

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-153-169>

Математическая модель обработки мультиспектральных данных для мобильной платформы экологического мониторинга

С. В. Спевакова¹, А. Г. Спеваков¹ ✉, И. В. Чернецкая¹

¹ Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: aspev@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является математическое обоснование процесса обработки мультиспектральных данных с целью обнаружения локальных зон загрязнения окружающей среды с возможностью классификации загрязняющего вещества.

Методы. В качестве базового математического аппарата используются основы прикладной теории стохастических систем, основанной на уравнениях для многомерных характеристических функций и функционалов. При определении загрязняющего вещества используется критерий, отражающий способность предметов и подчиняющийся закону Ламберта. Для решения задачи классификации объектов применены подходы с использованием бинарной логистической регрессии. При оценке результатов исследования применены статистические методы анализа.

Результаты. Полученные частные математические модели позволяют учесть множество факторов, воздействующих на мобильные платформы экологического мониторинга и функционирующих в автоматическом режиме. Обосновывают возможность дистанционного анализа локальных зон загрязнения окружающей среды с возможностью определения загрязняющих веществ, таких как углеводороды, фосфат-ионы и др., а также поиска несанкционированных локаций строительного и бытового мусора. Повышают точностные характеристики в 1,3 раза при определении параметров выделенных объектов за счет обработки данных, полученных в различных спектральных диапазонах. Способствуют снижению вычислительной сложности алгоритма классификации в 1,1 раза с учетом объема входных данных в ограниченном спектральном диапазоне и уменьшению разрешения эталонного объекта, при этом не влияющего на точность классификации.

Заключение. Разработана математическая модель обработки данных и изображений, полученных в нескольких спектральных диапазонах, при функционировании мультиспектрального устройства для автономной мобильной платформы экологического мониторинга, позволяющая выделять объекты в поле зрения устройства с подвижной платформы, получать детализированное изображение объектов рабочей сцены с пространственной привязкой относительно используемой системы координат, отличительной особенностью которой является повышение точности вычисления координат локальных зон загрязнений и повышение достоверности классификации объектов исходя из характеристики диффузионной отражательной способности в различных спектральных диапазонах.

Ключевые слова: математическая модель; мобильные платформы; экологический мониторинг; классификация загрязняющих веществ.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Минобрнауки РФ (проект № 0851-2020-0032).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Спевакова С. В., Спевakov А. Г., Чернецкая И. В. Математическая модель обработки мультиспектральных данных для мобильной платформы экологического мониторинга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 153–169. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-153-169>.

Поступила в редакцию 18.04.2023

Подписана в печать 14.05.2023

Опубликована 30.06.2023

Mathematical Model of Multispectral Data Processing for a Mobile Ecology Monitoring Platform

Svetlana S. Spevakova¹, Alexander G. Spevakov¹ ✉, Irina V. Chernetskaya¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: aspev@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is a mathematical justification of the process of processing multispectral data in order to detect local environmental pollution zones with the possibility of classifying the pollutant.

Methods. The fundamentals of the applied theory of stochastic systems based on equations for multidimensional characteristic functions and functionals are used as a basic mathematical apparatus. When determining a contaminant, a criterion reflecting the ability of objects obeying Lambert's law is used. To solve the problem of object classification, approaches using binary logistic regression are applied. Statistical methods of analysis were used to evaluate the results of the study.

Results. The obtained partial mathematical models allow us to take into account many factors affecting mobile environmental monitoring platforms operating in automatic mode. Substantiate the possibility of remote analysis of local environmental pollution zones, with the possibility of determining pollutants such as hydrocarbons, phosphate ions, etc., as well as searching for unauthorized locations of construction and household garbage. They increase the accuracy characteristics by 1,3 times when determining the parameters of selected objects due to the processing of data obtained in various spectral ranges. They contribute to reducing the computational complexity of the classification algorithm by 1,1 times, taking into account the volume of input data in a limited spectral range and reducing the resolution of the reference object, while not affecting the accuracy of classification.

Conclusion. A mathematical model has been developed for processing data and images obtained in several spectral ranges during the operation of a multispectral device for an autonomous mobile environmental monitoring platform, which makes it possible to identify objects in the field of view of the device from a mobile platform, to obtain a detailed image of working scene objects with spatial reference relative to the coordinate system used, a distinctive feature of which is to increase the accuracy of calculating the coordinates of local zones pollution, and increasing the reliability of the classification of objects based on the characteristics of diffusive reflectivity in various spectral ranges.

Keywords: mathematical model; mobile platforms; environmental monitoring; classification of pollutants.

Funding: The study was supported by the State Assignment of the Ministry of science and higher education of the Russian Federation (project No. 0851-2020-0032).

Conflict of interest: The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Spevakova S. S., Spevakov A. G., Chernetskaya I. V. Mathematical Model of Multispectral Data Processing for a Mobile Ecology Monitoring Platform. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(2): 153–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-153-169>.

Received 18.04.2023

Accepted 14.05.2023

Published 30.06.2023

Введение

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной Организации Объединённых Наций, к 2023 г. сложилась критическая ситуация, связанная с ухудшением качества воды, что представляет угрозу для безопасности пищевых продуктов и продовольственной безопасности [1]. Во многих регионах это связано с урбанизацией и промышленным производством, но в областях с традиционно развитым сельским хозяйством главным источником загрязнения является антропогенное воздействие на почвы пахотных земель и пастбищ, в результате чего в пресной воде повышено содержание загрязняющих веществ. Наиболее распространёнными являются фосфат-ионы, появляющиеся из-за рассыпанных по полям удобрений и моющих средств (полифосфаты), а также азотсодержащие вещества. Поэтому необходимо систематически проводить мониторинг водных ресурсов с целью определения очагов, степени загрязнения и поиска источников. Традиционные методы проведения мониторинга с помощью стационарного оборудования связаны с высокой трудоемкостью, но обладают высокой точностью. Поэтому для выявления потенциальных зон загрязнения можно использовать автономные мобильные платформы экологического мониторинга, полученная с их помощью карта загрязнения способствует выявлению источников загрязнения и приводит к снижению трудоемкости традиционного мониторинга.

