

## ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 004.93

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ПО ИХ СПЕКТРАМ ОТРАЖЕНИЯ

© С. М. Борзов, Е. С. Нежевенко, С. И. Орлов,  
О. И. Потатуркин, С. Б. Узилов

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: borzov@iae.nsk.su, potaturkin@iae.nsk.su*

Статья посвящена экспериментальному изучению эффективности методов классификации зелёной растительности и маскировочных материалов по их спектральным признакам. Исследования выполнены с использованием реальных спектральных данных, полученных на многоканальном спектрографе на основе диспергирующего элемента и многоэлементной ПЗС-линейки в видимом и ближнем ИК-диапазонах длин волн.

Предложена методика обработки совокупности спектральных данных с целью формирования представительной системы признаков и последующего применения адаптивных пороговых алгоритмов обнаружения объектов интереса. Исследована эффективность применения в качестве признаков для классификации типов материалов вегетационных индексов, рассчитанных для спектральных каналов при различной их ширине и при разном положении центральной длины волны. Особое внимание уделено различению свежей и подвергшейся антропогенному воздействию растительности. Экспериментально показано, что в качестве информативных признаков при классификации объектов могут быть использованы как двухканальные, так и трёхканальные индексы.

*Ключевые слова:* обнаружение объектов, спектры отражения, спектральные каналы, вегетационные индексы, методы и алгоритмы классификации, обработка изображений.

DOI: 10.15372/AUT20240508

EDN: BMDQDP

**Введение.** В настоящее время одним из важнейших инструментов исследования природных и природно-техногенных процессов и явлений на поверхности Земли является дистанционное зондирование [1]. В значительной степени это обусловлено появлением новых технических средств получения, передачи, хранения и обработки больших массивов данных. В частности, при решении практических задач всё чаще используются гиперспектральные (ГС) спутниковые и авиационные изображения [2–4], отличительными особенностями которых являются узкая ширина и большое количество спектральных каналов. Такие изображения потенциально обладают значительно большими возможностями при обнаружении и распознавании различных объектов, однако, требуют разработки специализированных технологий обработки данных [5].

Отличительная особенность ГС-данных — узкая ширина спектральных полос и большое количество регистрируемых каналов. На основании этого разработаны многочисленные подходы, реализующие анализ тонкой структуры спектров пикселей изображений и их классификацию путём сравнения с эталонными спектральными кривыми, которые характеризуют связь между значениями коэффициентов отражения и длиной волны [6].

На практике для обработки гиперспектральной информации чаще всего применяются эмпирические методы, направленные на уменьшение объёма входных данных. К ним

в первую очередь относится использование так называемых вегетационных индексов — показателей, рассчитываемых в результате операций с различными спектральными диапазонами для определения параметров конкретного пикселя изображения [7, 8]. Расчёт подобных количественных показателей обеспечивает возможность последующего применения адаптивных пороговых алгоритмов обнаружения объектов интереса, реализуемых полевой аппаратурой наблюдения с ограниченными вычислительными ресурсами.

Так, в [9] продемонстрированы возможности алгоритма обнаружения замаскированных объектов на фоне зелёной растительности на базе наиболее распространённых индексов — NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и TCHVI (Three-Channel Vegetation Index). Исследования выполнены с применением видеоспектральной аппаратуры для обнаружения объектов на подстилающей поверхности «Фрегат». Последующая обработка гиперспектральной информации произведена с применением математической модели системы распознавания образов. В качестве инструмента определения различий объектов предложено использовать критерий Неймана — Пирсона. Проведён анализ спектральных характеристик маскировочного покрытия летнего типа (производства Германии). Показана применимость вегетационных индексов при его обнаружении на фоне зелёной растительности.

Целью данной работы является исследование спектральных характеристик природных и антропогенных объектов, определение наиболее информативных спектральных каналов при формировании признаков на основе расчёта вегетационных индексов и их использование для выделения маскировочных материалов на фоне зелёной растительности. Отметим, что маскировка объектов на местности осуществляется, как правило, с помощью средств на основе тканевых материалов однотонной или камуфляжной защитной расцветки. Такая расцветка является одним из видов защиты, применяемых в целях затруднения распознавания различных объектов визуальным способом и с помощью оптико-электронных или фотографических средств наблюдения. Однотонная расцветка подбирается таким образом, чтобы её спектр отражения с максимально возможной точностью соответствовал спектру отражения окружающей растительности. Камуфляжная расцветка представляет собой многоцветную (чаще всего двух-, трёх- и четырёхцветную) крупно- либо мелкопятнистую окраску, искажающую контуры объекта вследствие слияния цвета и форм отдельных пятен и полос окраски с окружающим фоном.

