

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ АКВАТОРИИ ПОРТА НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ

В.Ф. Мочалов, Б.В. Соколов, А.Г. Саидов (Санкт-Петербург)

Введение. Администрация порта несет ответственность за контроль состояния вод в акватории порта, выявление источников возможного загрязнения и оценивание интенсивности загрязнения. При этом выполняемые контрольные мероприятия и привлекаемые технические средства не всегда позволяют обеспечить оперативное оценивание площади и интенсивности возможного загрязнения водной поверхности, анализ динамики развития ситуации, особенно на площади более 10000 м². Вместе с тем растут информационные возможности материалов регулярно выполняемой космической съёмки. Активно развиваются методы обнаружения загрязнений водной поверхности на основе технологии автоматизированной обработки энергетически калиброванных и геометрически согласованных материалов мультиспектральной космической съёмки.

Спектрально-яркостные признаки обнаружения и распознавания фактов возможного загрязнения акватории порта нефтепродуктами зависят от ряда внешних факторов, характеризующих спектральные отражательные и излучательные свойства водной поверхности. Принимая во внимание изменчивость внешних условий формирования сигнала, поступающего на вход бортовой оптико-электронной аппаратуры, предлагается осуществлять разбиение участков водной поверхности, находящихся в условиях различной степени загрязнения на основе математического аппарата нечеткой кластеризации.

Методический аппарат. Комплексная модель, отражающая процесс оценивания загрязнения акватории порта, предусматривает периодическое выполнение операций, приведенных на рисунке 1.

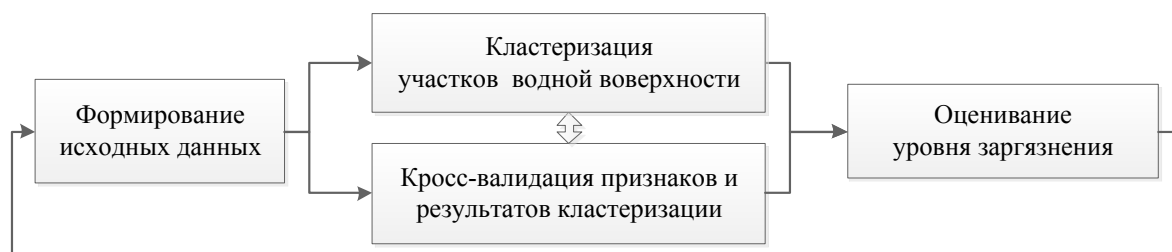


Рис. 1 – Последовательность операций моделируемого процесса

Формирование исходных данных о состоянии большой по площади акватории предполагает сбор архивных и текущих материалов съёмки, выбор обучающих и контрольных площадок для участков акватории порта с различной степенью концентрации загрязняющих веществ. На основе анализа и периодического обновления исходных данных формируются спектрально-яркостные признаки автоматизированной кластеризации участков водной поверхности с различной степенью загрязнения. Материалы съёмки представляют исходное множество условных точек мультиспектрального изображения R , в котором на основе применения математического аппарата нечеткой кластеризации выявляются и упорядочиваются следующие подмножества: площадь загрязнения водной поверхности $PS = \{ps; ps \in R\}$; участки водной поверхности с различной концентрацией загрязнения $PT =$

$\{pt_b: b \in N, 1 \leq b \leq 5\}$; $PT \subset PS$. Элементы указанных множеств обладают характеристическими свойствами, определяющими их принадлежность, пересечение и объединение. На основе анализа числовых значений элементов осуществляется оценивание площади загрязнения и участков водной поверхности с различной концентрацией загрязняющих веществ по пяти уровням.

Моделируемый процесс характеризуется следующими факторами:

- участки акватории подвергаются кластеризации с учётом ранее выбранных обучающих образцов поверхностей с известными уровнями концентрации загрязняющих веществ;

- на основе анализа спектральных отражательных характеристик обучающих образцов инициализируется начальное нечёткое разбиение участков водной поверхности с различной концентрацией загрязняющих веществ;

- обеспечивается возможность анализа динамики развития ситуации на основе обработки разновременных материалов мультиспектральной съёмки, периодически выполняемой для контролируемой акватории в ходе эксплуатации портового хозяйства.

Математическая постановка задачи нечеткой кластеризации основана на следующих допущениях.

Пусть R – исходное множество точек мультиспектрального изображения в пределах рассматриваемой территории, $R \supset PS$. Каждой такой точке соответствует вектор числовых значений коэффициентов спектральной яркости $r_i = (r_i^1, r_i^2, \dots, r_i^l)$, где r_i^j – числовое значение j -ой спектральной характеристики для i -ой точки ($i = \overline{1, n}; j = \overline{1, l}$). В качестве функции расстояния $d(r_i, r_q)$ в l -мерном пространстве спектральных характеристик используется функция, основанная на вычислении Евклидовой метрики:

$$d(r_i, r_q) = \sqrt{\sum_{j=1}^l (r_i^j - r_q^j)^2} \quad (1)$$

Пусть задано k кластеров для каждого множества определяемых значений PS и PT , характеризующих обучающие выборки для оценивания уровня загрязнения акватории порта. Порождается гипотеза о существовании в исходном множестве R подмножеств PS и PT

Требуется обеспечить разбиение r_i точек мультиспектрального изображения на кластеры на основе расчета и минимизации целевой функции:

$$J(U, V) = \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n u_k(r_i)^m d^2(v_k, r_i), \quad (2)$$