На основе анализа научных публикаций [2; 3; 4; 5; 6; 7] было выявлено, что для экологического мониторинга применяются мобильные платформы, оснащенные мультиспектральными датчиками, маршрут следования которых задается оператором, информация об окружающей обстановке, накапливается на съемном носителе и обрабатывается в лаборатории на стационарном вычислительном устройстве, что не позволяет в процессе мониторинга получать информацию в реальном времени и оперативно проводить поиск очагов загрязнений. Также в качестве мультиспектральных датчиков применяются мультиспектральные камеры, используемые в сельском хозяйстве [8], что не всегда позволяет качественно проводить экологический мониторинг в связи с несовпадением спектральных диапазонов при решении таких задач.

Анализ современных методов и средств дистанционного диагностирования природной среды с использованием мультиспектральных датчиков [9; 10; 11; 12; 13; 14] показал, что для контроля уровня экологической безопасности и увеличения оперативности реагирования на инциденты необходимо применять автоматизированные комплексы, обрабатывающие данные в реальном масштабе времени, что накладывает ограничения на сложность алгоритмов обработки данных и объем обрабатываемой информации.

Таким образом, для решения задач экологического мониторинга с помощью автономных мобильных устройств

необходимо синтезировать математические модели, на основе которых строятся перспективные методы, алгоритмы и устройства, используемые в экологическом мониторинге и обрабатывающие информацию в различных спектральных диапазонах.

Материалы и методы

Для интерпретации информации об окружающей среде с использованием мультиспектральных оптико-электронных датчиков рассмотрим сигнал на их выходе. Мультиспектральный датчик представляет собой оптико-электронное устройство, состоящее из пяти матричных фотоприемников с зарядовой связью (ДИ), оснащенных специальными объективами и светофильтрами, настроенными на определенный спектральный диапазон: синий, зеленый, красный, предынфракрасный, ближний инфракрасный.

Математическая модель M_{PS} функционирования мультиспектрального устройства для автономной мобильной платформы экологического мониторинга состоит из следующих частных подмоделей.

Математическая модель M_{inp} ввода данных с оптико-электронных датчиков записывается в виде

$$I_n(x, y) = M_{inp}(E(u, w), S), \quad (1)$$

где $I_n(x, y)$ – амплитуда яркости пиксела на изображении с n -го датчика с координатами (x, y) ; E – поток излучения непрерывной рабочей сцены из точки с координатами (u, w) ; S – спектральный диапазон датчика.

Для повышения точности определения дальности и для осуществления автоматической калибровки мультиспектральных оптико-электронных датчиков, а также формирования дополнительного канала данных для определения концентрации углеводородов в приземном слое в систему введен лазерный комплекс, состоящий из двух генераторов, математическая модель которого имеет вид [15; 16]

$$P(R) = M_{inpL} \times \left(P_0 \Delta R \beta \pi(R) A_\gamma R^{-2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr \right] \right), \quad (2)$$

где $P(R)$ – мгновенное значение мощности, принимаемой с расстояния R ; P_0 – мощность лазерного импульса; $\Delta R = (c \cdot \tau) / 2$ – пространственное разрешение; c – скорость света; τ – длительность лазерного импульса; $\beta \pi$ – объемный коэффициент рассеяния назад; A_γ – эффективная площадь приемной апертуры; α – объемный коэффициент ослабления.

При решении задачи выделения множества объектов по последовательности кадров изображений, полученных в различных спектральных диапазонах, необходимо учитывать сложность условий наблюдения и временные ограничения на обработку. В процессе наблюдения часть объектов может не быть детектирована, поэтому для выделения большего количества реальных объектов и получения данных о них с большей точностью может применяться комплексный подход, позволяющий осуществлять объединение признаков выделенного объекта по серии изображений в

различных спектральных диапазонах или выбор конкретного спектрального диапазона, в котором предсказано поведение выделяемого объекта. Так, например, для определения признаков объектов, характеризующих концентрацию углеводородов, необходимо исследовать ближний инфракрасный диапазон, а для поиска концентрации хлореллы использовать зеленый канал. При обнаружении очагов загрязнений окружающей среды необходимо выделять признаки в различных спектральных диапазонах, так как для них свойственны нарушения почвенного или растительного покрова в совокупности с загрязняющим веществом.

Математическая модель M_q обнаружения множества объектов в поле зрения МУ путем получения мультиспектрального изображения, объединенного из кадров, полученных в нескольких спектральных зонах (видимой, зеленой (550 нм), красной (660 нм), предынфракрасной (RedEdge, 735 нм) и ближней инфракрасной (790 нм)), запишется как

$$Q_m = M_q(I_n, P(R), N_N), \quad (3)$$

где Q_m – множество объектов в пространстве, полученное посредством объединения отдельных сегментов изображений в разных спектральных диапазонах размером 64×64 пиксела, классифицированных как класс N_N .

Для привязки множества объектов Q_m к географической карте путем получения геоданных и определения их размеров необходимо кроме класса объекта определить координаты долготы и широты, а также скорректировать размер

объекта с учетом высоты наблюдения [17].