**Регистрация экспериментальных данных.** Исследования спектральных коэффициентов объектов выполнены с применением спектрометра «Колибри-2» [10], созданного по оптической схеме Черни — Тернера [11] с использованием в качестве диспергирующего элемента плоской дифракционной решётки и в качестве приёмника излучения линейки фотодиодов. Оптическая схема и конструкция спектрометра «Колибри-2» оптимизированы для получения спектра высокого качества с низким уровнем фонового излучения в любой из областей, лежащих в спектральном интервале 190–1100 нм. Выбор рабочей области осуществляется путём смены и поворота дифракционных решёток. Герметичный корпус спектрометра наполнен инертным газом. Излучение вводится в спектрометр с помощью кварцевого конденсора или волоконно-оптического кабеля. Оптическая схема спектрометра обладает минимальными абберациями для получения наименьшей ширины и наибольшей интенсивности спектральных линий. Схема стенда для проведения экспериментальных исследований представлена на рис. 1.

На первом этапе в позицию объекта исследования помещался эталонный объект (лист белой бумаги). Он освещается широкополосным источником излучения, отражённый свет собирается проекционным объективом на входную щель спектрометра. Спектрометр осуществляет регистрацию и передачу в компьютер спектра излучения источника  $S_0$  в диапазоне длин волн 400–900 нм. Затем в позицию объекта исследования помещается исследуемый объект, после чего спектр отражённого от него излучения  $S$  регистрируется и также



Рис. 1. Схема исследований спектральных характеристик фильтров

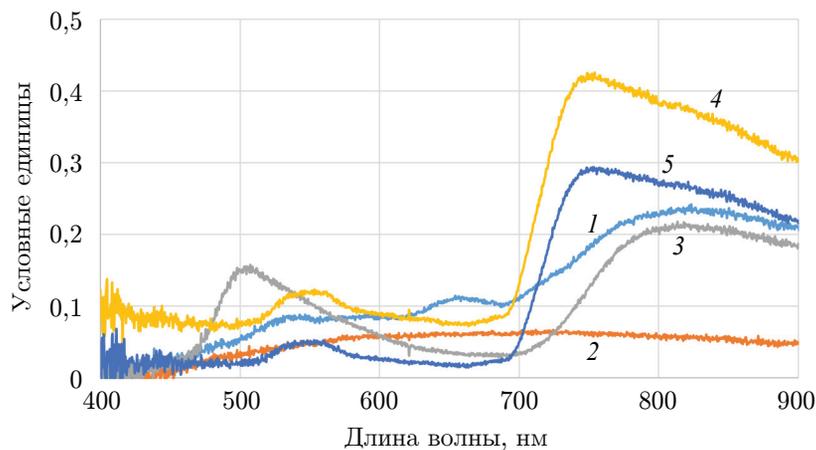


Рис. 2. Спектры отражения исследуемых объектов. Обозначения: кривая 1 — камуфляж светлый; кривая 2 — камуфляж темный; кривая 3 — зеленая ткань; кривая 4 — лист свежий; кривая 5 — лист срезанный

передается в компьютер, где выполняется калибровка спектра отражения исследуемого объекта путём расчёта отношения спектров  $S/S_0$ .

Экспериментальные исследования проводились для пяти объектов: маскировочных материалов (ткань камуфлированной расцветки со светлыми 1 и тёмными 2 зонами, ткань зелёного цвета 3) и зелёной растительности (листья свежие 4 и срезанные 5 несколькими днями ранее). Для каждого из них определены спектры отражения, на основе которых сформированы коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) в 20 различных пространственных точках. На рис. 2 приведены примеры полученных спектров.

**Классификация объектов по вегетационным индексам при различных способах усреднения данных спектральных каналов.** В качестве признаков для классификации объектов по их спектральным характеристикам использовались вегетационные индексы NDVI и TCHVI:

$$\text{NDVI} = \frac{r_{nir} - r_{red}}{r_{nir} + r_{red}}, \quad \text{TCHVI} = \frac{(r_{red} - r_{gr}) - (r_{nir} - r_{red})}{(r_{red} - r_{gr}) + (r_{nir} - r_{red})},$$

где  $r_{gr}$  — усреднённое значение КСЯ в зелёной области спектра (540–580 нм);  $r_{red}$  — усреднённое значение КСЯ в красной области спектра (640–680 нм);  $r_{nir}$  — усреднённое значение КСЯ в ближней инфракрасной области спектра (700–800 нм).

