемого пятна и отобранных для анализа тестовых фигур (треугольник, квадрат, пятиугольник);
7. Расчет вероятностей типов загрязнений по одномерным, двумерным и трехмерным плотностям распределения;
8. Определение максимального значения вероятности и принадлежности исследуемого пятна к одному из классов загрязнений.

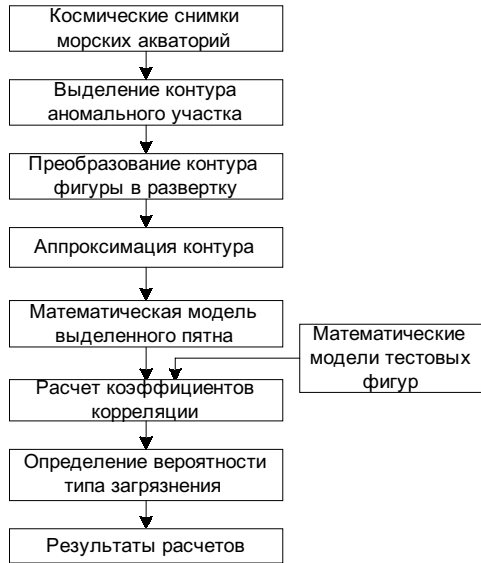


Рис. 2.1. Алгоритм распознавания типов загрязнений.

Перспективность использования методов дистанционного зондирования для решения задач мониторинга морских акваторий основана на возможности регистрации современной дистанционной аппаратурой широкого спектра значащих параметров водной среды. К ним относятся, прежде всего: вариации гидрооптических характеристик, в первую очередь цвета и мутности; изменения гидродинамических параметров; вариации температуры. Примеры регистрации гидрооптических параметров морских акваторий средствами дистанционного зондирования представлены на рис. 2.2, 2.3.



Рис. 2.2. Речные стоки.



Рис. 2.3. Абразия берега.

**Выделение на космических снимках участков водной поверхности** достигается применением линейной разделительной функции  $d(x)$  [1]

$$X(I) \in \begin{cases} w_1, \text{если } d(I) < 0 \\ w_2, \text{если } d(I) \geq 0 \end{cases},$$

где  $d(x) = W_0 + W_2 I_2 + W_3 I_3$ ,  $I_2$  и  $I_3$  — зональные яркости изображения соответственно в каналах съемки К2 и К3;  $W_0$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  — постоянные коэффициенты (компоненты вектора  $\vec{W}$ ), значения которых приблизительно оценивают по двумерной гистограмме яркости.

Уточнение значений компонентов вектора  $\vec{W}$  достигается при помощи итеративных процедур теории распознавания образов, например, методами коррелирующих приращений или наименьшей квадратичной ошибки.

**Картографирование пятнистости** акваторий состоит в выделении участков космических изображений водной поверхности с однородными в заданном смысле характеристиками спектральной яркости. В общем случае по одному спутниковому изображению может быть построено некоторое множество картографических моделей, отличающихся степенью генерализации показателей пятнистости акватории. Известен ряд публикаций, посвященных разработке алгоритмов выделения на космических снимках акваторий границ однородных природных образований [2]. В рассматриваемых приложениях для этой цели можно использовать класс алгоритмов, основанных на байесовских решающих правилах [2]

$$P(\omega_i | \gamma) = \frac{\rho(u | \omega_i) \cdot \rho(\omega_i)}{\sum_{i=1}^{km} \rho(u | \omega_i) \cdot \rho(\omega_i)}.$$

Здесь  $\rho(\omega_i)$  — априорная вероятность того, что поверхностные воды на участке  $S_p$  относятся к классу  $\omega_i$ ;  $\rho(u | \omega_i)$  — условная плотность распределения яркости участка в состоянии  $\omega_i$ ;  $P(\omega_i | \gamma)$  — апостериорная вероятность.