Рассмотрим процесс выделения движущегося объекта с подвижного основания. Пусть с пространством предметов наблюдения связана система координат $Oxyz$. С подвижным основанием оптического прибора свяжем систему координат $O_xO_yO_z$. Причем следующий порядок разворота подвижной системы координат: угол ψ в плоскости O_{xy} , угол ν в плоскости O_{yO_z} , угол γ в плоскости O_{xO_y} . Если угловые скорости поворотов обозначить соответственно ψ' , ν' , γ' , то по проекции угловых скоростей основания на оси подвижной системы координат могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_{x0} &= \nu' \cos \gamma - \psi' \cos \nu \sin \gamma, \\ \omega_{y0} &= \gamma' + \psi' \sin \nu, \\ \omega_{z0} &= \nu' \sin \gamma - \psi' \cos \nu \cos \gamma. \end{aligned} \quad (4)$$

Угловые скорости ω_{x0} , ω_{y0} , ω_{z0} могут быть измерены с помощью гироскопов, ориентированных по осям подвижной системы координат и закрепленных на основании, или данных, полученных с систем позиционирования.

Ориентация системы технического зрения задается двумя углами: σ и φ (рис. 1). На эти углы развернута относительно основания система координат $O'x_p y_p z_p$, связанная с системой технического зрения. Выберем эту систему координат таким образом, чтобы ось $O'x_p$ совпадала с главной оптической осью прибора, а оси $O'y_p$ и $O'z_p$ были ориентированы вдоль и поперек кадра. Вектор линейной скорости движения центра тяжести основания может быть представ-

лен в виде его проекции на оси основания v_{x0} , v_{y0} , v_{z0} . Рассмотрим уравнение движения системы в начальный момент времени, когда оси основания совпадают с осями неподвижной системы координат, т. е. $\psi = \nu = \gamma = 0$. Поместим две дополнительные системы координат, параллельно перенесенных из точки O в поле изображений $O_i x_i y_i z_i$ и в поле предметов $O_p x_p y_p z_p$ (рис. 1). Тогда с учетом расстояния между началами систем координат можно записать уравнения связи координат в двух системах:

$$\begin{aligned} x_p &= H + z_p \operatorname{ctg} \varphi, \\ y_p &= -(1/f)x_p y_i, \\ z_p &= -(1/f)x_p z_i, \end{aligned} \quad (5)$$

где $H = O'O_p$; $f = O'O_i$.

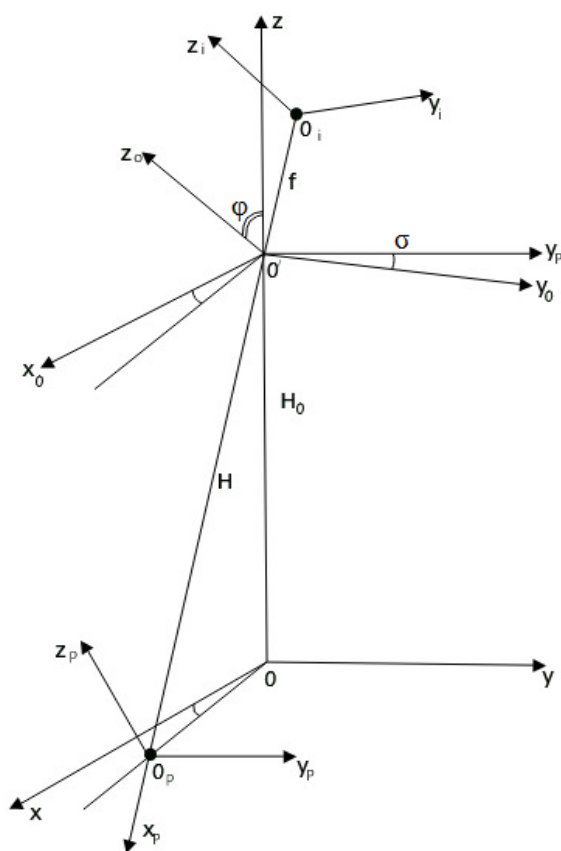


Рис. 1. Ориентация системы технического зрения

Fig. 1. Orientation of the vision system

Продифференцировав по времени последние два уравнения и выполнив преобразования относительно переменных $\dot{y}_i$, $\dot{z}_i$, получим:

$$\begin{aligned} \dot{y}_i &= -\frac{f}{x_p} \dot{y}_p + f \frac{y_p}{x_p^2} \dot{x}_p, \\ \dot{z}_i &= -\frac{f}{x_p} \dot{z}_p + f \frac{z_p}{x_p^2} \dot{x}_p. \end{aligned} \quad (6)$$

Произведя преобразование в уравнениях (7), можно получить:

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{H}{1 + \frac{1}{f} z_i \operatorname{ctg} \varphi}, \\ y_p &= -\frac{H \cdot y_i}{f \left(1 + \frac{1}{f} z_i \operatorname{ctg} \varphi \right)}, \\ z_p &= -\frac{H \cdot z_i}{f \left(1 + \frac{1}{f} z_i \operatorname{ctg} \varphi \right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Размер n -го выделенного объекта представлен в виде значений Δx_{p_n} , Δy_{p_n} , Δz_{p_n} , характеризующих размер ребер параллелепипеда, описанного вокруг выделенного объекта исходя из границ растрового изображения:

$$\begin{aligned} \langle x_{p_n}, y_{p_n}, z_{p_n}, \Delta x_{p_n}, \Delta y_{p_n}, \Delta z_{p_n} \rangle = \\ = M_{XYZ} (Q_n, x_i, y_i, z_i, \omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\langle x_{p_n}, y_{p_n}, z_{p_n} \rangle$ – координата геометрического центра n -го объекта.