Усреднение КСЯ производилось:

— по вышеуказанным спектральным интервалам с весовой функцией, описываемой формулой Эйри [12, 13], с минимальным значением на границах интервалов 0,05 от максимального (имитировалось считывание спектральных показателей  $r_{gr}$ ,  $r_{red}$ ,  $r_{nir}$  физическим интерференционным фильтром);

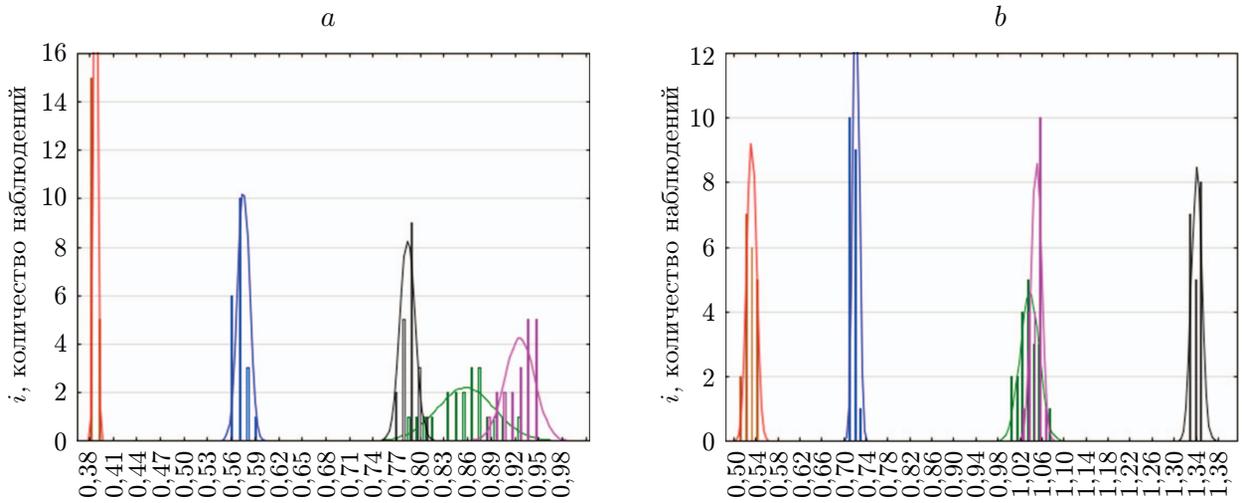


Рис. 3. Гистограмма вегетационных индексов NDVI (a) и TCHVI (b) при усреднении КСЯ с весовой функцией Эйри шириной 40 нм в зелёно-красной области спектра. Красным цветом обозначен камуфляж тёмный, синим — камуфляж светлый, чёрным — зелёная ткань, зелёным — свежий лист, сиреневым — сре-занный лист

