

Р.М. Уалиева¹ , Т.А. Тухфатуллин^{2*} , Е.Л. Бойцова³ , М.М. Каверина¹ 

¹НАО «Торайғыров университет», Павлодар, Казахстан

²Алматинский филиал НИЯУ МИФИ, Алматы, Казахстан

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

*e-mail: tta@tpu.ru,

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Гиперспектральные технологии объединяют спектрофотометрические методы и методы формирования изображений, что позволяет исследовать спектральный состав излучения, исходящего от объекта. Данные технологии широко используются в различных областях науки и техники. В последние годы особенно активно гиперспектральная визуализация используется в агрономии для диагностики заболеваний растений и выявления биологических аномалий. Данная работа посвящена сравнительному анализу основных типов гиперспектральных камер: дисперсионных, интерферометрических, а также и фильтрующих. Анализируются их характеристики, а также физические принципы, лежащие в основе получения гиперспектральных изображений. Выбор оптимального типа гиперспектральной камеры зависит от конкретных требований приложения. Дисперсионные камеры характеризуются высокой скоростью регистрации и широким спектральным охватом, однако требуют массивных оптических компонентов и значительных затрат. Интерферометрические системы обладают высокой спектральной чувствительностью, но их применение ограничивается зависимостью от стабильности освещения. Фильтрующие камеры обеспечивают гибкость настройки и потенциальную компактность, однако могут иметь механические и спектральные ограничения, обусловленные характеристиками фильтра. В данной работе представлен обзор основных типов гиперспектральных камер, их ключевых характеристик и областей практического применения.

Ключевые слова: гиперспектральная камера, дисперсия, интерферометр, оптический фильтр

Р.М. Уалиева¹, Т.А. Тухфатуллин^{2*}, Е.Л. Бойцова³, М.М. Каверина¹

¹«Торайғыров университеті» КеАҚ, Павлодар, Қазақстан

²Ұлттық ядролық зерттеу университеті МИФИ Алматы қаласындағы филиалы, Алматы, Қазақстан

³Томск политехникалық ұлттық зерттеу университеті, Томск, Ресей

*e-mail: tta@tpu.ru

Гиперспектралды зондтаудың физикалық негіздері

Гиперспектрлік технологиялар спектрофотометриялық әдістердің және бейнелеудің әдістерін біріктіре отырып, нысаннан шығатын сәулеленудің спектрлік құрамын зерттеуге мүмкіндік береді. Бұл технологиялар ғылым мен техниканың әртурлі салаларында кеңінен қолданылады. Соңғы жылдары гиперспектралды визуализация әсіресе агрономияда өсімдік ауруларын диагностикалау және биологиялық аномалияларды анықтау үшін белсенді қолданылада. Бұл зерттеу гиперспектрлік камералардың негізгі түрлерін: дисперсиялық, интерферометриялық және сұзғілік камераларды салыстырмалы талдауға арналған. Олардың сипаттамалары және гиперспектрлік камералердің анықтау үшін жатқан физикалық принциптері талданады. Гиперспектрлік камераның оңтайлы түрін таңдау нақты қолдану талаптарына байланысты. Дисперсиялық камералер жоғары тіркеу жылдамдығымен және кең спектрлік ауқымымен ерекшеленсе де, ірі оптикалық компоненттер мен айтарлықтай шығындарды қажет етеді. Интерферометриялық жүйелер жоғары спектрлік сезімталдыққа ие, бірақ олардың қолданылуы жарықтандырудың

тұрақтылығына тәуелділікпен шектеледі. Сүзгілік камералар реттеу икемділігін және ықтимал компакттілікті қамтамасыз етсе де, сүзгінің сипаттамаларына байланысты механикалық және спектрлік шектеулерге ие болуы мүмкін. Гиперспектралды камералардың негізгі түрлеріне, олардың негізгі сипаттамалары мен практикалық қолданылу салаларына шолу жасалған.

Түйін сөздер: гиперспектрлік камера, дисперсия, интерферометр, оптикалық сүзгі.