При функционировании мобильной платформы экологического мониторинга маршрут следования и контрольные точки закладываются оператором на этапе подготовки полета, далее в процессе следования по маршруту в зоне видимости могут появиться очаги загрязнения, которые подлежат более подробному изучению путем облета такого

участка с определением координат, площади и вещества загрязнения. В таком случае строится адаптивный маршрут с посещением области загрязнения и возможности возврата на исходный маршрут. При построении такого маршрута необходимо учитывать кинематическую модель платформы и препятствия на пути следования.

Для построения оптимального маршрута автономной мобильной платформы экологического мониторинга с учетом обнаруженных очагов загрязнения и препятствий можно использовать различные кинематические модели. Рассмотрим решение построения оптимального маршрута для квадрокоптера (9):

$$\begin{cases} \dot{x} = v_c \cos \theta, \\ \dot{y} = v_c \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \omega, \\ \omega \in [-\Omega, \Omega], \end{cases} \quad (9)$$

где $x(t), y(t) \in R$, x, y – позиционные координаты; $\theta \in R$ – угол курса; ω – скорость изменения курсового угла во времени; v_c – постоянная скорость полета; Ω – константа.

В качестве модели формирования оптимального маршрута применим метод С-Л-С [18], тогда оптимальный маршрут длиной L запишем в виде

$$L = \|\widehat{AT_2}\| + \|\widehat{T_2T_3}\| + \|\widehat{T_3B}\|, \quad (10)$$

где A – начальная опорная точка; B – конечная опорная точка; T_2T_3 – касательная линия, соединяющая окружности, на которых лежат точки A и B .

Тогда производная длины пути L от угла α будет иметь вид

$$\frac{dL}{d\alpha} = -M = \left(\overrightarrow{O_1T_3} \cdot \frac{\overrightarrow{T_3T_2}}{\|\overrightarrow{T_3T_2}\|} \right) \hat{z}, \quad (11)$$

где $\hat{z}$ – единичный орт перпендикулярной плоскости O_{xy} .

Это выражение в закрытой форме необходимо для минимизации общей длины пути, а в случае обхода препятствия M можно рассматривать как плечо момента силы, действующей вдоль $\overrightarrow{T_3T_2}$ относительно точки O_1 , что является центром окружности, описывающей препятствие. Для достижения минимальной длины пути справедлива зависимость

$$\frac{dL}{d\alpha} = -M = 0. \quad (12)$$

Для определения адаптивного маршрута с учетом отклонения и (12) применим модифицированный алгоритм Литтла [19], тогда модель корректировки маршрута с учетом обнаруженных очагов загрязнения примет следующий вид:

$$\begin{aligned} < x_i, y_i \geq M_{map}(< X_i, Y_i >, \\ < x_{p_n}, y_{p_n}, z_{p_n}, \Delta x_{p_n}, \Delta y_{p_n}, \Delta z_{p_n} >), \end{aligned} \quad (13)$$

где $< x_i, y_i >$ – множество точек скорректированного маршрута для автономной мобильной платформы экологического мониторинга; $< X_i, Y_i >$ – множество точек исходного маршрута, заданного устройству в момент инициализации.

Разработанная математическая модель M_{PS} запишется в виде

$$\begin{aligned} M_{PS} = M_{map} \times \\ \times (M_{XYZ}(M_q(M_{fn}(M_{inp}(E(u, w), S)), M_{impl}))) \end{aligned} \quad (14)$$

и описывает процесс построения маршрута для автономной мобильной платформы экологического мониторинга с учетом выделенных на пути следования

объектов, характеризующих зону загрязнения с типом загрязняющего вещества.

Новизна разработанной математической модели заключается в поиске, обнаружении и определении координат участков локального загрязнения при экологическом мониторинге с учетом формы, площади и загрязняющего вещества, с возможностью формирования адаптивного оптимального маршрута следования к таким участкам на основе информации, полученной в различных спектральных диапазонах, от датчиков, функционирующих в различных спектральных диапазонах, с подвижной системы наблюдения. Повышение точности расчета расстояния до объекта и гео-

метрических параметров зоны загрязнения достигается за счет автоматической калибровки ДИ с использованием информации от лазерного дальномера.

Результаты и их обсуждение

Для оценки адекватности математической модели обработки мультиспектральных данных для мобильной платформы экологического мониторинга было проведено моделирование с исходными входными данными в виде изображений, полученных в видимом и В-, G-, R-, RE-, NIR-диапазонах с различным разрешением. Изображение, полученное в видимом диапазоне, представлено ниже (рис. 2).



Рис. 2. Изображение в видимом диапазоне

Fig. 2. Image in the visible range

Задачей обработки изображений являлось обнаружение локальных зон загрязнения окружающей среды строительным мусором, классификатор

выделяемых объектов N_N был обучен на трех классах, которые характеризуются признаками для бетона, картона и пластика (рис. 3).