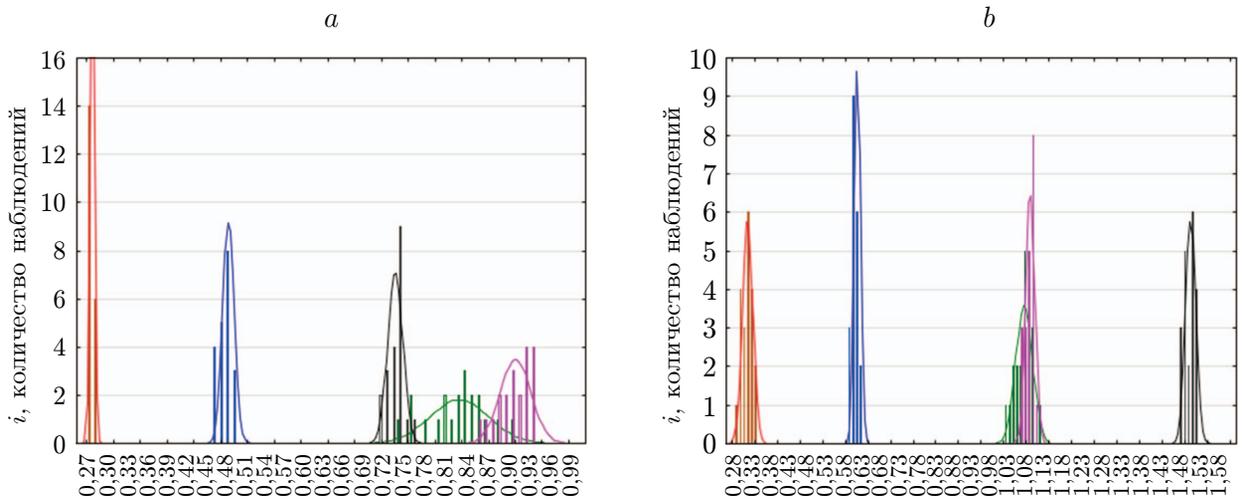


Рис. 4. Гистограмма вегетационных индексов NDVI (a) и TCHVI (b) при усреднении КСЯ с весовой функцией Эйри шириной 10 нм в зелёно-красной области спектра (обозначение цвета, как на рис. 3)

Таблица 1

**Итоги классификации (матрица ошибок)  
по NDVI с усреднением КСЯ с весовой  
функцией Эйри шириной 40 нм**

Классы установленные	Классы истинные				
	1	2	3	4	5
1 (камуфляж светлый)	20	0	0	0	0
2 (камуфляж тёмный)	0	20	0	0	0
3 (лист свежий)	0	0	14	1	0
4 (лист срезанный)	0	0	3	19	0
5 (ткань зелёная)	0	0	3	0	20

Таблица 2

**Итоги классификации  
по ТСНVI с усреднением КСЯ с весовой  
функцией Эйри шириной 40 нм**

Классы установленные	Классы истинные				
	1	2	3	4	5
1 (камуфляж светлый)	20	0	0	0	0
2 (камуфляж тёмный)	0	20	0	0	0
3 (лист свежий)	0	0	13	5	0
4 (лист срезанный)	0	0	7	15	0
5 (ткань зелёная)	0	0	0	0	20

— по интервалам, суженным в четыре раза, т. е. имитировалась фильтрация узкополосными фильтрами с шириной полосы пропускания для зелёной и красной областей спектра 10 нм, для ближней ИК — 25 нм.

Для обоих вариантов усреднения сформированы гистограммы распределения вегетационных индексов каждого класса, где по оси  $x$  отложены значения вегетационного индекса, а по оси  $y$  — количество реализаций, имеющих соответствующее значение (рис. 3, 4). Кроме того, на гистограммах выполнена и показана аппроксимация каждого класса нормальным распределением.

Видно, что ширина весовой функции при разделении выбранных объектов по классам принципиального значения не имеет. Индекс ТСНVI лучше отделяет листья зелёной растительности от маскировочных материалов. Распределения значений индекса ТСНVI для камуфляжа, зелёной ткани и зелёной растительности не перекрываются и обеспечивают уверенное разделение объектов. Распределения значений индекса NDVI имеют некоторую зону перекрытия для растительности и зелёной ткани. Распределения же обоих указанных индексов для свежей и срезанной растительности в определённой степени перекрываются, причём такое перекрытие для индекса ТСНVI существенно больше.

Усреднение КСЯ производилось также по вышеуказанным спектральным интервалам с прямоугольной весовой функцией, после чего формировались гистограммы распределения вегетационных индексов каждого класса. Полученные экспериментальные результаты идентичны приведённым на рис. 3, 4. Видно, что как форма весовой функции, так и её ширина, при разделении выбранных объектов по классам принципиального значения не имеют.

Для количественной оценки качества разделения классов с использованием исследуемых вегетационных индексов выполнена классификация 100 полученных реализаций спектров (20 реализаций каждого из 5 классов) с помощью нейронной сети и рассчитаны соответствующие матрицы ошибок (табл. 1, 2).

Сравним ошибки классификации по двум индексам. Индекс ТСНVI даёт больше ошибок (12), чем NDVI (7), но эти ошибки качественно различаются. Индекс NDVI всего в четырёх случаях не различает листья свежий и срезанный, но в трёх случаях классифицирует зелёный лист как зелёную ткань. Зато ТСНVI в различении листа и ткани не ошибается: все 12 ошибок допущены при классификации листьев. Из этого следует, что для выделения маскировочных материалов на фоне зелёной растительности предпочтительно использовать вегетационный индекс ТСНVI.