при этом:

$$\sum_{k=1}^c u_k(r_i) = 1 \quad (c \in N \text{ и } c > 1; i = \overline{1, n}), \quad (3)$$

где $U = [u_k(r_i)]$ – нечёткое разбиение множества точек изображения R на основе функций принадлежности $[u_k(r_i)]$, определяющих степень принадлежности i -й точки изображения r_i к кластеру; $V = (v_1, \dots, v_c)$ – центры кластеров; $d(v_k, r_i)$ – расстояние между центром кластера v_k и i -ой точкой изображения r_i в соответствии с формулой (1); m – фаззификатор ($m \in R, m > 10$); c – количество кластеров; n – количество точек изображения; $i = \overline{1, n}$; $k = \overline{1, c}$.

На основе анализа значения функции принадлежности $u_k(r_i)$ определяется степень принадлежности i -й точки изображения k -му кластеру, а также вклад i -й точки изображения в оценку координат центра k -го кластера.

Предусмотрено выполнение следующих шагов.

Шаг 1. Инициализация для каждого множества определяемых значений PS и PT начального нечёткого разбиения $U = [u_k(r_i)]$, удовлетворяющего условию (3).

Шаг 2. Вычисление координат центров кластеров:

$$v_k^j = \frac{\sum_{i=1}^n u_k(r_i)^m * r_i^j}{\sum_{i=1}^n u_k(r_i)^m}; \quad j = 1 \dots, l; u_k = (u_k^1, u_k^2, \dots, u_k^l). \quad (4)$$

Шаг 3. Вычисление новых значений функций принадлежности:

$$u_k(r_i) = \frac{1}{\sum_{t=1}^c \left[\frac{d(v_k, r_i)}{d(v_t, r_i)} \right]^{2*(m-1)}}. \quad (5)$$

Шаг 4. Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока не будет выполнена кластеризация r_i точек мультиспектрального изображения.

В ходе применения математического аппарата нечёткой кластеризации осуществляется уточнение центров кластеров для соответствующих видов идентифицируемых водных поверхностей и осуществляется сегментация изображения рассматриваемой акватории порта.

Результаты

В качестве примера проведены результаты автоматизированной кластеризация водной поверхности одного из портов.

Исходные данные моделируемого процесса сформированы на основе материалов мультиспектральной съёмки космического аппарата Sentinel-2 S2A_MSIL2A_20210520T100031_N0300_R122_T34UDF_20210520T114433 Европейского космического агентства (ESA) от 20 мая 2021 г. В таблице 1 приведены основные технические характеристики материалов съёмки, которые могут применяться для формирования исходных данных.

Таблица 1 – Основные характеристики материалов мультиспектральной космической съёмки

Наименование космического аппарата	Канопус–В (Россия)	Sentinel-2 (ESA)
Пространственное разрешение на местности, м	10,5-12	10,20,60
Полоса обзора, км	20	100
Количество спектральных каналов, шт.	4	13
Границы спектральных каналов, мкм	0,46...0,52; 0,51...0,60; 0,63...0,69; 0,75...0,84	0,42...2,24
Периодичность съёмки, сутки	3	5

Представленная модель оценивания загрязнений акватории порта нефтепродуктами на основе автоматизированной обработки материалов мультиспектральной космической съёмки обеспечивает возможность оперативного решения поставленной задачи.



Рис. 2 – Результат кластеризации акватории порта по степени загрязнения водной поверхности: а) акватория порта; б) данные для оценивания.

Периодическая реализация процесса оценивания состояния позволит отслеживать динамику развития ситуации и выявлять источники неблагоприятного воздействия.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 19–08–00989, № 20-08-01046), в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

Литература

1. Демидова Л.А., Нестеров Н.И., Тишкин Р.В. Возможно-нечеткая сегментация изображений земной поверхности с применением генетических алгоритмов и искусственных нейронных сетей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. №3 (198). Информатика. Телекоммуникации. Управление. С. 37-47.
2. Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Системно-управленческая интерпретация процессов создания и использования моделей и полимодельных комплексов // Информатизация и связь. 2019. № 3. С 14-19.
3. Тербиж В.Ю. Введение в статистическую теорию обратных задач. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 376 с.
4. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. Техносфера, 2010. 560 с.
5. Mochalov V., Grigorieva O., Zelentsov V., Markov A., Ivanets M. Intelligent Technologies and Methods of Tundra Vegetation Properties Detection Using Satellite Multispectral Imagery // Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems / Proceedings of the 8th Computer Science On-line Conference, Springer Nature Switzerland AG 2019 R. Silhavy (Ed.): CSOC 2019, AISC 986, pp. 234–243, 2019.
6. Mochalov V., Grigorieva O., Zhukov D., Markov A., Saidov A. Remote Sensing Image Processing Based on Modified Fuzzy Algorithm / Proceedings of the 9th Computer Science On-line Conference, Vol.2 Springer Nature Switzerland AG 2020 R. Silhavy (Ed.): CSOC 2020, AISC 1225, pp. 563–572, 2020.
7. Semek F. et al. Airborne remote sensing. Theory and practice in assessment of terrestrial ecosystems. Global Change Research Centre, 159 pages, 2014.
8. Sentinel-2 User Handbook ESA Standard Document Date 2015.
9. Sentinel Application Platform <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>