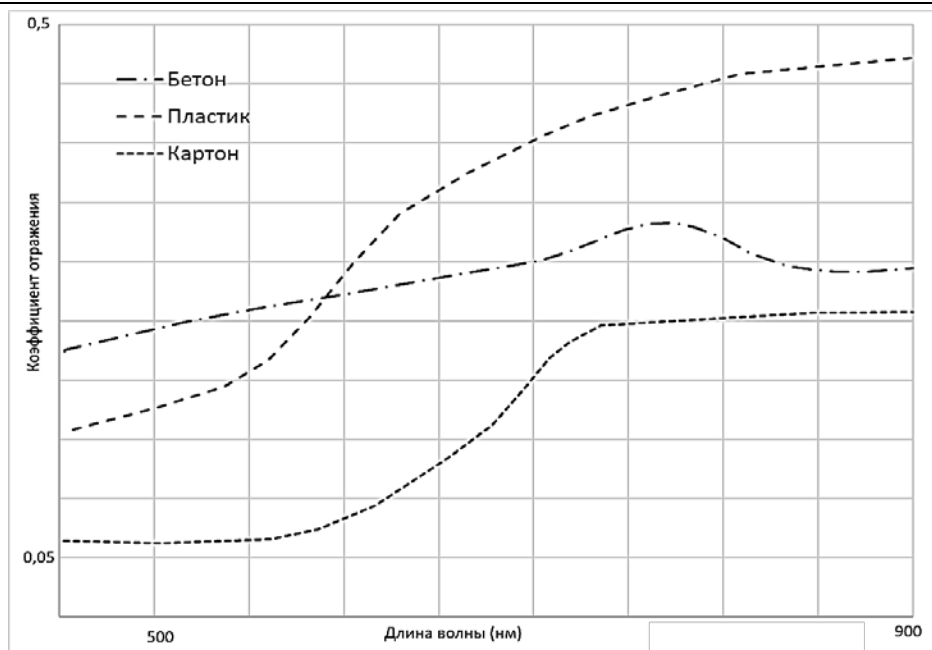


Рис. 3. Спектральные характеристики материалов

Fig. 3. Spectral characteristics of materials

Для выявления признаков используется классификация с обучением на основе мультииндексной классификации эталонных объектов по виду загрязняющих веществ. Для разделения объектов был предложен индекс на основе треугольных вегетационных индексов

ТИ-классификации. Треугольные индексы зелени разработаны под каналы спутниковых сканеров и определяют площадь треугольника, отражающего спектральные особенности хлорофилла А и каротиноидов, пример таких индексов приведен ниже (табл. 1).

Таблица 1. Треугольные вегетационные индексы ТИ [20]

Table 1. Triangular vegetation indices TI [20]

Наименование индекса Name of the index	Расчетная формула Calculation formula
TGI (Triangular Greenness Index)	$TGI = -0,5 \cdot [(660 - 480) \cdot (RED - GREEN) - (660 - 545) \cdot (RED - BLUE)]$
TRI (Triangular Red Index)	$TRI = -0,5 \cdot [(545 - 830) \cdot (GREEN - RED) - (545 - 660) \cdot (GREEN - NIR)]$
TRNI (Triangular Red Nir Index)	$TRNI = -0,5 \cdot [(830 - 660) \cdot (NIR - RED)]$

Для группы данных индексов был разработан поправочный шаблон, корректирующий диапазон длин волн с учетом классифицирующих веществ. Шаблон является универсальным решением и позволяет адаптировать параметры для

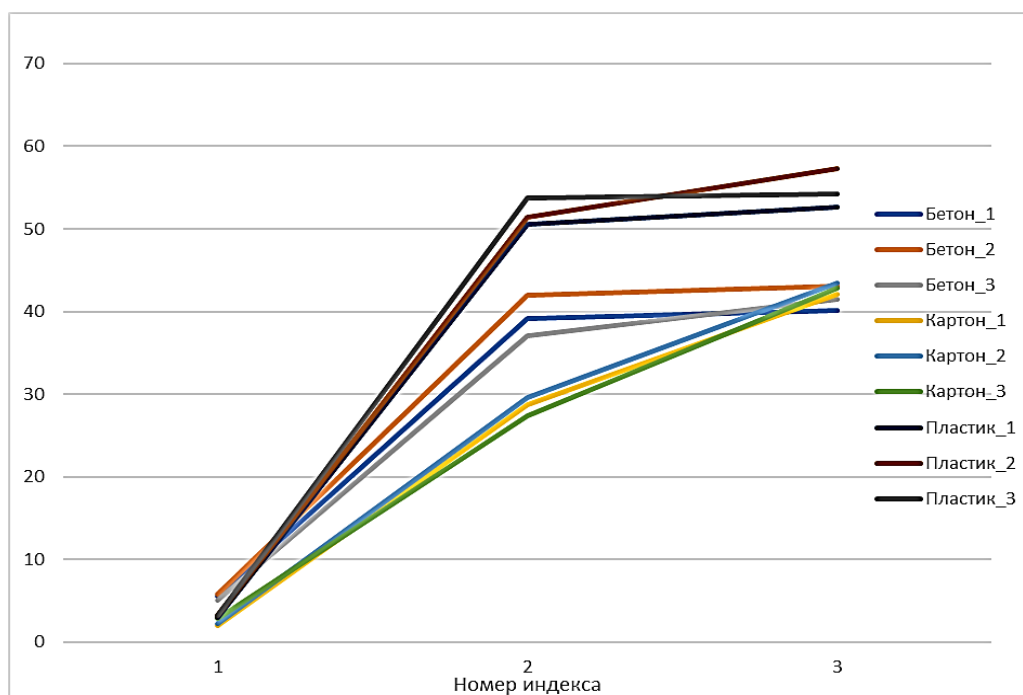
исследования различных веществ. В лабораторных условиях были проведены исследования предложенного классификатора на группе эталонных объектов. Рассмотрим результаты (табл. 2).

Таблица 2. Результаты исследования классификатора**Table 2.** Results of the classifier study

Наименование эталона Names objects	Индексы с учетом поправочного шаблона Indexes based on the correction pattern		
	1	2	3
Бетон_1	5,506	39,142	40,157
Бетон_2	5,809	42,021	43,122
Бетон_3	5,105	37,115	41,459
Картон_1	2,018	28,738	42,101
Картон_2	2,215	29,626	43,487
Картон_3	2,803	27,386	42,786
Пластик_1	3,015	50,583	52,641
Пластик_2	3,173	51,452	57,357
Пластик_3	3,254	53,725	54,267

В результате эксперимента по разделению категорий объектов, основанного на определенном типе классификации с обучением на основе групповой мультииндексной обработки спектров эталонов, получены результаты, которые

подтверждают возможность классификации с вероятностью 0,87–0,92. Разброс значений вероятности обусловлен составом анализируемых веществ (рис. 4). Данный подход позволил повысить точность классификации в 1,3 раза.