**Классификация свежей и срезанной растительности по вегетационному индексу ТСНVI (при различных параметрах спектральных интервалов).** Наличие увядшей растительности в поле зрения в реальных полевых условиях является, как правило, одним из признаков применения в зоне наблюдения средств естественной маскиров-

Таблица 3

**Точность классификации зелёных листьев от положения  
и ширины спектральных интервалов**

$\lambda_{red}$ , нм	$\lambda_{gr}$ , нм				
	490	510	530	550	570
$\Delta = 10$ нм					
650	0,825/0,825	0,650/0,5	0,85/0,85	0,925/0,9	0,95/0,925
670	0,775/0,725	0,750/0,5	0,825/0,8	0,925/0,9	0,95/0,9
690	0,975/0,95	0,925/0,85	0,7/0,5	0,8/0,825	0,8/0,8
710	0,975/0,95	0,975/0,95	1,0/1,0	1/0,975	0,975/0,975
$\Delta = 20$ нм					
650	0,8/0,8	0,6/0,5	0,85/0,825	0,925/0,9	0,925/0,925
670	0,725/0,725	0,625/0,5	0,825/0,825	0,925/0,875	0,925/0,925
690	0,975/0,95	1,0/0,95	0,625/0,5	0,75/0,7	0,775/0,65
710	0,975/0,95	0,975/0,95	1,0/0,975	1,0/0,975	0,975/0,975
$\Delta = 30$ нм					
650	0,8/0,825	0,65/0,5	0,85/0,8	0,9/0,875	0,925/0,9
670	0,75/0,75	0,525/0,5	0,825/0,825	0,925/0,875	0,925/0,9
690	1,0/0,975	1,0/1,0	0,625/0,5	0,725/0,5	0,6/0,5
710	0,975/0,975	0,975/0,95	1,0/1,0	1,0/0,975	1,0/0,975
$\Delta = 40$ нм					
650	0,775/0,775	0,65/0,5	0,825/0,775	0,925/0,875	0,925/0,9
670	0,7/0,75	0,675/0,5	0,8/0,8	0,9/0,875	0,925/0,925
690	1,0/0,975	1,0/1,0	0,775/0,7	0,6/0,5	0,6/0,5
710	0,975/0,975	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/0,975

ки антропогенных объектов (объектов техники и элементов инфраструктуры). Поэтому в первую очередь представляет интерес, насколько вегетационный индекс TSNVI позволяет разделить свежую и срезанную зелёную растительность. Для ответа на данный вопрос были вычислены матрицы ошибок классификации для различных вариаций параметров усреднения спектров (центральной длины волны и ширины весовой функции) и оценена доля верно классифицированных образцов для каждого сочетания (табл. 3).

Исследовано влияние изменения параметров весовой функции на эффективность классификации: центральной длины волны и ширины. Для этого рассчитывались вегетационные индексы TSNVI для зелёной области спектра при центральной длине волны  $\lambda_{gr} = 490, 510, 530, 550$  и  $570$  нм, красной области при  $\lambda_{red} = 650, 670, 690$  и  $710$  нм, инфракрасной области при  $\lambda_{nir} = 770$  нм и ширинах полос  $\delta\lambda = 10, 20, 30$  и  $40$  нм при всех возможных комбинациях этих параметров.

При составлении данных табл. 3 классификация выполнялась как с применением нейронных сетей, так и классическим методом опорных векторов. Данные представлены в формате «xxx/ууу», где xxx — точность классификации нейросетевым методом, ууу — точность классификации методом опорных векторов.

Первое, что обращает на себя внимание, — результаты для разной ширины весовой функции близкие, т. е. для объектов подобного типа уменьшать ширину пропускания фильтра нецелесообразно. Второе — имеют место значительные изменения эффективности классификации при небольших смещениях учитываемых спектральных интервалов. Так, при использовании интервалов с центральными длинами волн  $510$  и  $690$  нм (с шириной  $30$  нм) точность классификации составляет  $100\%$ , а изменение одного из интервалов

на 20 нм (510, 670 нм или 530, 690 нм) приводит к её резкому падению (до 52,5 и 62,5 % соответственно).

Следует также отметить высокую точность классификации при смещении применяемого интервала в зону перепада спектрального коэффициента отражения. Эффективность классификации нейросетевым методом и методом опорных векторов оказалась достаточно близкой, при этом несколько бóльшую точность демонстрируют методы на основе нейронных сетей.

**Заключение.** С использованием многоканального спектрографа на основе диспергирующего элемента и многоэлементной ПЗС-линейки видимого и ближнего спектральных ИК-диапазонов получены спектральные коэффициенты отражения зелёной растительности и маскировочных материалов высокого спектрального разрешения.