Это правило используется при принятии решения об отнесении рассматриваемого элемента к одному из классов множества.

Для решения поставленной задачи необходимо выполнить построение статистической модели выделенных параметров изображения [7]. Однако, законы распределения реальных экспериментальных данных являются многомодовыми (мультимодальными).

Одним из методов аппроксимации многомодовых законов распределения является применение смесей нормальных распределений вида [7]

$$f(x) = \sum_{k=1}^M p_k \cdot \varphi_k(x) = \sum_{k=1}^M p_k \cdot \frac{\exp\left\{-\frac{(x-m_k)^2}{2 \cdot \sigma_k^2}\right\}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_k^2}},$$

где  $M$  — количество нормальных ядер  $\varphi_k(x)$ ,  $m_k$ ,  $\sigma_k$  — параметры  $k$ -го нормального распределения  $\varphi_k(x)$ ,  $p_k$  — весовые коэффициенты, обеспечивающие выполнение требования

$$\int f(x)dx = 1.$$

Процедура нахождения параметров  $M$ ,  $m_k$ ,  $\sigma_k$ ,  $p_k$  основывается на минимизации среднеквадратической ошибки аппроксимации.

В качестве экспериментальной оценки плотности вероятности используется гистограмма экспериментальных данных.

Построение многомодовой статистической модели данных включает в себя следующие этапы:

1. определение количества составляющих в смеси распределения  $M$ ; определение статистических оценок параметров  $m_k$ ,  $\sigma_k$  для каждой из мод распределения  $k=1..M$ ;

3. определение весовых коэффициентов для каждой из составляющих смеси распределения  $p_k$ ,  $k=1..M$ .

В данной работе необходимо выделить аномальный участок на поверхности морских акваторий. Для решения этой задачи используется метод, описанный в [8]. Здесь учитываются параметры

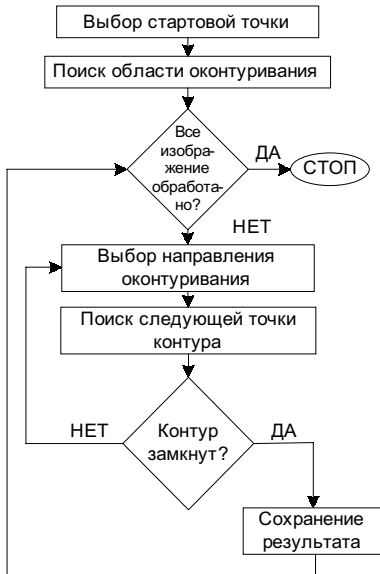


Рис. 2.4. Алгоритм векторизации выделенного пятна.

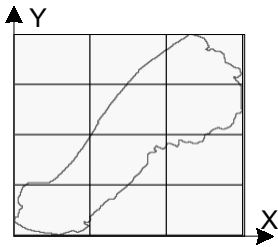


Рис. 2.5. Контур речного стока

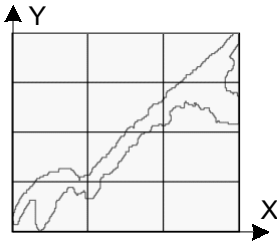


Рис. 2.6. Контур абразии берега.

обработки: размер окружения пиксела при усреднении интенсивности (установка чувствительности) и допустимого отрезка значений изменений цвета.

Выделенный аномальный участок необходимо оконтурить, а контур векторизировать. Для решения этой задачи был разработан **алгоритм векторизации контуров** выделенных участков, представленный на рис. 2.4. В результате оконтуривания аномальных пятен в файл сохраняются координаты каждой точки контура  $(x_i, y_i, i=1, N)$ , где  $N$  — количество точек контура).

Результаты применения разработанного алгоритма представлены на рис. 2.5, 2.6. На рис. 2.5 приведен контур речного стока, выделенного со снимка, представленного на рис. 2.2. На рис. 2.6 приведен контур абразии берега, полученный в процессе обработки снимка, представленного на рис. 2.3.