**Рис. 4.** Результаты исследования классификатора на эталонных объектах**Fig. 4.** Results of the classifier study on reference objects

Также в рамках экспериментальных исследований был проведен анализ точности выделения и классификации объектов по изображениям в видимом диапазоне и с использованием мультиспектральных изображений. При обработке изображе-

ния, представленного на рисунке 2, в видимом диапазоне проводилась оценка зависимости количества выделяемых объектов от разрешения изображения, результат выделения объектов на изображении с разрешением 1920×1080 приведен ниже (рис. 5).

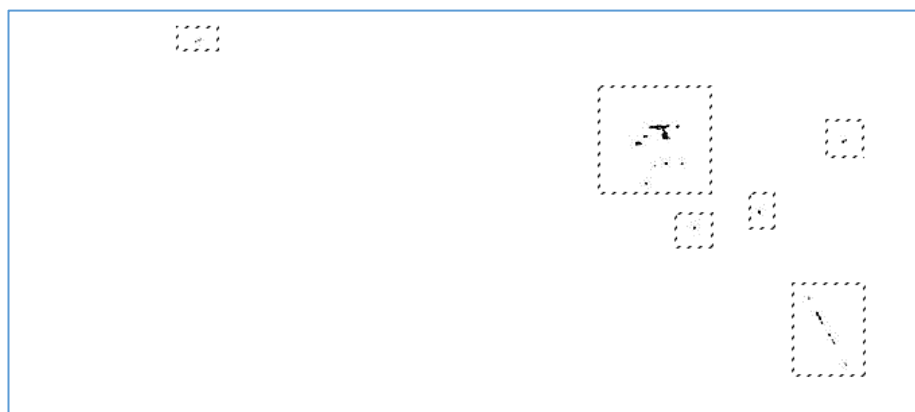


Рис. 5. Выделение объектов на изображении в видимом диапазоне

Fig. 5. Selection objects in the image in the visible range

Было выделено 6 групп объектов, классификацию которых выполнить не удалось. Из шести объектов при детальном изучении четыре объекта оказались ложными, характеризующими ланд-

шафт и тени. На следующем этапе эксперимента осуществлялся анализ той же сцены только в различных диапазонах и с разрешением 512×512 , результат которого представлен ниже (рис. 6).

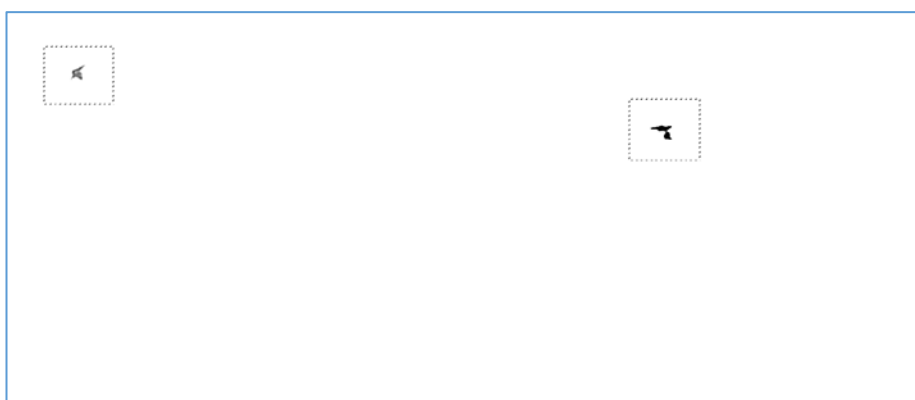


Рис. 6. Выделение объектов по изображениям в различных спектральных диапазонах

Fig. 6. Selection objects from images in different spectral ranges

Поиск осуществлялся для трех классов объектов бетона, картона и пластика. В итоге было обнаружено два объекта,

классифицированных как пластик (рис. 7, а) и бетон (рис. 7, б).



Рис. 7. Изображение объекта: а – пластик, б – бетон

Fig. 7. Image of the object: a – plastic, b – concrete

Изображения выделенных объектов позволили оценить их геометрические размеры с погрешностью 0,07 м с рабочей высоты БПЛА 53 м, площадь второго объекта составила 6,41 м². Эксперимент по оценке производительности

проводился на ЭВМ Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v4, 32Gb DDR4, SSD NVME в среде разработки Clion с использованием Profiler, результаты представлены ниже (табл. 3).

Таблица 3. Результат эксперимента

Table 3. The result of the experiment

Эксперимент Experiment	Время исполнения, с Time, sec.	Объем памяти, Мб RAM, Mb
Видимы диапазон	3,2	18,6
Мультиспектральный диапазон	1,1	1,4

Выводы

Мультиспектральные датчики изображения в последнее время широко применяются для контролирования качества сельскохозяйственных культур. При решении такой задачи изначально известно нахождение исследуемой обла-

сти, например поля. Маршрут закладывается оператором на этапе подготовки, а оценка результатов производится позже в центре обработки данных. Процесс анализа окружающей среды иногда проходит в условиях неопределенности маршрута, так как изначально могут быть неизвестны зоны загрязнения.