R.M. Ualiyeva¹, T.A. Tukhfatullin^{2*}, E.L. Boytsova³, M.M. Kaverina¹

¹Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan

²Almaty Branch of NRNU MEPhI, Almaty, Kazakhstan

³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

*e-mail: tta@tpu.ru

Physical principles of hyperspectral sensing

Hyperspectral technologies combine spectrophotometric methods and imaging techniques, enabling the study of the spectral composition of radiation emitted by an object. These technologies are widely used in various fields of science and technology. In recent years, hyperspectral imaging has been particularly active in agronomy for diagnosing plant diseases and detecting biological anomalies. This work is devoted to a comparative analysis of the main types of hyperspectral cameras: dispersive, interferometric, and filter-based. Their characteristics and the physical principles underlying hyperspectral imaging are analysed. The choice of the optimal type of hyperspectral camera depends on specific application requirements. Dispersive cameras are characterized by high acquisition speed and broad spectral coverage but require bulky optical components and significant costs. Interferometric systems offer high spectral sensitivity, but their application is limited by dependence on lighting stability. Filter-based cameras provide flexibility in configuration and potential compactness but may have mechanical and spectral limitations due to filter characteristics. The overview of the main types of hyperspectral cameras, their key characteristics, and fields of practical application is presented.

Keywords: hyperspectral camera, dispersion, interferometer, optical filter.

Введение

Гиперспектральная визуализация (Hyperspectral Imaging, HSI) – это технология, объединяющая спектрофотометрические методы с возможностями формирования изображений. Такое устройство позволяет измерять спектральный состав излучения, исходящего от объекта исследования, и получать пространственно-спектральные данные высокой точности. В отличие от традиционных методов многоспектральной визуализации, HSI фиксирует информацию в сотнях узких спектральных диапазонов, что значительно расширяет возможности анализа материалов и объектов.

Благодаря высокой спектральной разрешающей способности гиперспектральная визуализация находит широкое применение в различных научных и прикладных областях:

- **Колориметрия** – измерение цветовых характеристик материалов [1].
- **Анализ исторических документов** – изучение рукописей, выявление скрытых

надписей и изменений в составе чернил [2].

- **Неинвазивное исследование живописи** – определение состава пигментов, выявление реставрационных вмешательств [3].
- **Тепловизионная визуализация** – анализ излучательной способности и температуры поверхности земли [4].
- **Исследование спектров излучения Земли и атмосферы** – мониторинг экологической ситуации с помощью спутников [5].
- **Картирование спектральной освещенности неба** – анализ ультрафиолетового солнечного излучения в диапазоне 380–760 нм [6].
- **Физиология растений** – характеристика спектральных особенностей излучения растений для диагностики их состояния [7].
- **Флуоресцентная микроскопия** – изучение биологических объектов [8].
- **Анализ продуктов питания** – контроль качества и обнаружение примесей [9].

В последние годы гиперспектральная визуализация активно используется в агрономии для диагностики заболеваний растений и выявления биологических аномалий. Исследования показывают её эффективность при раннем обнаружении фитопатогенных инфекций, таких как мучнистая роса [10], церкоспороз [11] и бактериальный ожог [12]. Кроме того, данный метод применяется для оценки стресса растений, вызванного нехваткой питательных веществ [13]. В то же время эффективность HSI определяется не только

областью применения, но и техническими характеристиками гиперспектральных камер, работа которых основана на различных физических принципах. Настоящая работа посвящена их рассмотрению, анализу преимуществ и недостатков, а также возможных областей применения. Это исследование поможет определить, какие типы камер наиболее эффективно решают конкретные задачи гиперспектрального зондирования.

Механизм гиперспектрального зондирования

Схема получения и обработки гиперспектральных изображений представлена на рис. 1 [14]. Отражённый от объекта свет поступает в объектив гиперспектральной камеры (рис. 1а), где формируется трёхмерный массив данных — так называемый «гиперспектральный куб» (рис. 1б), в котором двумерные изображения объекта записываются в дискретных диапазонах длин волн. Далее выполняется

спектральная нормализация данных с применением различных алгоритмов, после чего извлекаются ключевые признаки (рис. 1в) для уменьшения объёма и устранения избыточности информации. На завершающем этапе обработанные данные классифицируются с использованием методов машинного обучения или других подходов [15,16].