На рис. 2.7, 2.8 представлены развертки контуров (рис. 2.5, 2.6 соответственно) по осям X и Y. Полученные данные использовались для аппроксимации выделенных контуров.

Для **аппроксимации** контура использовался метод наименьших квадратов [6]:



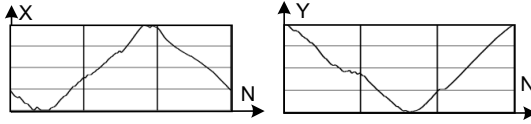


Рис.2.7. Развертка по осям X и Y контура речного стока.

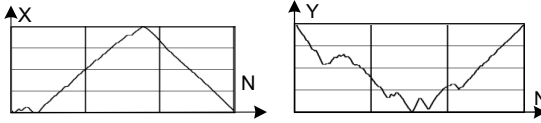


Рис.2.8. Развертка по осям X и Y контура абразии берега.

$$F(x) = a_0 + ax + a_2x^2 + \dots + a_Nx^N,$$

$$F(y) = b_0 + by + b_2y^2 + \dots + b_Ny^N$$

где  $a_N, b_N$  — коэффициенты аппроксимации,  $x_N, y_N$  — координаты каждой точки исследуемого контура.

На рис. 2.9, 2.10 представлены аппроксимированные контуры.

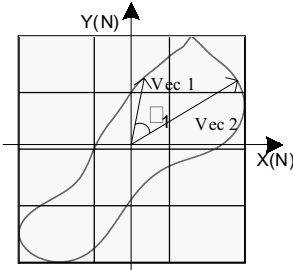


Рис. 2.9. Аппроксимированный контур речного стока.

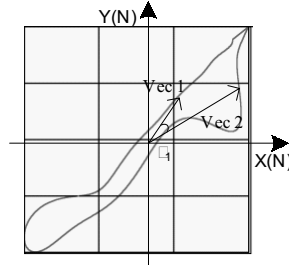


Рис. 2.10. Аппроксимированный контур абразии берега.

Для проведения следующих исследований строилась **математическая модель контура**, при этом исследовалась зависимость вектора (vec) (от начала координат до каждой точки контура) от приращения угла между соседними векторами ( $\theta$ ) (рис. 2.9, 2.10). В результате формируются математические модели, вид которых представлен на рис. 2.11, 2.12.

$$vec_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2},$$

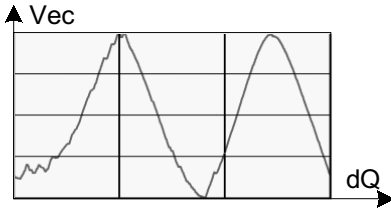


Рис. 2.11. Математическая модель контура речного стока.

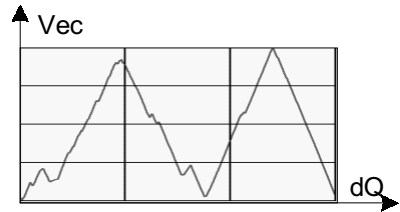


Рис. 2.12. Математическая модель контура абразии берега.

$$\cos \theta_i = \frac{x_i \cdot x_{i+1} + y_i \cdot y_{i+1}}{\sqrt{((x_i^2 + y_i^2) \cdot (x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2))}},$$

$$Vec(\theta) = \sum_{i=1}^N vec_i \cdot \theta^i$$

Расчет коэффициентов корреляции между исследуемым пятном и предложенными тестовыми фигурами дает значения функции  $f(x_1, x_2, x_3|k)$ . Расчет проводился по формуле [9]:

$$r_{12} = \frac{K(x_1, x_2)}{\sigma_{x_1} \cdot \sigma_{x_2}}; \quad -1 \leq r \leq 1,$$

где  $r_{12}$  — нормированный коэффициент корреляции,

$$\begin{aligned} K_{12} &= K(x_1; x_2) = M[\dot{x}_1 \cdot \dot{x}_2] = \\ &= \int \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - \bar{x}_1) \cdot (x_2 - \bar{x}_2) \cdot f(x_1, x_2) dx_1 dx_2. \end{aligned}$$

Вероятности типов загрязнения рассчитывались по одномерным (2.1), двумерным (2.2) и трехмерным (2.3) плотностям распределения [9].