В результате работы разработана математическая модель обработки мультиспектральных данных для мобильной платформы экологического мониторинга, обосновано применение мультиспектральных датчиков для исследования объектов, представляющих опасность окружающей среде. Предложено использовать метод классификации с обучением на основе мультииндексной классификации эталонных объектов по виду загрязняющих веществ с поправочным шаблоном. Для получения достоверного результата разработан метод автоматической калибровки мультиспектрального датчика. Для реализации режима автоматического поиска локальных областей загрязнения окружающей

среды разработана частная математическая модель корректировки маршрута с учетом обнаруженных очагов загрязнения, позволяющая автоматически отклоняться от заданного маршрута для исследования обнаруженных целевых объектов, и возвратом на исходный маршрут.

В рамках экспериментальных исследований проведено моделирование с целью оценки точности и быстродействия предложенных решений, подтверждена адекватность математической модели.

Разработанная математическая модель может использоваться при разработке методов, алгоритмов и мультиспектральных устройств для автономных мобильных платформ.

Список литературы

1. Состояние земельных, почвенных и водных ресурсов. URL: <https://www.fao.org/3/cb7654ru/online/src/html/chapter-1-5.html> (дата обращения: 12.03.2023).
2. Remote sensing-based water quality assessment for urban rivers: A study in linyi development area / S. Miao, C. Liu, B. Qian, Q. Miao // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. N 27. P. 34586–34595.
3. Assessment of some water quality parameters in the Red River downstream, Vietnam by combining field monitoring and remote sensing method / T. T. Tham, T. L. Hung, T. T. Thuy, V. T. Mai, L. T. Trinh, C. V. Hai, T. B. Minh // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. N 29. P. 41992–42004.
4. Extraction of Urban Water Bodies from High-Resolution Remote-Sensing Imagery Using Deep Learning / Y. Chen, R. Fan, X. Yang, J. Wang, A. Latif // *Water*. 2018. N 10. P. 585.
5. He Y., Jin S., Shang W. Water quality variability and related factors along the yangtze river using landsat-8 // *Remote Sensing*. 2021. N 13(12). P. 2241.
6. El Din E. S. Enhancing the accuracy of retrieving quantities of turbidity and total suspended solids using Landsat-8-based-principal component analysis technique // *Spatial Science*. 2019. N 66(3). P. 1–20.
7. Nutrient estimation by HJ-1 satellite imagery of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir China / Y. Huang, D. Fan, D. Liu, L. Song, D. Ji, E. Hui // *Environmental Earth Sciences*. 2016. N 75(8). P. 633.

8. Спесвакова С. В. Мультиспектральный датчик изображения для автономного устройства экологического мониторинга // Юность и знания – гарантия успеха: сборник научных трудов VII Международной молодежной научной конференции: в 3 т. / под ред. А. А. Горохова. Курск: Университетская книга, 2020. С. 352–356.
9. Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов / С. А. Филист, Р. А. Томакова, Н. Г. Нефедов, Е. И. Пузырев, И. Н. Горбачев // Известия ЮгоЗападного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 64–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-64-85>.
10. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing 3rd ed. San Diego, USA: Academic Press, 2007. 560 p.
11. Potential Applications of the Sentinel-2 Multispectral Sensor and the ENMAP hyperspectral Sensor in Mineral Exploration / C. Mielke, N. K. Boshce, C. Rogass, K. Segl, C. Gauert, H. Kaufmann // EARSel eProceedings. 2014. N 13(2). P. 93–102.
12. Multispectral demosaicking algorithm based on inter-channel correlation / J. Mizutani, S. Ogawa, K. Shinoda, M. Hasegawa, S. Kato // Proceedings of the 2014 IEEE Visual Communications and Image Processing Conference. Valletta, Malta: IEEE, 2014. P. 474–477.
13. Формирование пространства признаков для задач классификации сложных структурированных изображений на основе спектральных окон и структур нейронных сетей / С. А. Филист, К. Д. Али Кассим, А. А. Кузьмин, О. В. Шаталова, Е. А. Алябьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 4 (67). С. 56–68.
14. Vignolo A., Pochettino A., Cicerone D. Water quality assessment using remote sensing techniques: Medrano Creek, Argentina // Journal of Environmental Management. 2006. N 81. P. 429–433.
15. Чернецкая И. Е., Спесвакова С. В. Мультиспектральное оптико-электронное устройство для автономной мобильной платформы экологического мониторинга // Труды МАИ. 2020. № 114. С. 13.
16. Курдюмова Т. И., Григорьева А. Л. Математическая модель связи лазерного дальномера с типом лазерного излучения // Постулат. 2018. № 41(30). С. 46.
17. Спесвакова С. В., Чернецкая И. Е. Классификация объектов изображения сверточной нейронной сетью на основе диффузной отражательной способности материалов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений: материалы XVI Международной научно-технической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2021. С. 230–232.
18. Спесвакова С. В. Построение маршрута мобильного робота на основе анализа мультиспектральных данных // Интеллектуальные и информационные системы. Интеллект – 2019: сборник трудов конференции / Тульский государственный университет. Тула, 2019. С. 334–337.
19. An algorithm for the traveling salesman problem / J. D. C. Little [et al.] // Operations research. 1963. Vol. 11, no. 6. P. 972–989.

20. Фисенко Е. В. Анализ результатов использования методики мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. № 3. С. 324–332.

References

1. Sostoyanie zemel'nykh, pochvennykh i vodnykh resursov [State of land, soil and water resources]. Available at: <https://www.fao.org/3/cb7654ru/online/src/html/chapter-1-5.html>. (accessed 12.03.2023)

2. Miao S., Liu C., Qian B., Miao Q. Remote sensing-based water quality assessment for urban rivers: A study in linyi development area // Environmental Science and Pollution Research, 2020, no. 27, pp. 34586–34595.