Выполнены исследования эффективности методов классификации типов поверхностей путём расчёта вегетационных индексов и последующего применения адаптивных пороговых алгоритмов обнаружения объектов интереса.

Исследована эффективность применения в качестве признаков классификации типов поверхности нормированных разностей спектральных каналов при различной их ширине и положении. Особое внимание уделено различению свежей и срезанной растительности. Показано, что эффективность методики мало зависит от ширины весовой функции при усреднении значений каналов. Для различных вариантов усреднения представлены гistogramмы вегетационных индексов для объектов каждого класса.

Обоснована целесообразность применения спектральных каналов с шириной полосы 30–40 нм. Её уменьшение значительного эффекта не даёт, приводя при этом к снижению уровня интегральных сигналов.

Сравнение эффективности классификации по индексам NDVI и TCHVI показало, что для выделения маскировочных материалов на фоне зелёной растительности предпочтительно использовать вегетационный индекс TCHVI.

Отмечены значительные изменения эффективности классификации при небольших смещениях полос каналов. Так, при использовании полос 510 и 690 нм (с шириной 30 нм) точность классификации составляет 100 %, а изменение одной из полос на 20 нм (510 и 670 нм или 530 и 690 нм) приводит к её резкому падению (до 52,5 и 62,5 % соответственно). Наиболее высокая точность классификации достигается при смещении полосы фильтра в зону перепада спектрального коэффициента отражения. При этом эффективность классификации нейросетевым методом и методом опорных векторов оказалась достаточно близкой. Несколько бóльшую точность демонстрируют методы на основе нейронных сетей.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по государственному заданию № 124041700103-1 в ИАиЭ СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сойфер В. А., Гашников М. В., Глузов Н. И. и др.** Перспективные информационные технологии дистанционного зондирования Земли. Самара: Новая техника, 2015. 255 с.
2. **Котляр П. Е., Потатуркин О. И.** Современные методы и системы формирования гиперспектральных изображений // Автометрия. 2024. **60**, № 3. С. 55–73. DOI: 10.15372/AUT20240306.
3. **Бондур В. Г.** Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.

4. **Доброленский Ю. С., Красавцев В. М., Кузнецов А. Ю., Чиков К. Н.** Применение внеосевого зеркального параболоида в качестве перспективного входного объектива озонометра // Сб. тез. Междунар. конгр. по Интеллектуальным системам и информационным технологиям. Таганрог, 2013. С. 352–357.
5. **Feng C., Ahmad A.** A Design and modeling of a compact imaging spectrometer // Opt. Eng. 1995. **34**, Iss. 11. P. 3217–3221.
6. **Борзов С. М., Потатуркин О. И.** Спектрально-пространственные методы классификации гиперспектральных изображений. Обзор // Автометрия. 2018. **54**, № 6. С. 64–86. DOI: 10.15372/AUT20180607.
7. **Макаров Е. О.** Обзор существующих вегетационных индексов при выполнении анализа земной поверхности // Современные научные исследования и инновации. 2023. № 6. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2023/06/100430> (дата обращения: 03.06.2024).
8. **Дубровская О. А., Гурова Т. А., Пестунов И. А.** Обнаружения болезней на посевах пшеницы по данным гиперспектральной съёмки // Сб. тр. Всеросс. Междунар. конф. «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019)». Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. С. 497–500.
9. **Кузнецов А. Ю., Сергеев С. С.** Анализ спектральных характеристик маскировочного покрытия с применением видеоспектрометра // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2016. **16**, № 2. С. 258–264.
10. **Лабусов В. А., Путьмаков А. Н., Саушкин М. С. и др.** Многоканальный спектрометр «Колибри-2» и его использование для одновременного определения щелочных и щелочноземельных металлов методом пламенной фотометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. **73**, № 5. С. 35–39.
11. **Пейсахсон И. В.** Оптика спектральных приборов. Изд. 2-е, доп. и перераб. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
12. **Федорюк М. В.** Эйри функции — частные решения Эйри уравнения // Математическая энциклопедия / Под ред. И. М. Виноградова. Т. 5. М.: Советская Энциклопедия, 1985. С. 939–941.
13. **Airy G. B.** On the Intensity of Light in the neighbourhood of a Caustic // Trans. Cambridge Philosophical Soc. 1838. **6**. P. 379–402.

*Поступила в редакцию 08.07.2024*

*После доработки 15.07.2024*

*Принята к публикации 24.07.2024*

---