Одномерная плотность распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.1)$$

Двумерная плотность распределения:

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sqrt{1 - r_{12}^2}} \times \exp \left[ -\frac{\left( \frac{x_1 - m_1}{\sigma_1} \right)^2 - 2r_{12} \cdot \left( \frac{x_1 - m_1}{\sigma_1} \right) \cdot \left( \frac{x_2 - m_2}{\sigma_2} \right) + \left( \frac{x_2 - m_2}{\sigma_2} \right)^2}{2 \cdot (1 - r_{12}^2)} \right], \quad (2.2)$$

где  $r_{12} = \frac{K_{12}}{\sigma_1 \sigma_2}$  нормированный коэффициент корреляции  $x_1$  и  $x_2$  [1].

Трёхмерная плотность распределения:

$$f(\vec{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{M}{2}} |K|^{1/2}} \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |K_{ij}| \cdot (x_i - m_i) \cdot (x_j - m_j)}{|K|} \right], \quad (2.3)$$

где  $M=3$ ;  $|K|$  — определитель матрицы  $[K]$ ;  $|K_{ij}|$  — алгебраическое дополнение элемента  $K_{ij}$ .

В качестве решающей функции выбрана формула Байеса (1.1).

Определение вероятности типа загрязнения дал следующие результаты:

по одномерным законам распределения

$$P_{\text{речного стока}} = 0,49, \quad P_{\text{абразии берега}} = 0,45;$$

по двумерным законам распределения

$$P_{\text{речного стока}} = 0,66, \quad P_{\text{абразии берега}} = 0,75;$$

по трёхмерным законам распределения

$$P_{\text{речного стока}} = 0,87, \quad P_{\text{абразии берега}} = 0,92.$$

### Заключення

В статті пропонується алгоритм розпізнавання типів забруднень Чорного і Азовського морей з використанням тестових фігур. Розв'язання даної задачі обґрунтовано необхідністю автоматизувати процес космічного моніторингу морських акваторій. Аналіз отриманих експериментальних результатів показав, що застосування розробленого алгоритму дозволяє ідентифікувати типи забруднень з достатньою ймовірністю, що дає можливість автоматизувати процес розпізнавання аномальних явищ на морській поверхні.

\* \* \*

1. *Красовский Г.Я., Петросов В.А.* Інформаційні технології космічного моніторингу водних екосистем і прогнозу водоспоживання міст. — К.: Наук. думка, 2003. — 224 с.

2. *Красовский Г.Я.* Аэрокосмический мониторинг поверхностных вод. — Л.: ВНИИКАМ, 1992. — 231с.

3. *Гонсалес Р., Дж. Ту.* Принципы распознавания образов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 416 с.

4. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — Кн. 2. — 480 с.

5. *Слободян В.А.* Исследование информативности тестовых фигур с применением корреляционного анализа // *Авиационная и космическая техника и технология.* — 2008. — № 2 (49). — С. 89—92.

6. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. — М.: Высш. шк., 2000. — 383 с.

7. *Брашеван А.Н.* Статистическая модель многомодовых экспериментальных данных // *Радиоэлектронные и компьютерные системы.* — 2003. — № 2. — С. 82—85.

8. *Гелецян Д.* Векторизация растровых изображений.

9. *Математические модели электронных аппаратов и систем / М. Ф. Бабаков, А. В. Попов, М. И. Луханин.* — Учеб. пособие. — Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиа. ин-т», 2003. — 109 с.

*Отримано: 17.09.2008 р.*