3. Tham T. T., Hung T. L., Thuy T. T., Mai V. T., Trinh L. T., Hai C. V., Minh T. B. Assessment of some water quality parameters in the Red River downstream, Vietnam by combining field monitoring and remote sensing method. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, no. 29, pp. 41992–42004.

4. Chen Y., Fan R., Yang X., Wang J., Latif A. Extraction of Urban Water Bodies from High-Resolution Remote-Sensing Imagery Using Deep Learning. *Water*, 2018, no. 10, p. 585.

5. He Y., Jin S., Shang W. Water quality variability and related factors along the yangtze river using landsat-8. *Remote Sensing*, 2021, no. 13(12), p. 2241.

6. El Din E. S. Enhancing the accuracy of retrieving quantities of turbidity and total suspended solids using Landsat-8-based-principal component analysis technique. *Spatial Science*, 2019, no. 66(3), pp. 1–20.

7. Huang Y., Fan D., Liu D., Song L., Ji D., Hui E. Nutrient estimation by HJ-1 satellite imagery of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, no. 75(8), pp. 633.

8. Spevakova S. V. [Multispectral image sensor for an autonomous environmental monitoring device]. *Yunost' i znaniya – garantiya uspekha. Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Youth and knowledge – a guarantee of success: collection of scientific papers of the VII International Youth Scientific Conference]; ed. by A. A. Gorokhov. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2020, pp. 352–356. (In Russ.)

9. Filist S. A., Tomakova R. A., Nefedov N. G., Puzyrev E. I., Gorbachev I. N. Intel'ktual'naya sistema obrabotki izobrazhenii, poluchaemykh s bespilot-nykh letatel'nykh apparatov [Intelligent image processing system obtained from unmanned aerial vehicles]. *Izvestiya YugoZapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments*

Engineering, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 64–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-64-85>.

10. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image processing. 3rd ed. San Diego, USA, Academic Press Publ., 2007. 560 p.

11. Mielke C., Boshce N. K., Rogass C., Segl K., Gauert C., Kaufmann H. Potential Applications of the Sentinel-2 Multispectral Sensor and the ENMAP hyperspectral Sensor in Mineral Exploration. *EARSeL eProceedings*, 2014, no. 13(2), pp. 93–102.

12. Mizutani J., Ogawa S., Shinoda K., Hasegawa M., Kato S. Multispectral demosaicking algorithm based on inter-channel correlation. Proceedings of the 2014 IEEE Visual Communications and Image Processing Conference. Valletta, Malta, IEEE Publ., 2014, pp. 474–477.

13. Filist S. A., Ali Kassim K. D., Kuzmin A. A., Shatalova O. V., Alyabyev E. A. Formirovanie prostranstva priznakov dlya zadach klassifikatsii slozhnykh strukturirovannykh izobrazhenii na osnove spektral'nykh okon i struktur neironnykh setei [Formation of a feature space for classification problems of complex structured images based on spectral windows and neural network structures]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 4 (67), pp. 56–68.

14. Vignolo A., Pochettino A., Cicerone D. Water quality assessment using remote sensing techniques: Medrano Creek, Argentina. *Journal of Environmental Management*, 2006, no. 81, pp. 429–433.

15. Chernetskaya I. E., Spevakova S. V. Mul'tispektral'noe optiko-elektronnoe ustroystvo dlya avtonomnoi mobil'noi platformy ekologicheskogo monitoringa [Multispectral optoelectronic device for an autonomous mobile environmental monitoring platform]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2020, no. 114, p. 13.

16. Kurdyumova T. I., Grigorieva A. L. Matematicheskaya model' svyazi lazernogo dal'nomera s tipom lazernogo izlucheniya [Mathematical model of the connection of a laser rangefinder with a type of laser radiation]. *Postulat = Postulate*, 2018, no. 41(30), p. 46.

17. Spevakova S. V., Chernetskaya I. E. [Classification of image objects by convolutional neural network based on diffuse reflectivity of materials]. *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov i obrabotki izobrazhenii. Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Optoelectronic devices and devices in image recognition and image processing systems. Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 230–232. (In Russ.)

18. Spevakova S. V. [Constructing the route of a mobile robot based on the analysis of multispectral data]. *Intellektual'nye i informatsionnye sistemy. Intellekt – 2019. Sbornik trudov konferentsii* [Intelligent and information systems. Intellect – 2019. Proceedings of the conference]. Tula, Tula State University Publ., 2019, pp. 334–337. (In Russ.)

19. Little J. D. C., eds. An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 1963, vol. 11, no. 6, pp. 972–989.

20. Fisenko E. V. Analiz rezul'tatov ispol'zovaniya metodiki mul'tiindeksnoi obrabotki spektral'nykh izobrazhenii podstilayushchei poverkhnosti po kompleksnym dannym distantsionnogo zondirovaniya [Analysis of the results of using the technique of multi-index processing of spectral images of the underlying surface based on complex remote sensing data]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka = Proceedings of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*, 2019, no. 3, С. 324–332.

Информация об авторах / Information about the Authors

Спевакова Светлана Викторовна, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sspev@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-1271-1275

Svetlana V. Spevakova, Post-Graduate
Student, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: sspev@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-1271-1275

Спеваков Александр Геннадьевич, кандидат
технических наук, доцент, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: aspev@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-3940-9607

Alexander G. Spevakov, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: aspev@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-3940-9607

Чернецкая Ирина Евгеньевна, доктор
технических наук, доцент, заведующий кафедрой
вычислительной техники, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: white731@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-8254-9606

Irina E. Chernetskaya, Dr. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Head
of the Department of Computer Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: white731@yandex.ru,
ORCHID: 0009-0009-8254-9606