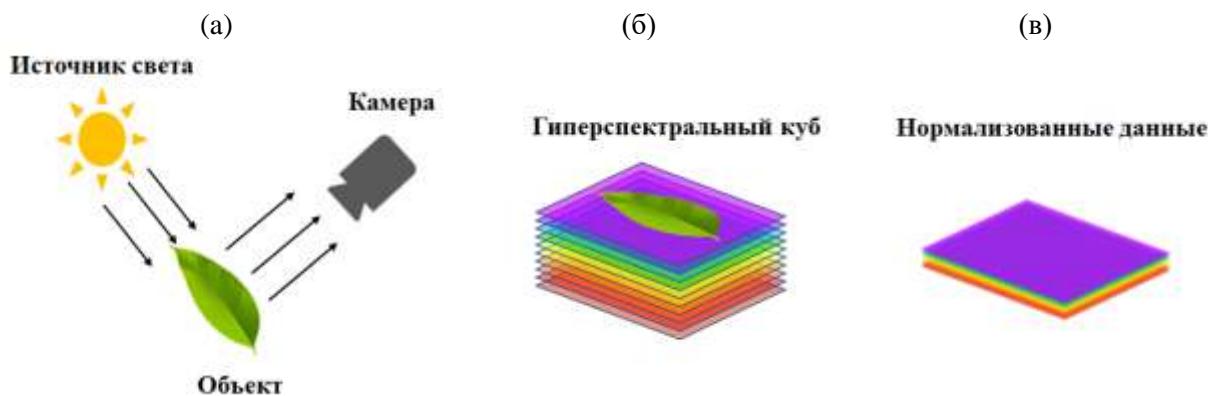


Рисунок 1 – Схема получения и обработки гиперспектральных изображений.

Гиперспектральные камеры обеспечивают получение изображений с высоким спектральным разрешением [17, 18], что позволяет выявлять даже минимальные изменения физиологического состояния растений. Формируемое ими многомерное пространство данных расширило возможности спектрального анализа, способствуя развитию новых методов обработки и интерпретации гиперспектральных изображений [19, 20].

Типы гиперспектральных камер и физические основы их работы

Технологии многоспектральной визуализации начали активно развиваться с 60-х годов XX века. Эти технологии позволяют получать пространственную информацию об объекте исследования одновременно в нескольких

спектральных диапазонах, а также комбинировать методы визуализации со спектральным анализом, используя оптические системы, основанные на различных физических принципах.

В настоящее время гиперспектральные камеры классифицируются по принципу разложения принимаемого излучения в спектр. Основные типы таких камер включают [19]:

- дисперсионные;
- интерферометрические;
- фильтрующие.

Дисперсионные гиперспектральные камеры

В дисперсионных гиперспектральных камерах для разложения спектра излучения используются дисперсионные элементы, такие как дифракционная решётка или призма [21, 22].

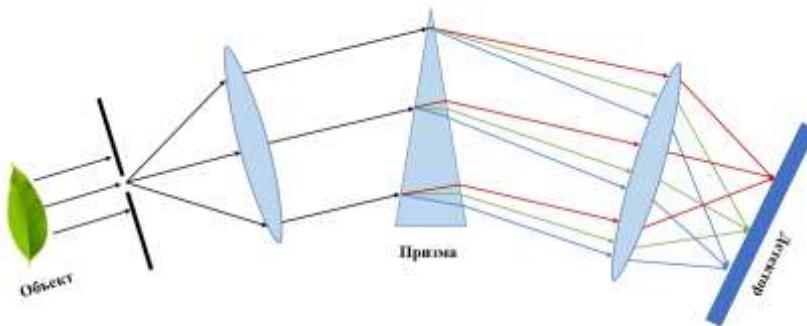


Рисунок 2 – Принципиальная схема дисперсионной гиперспектральной камеры.

Свет, отражённый от исследуемого объекта, проходит через оптическую систему, состоящую из нескольких линз, которые фокусируют пучок на дисперсионный элемент (рис. 2). Данный элемент разлагает излучение в спектр, который фиксируется детектором [23]. Одной из ключевых особенностей такого метода является то, что свет различных длин волн регистрируется одновременно, что позволяет получать изображение в один и тот же момент времени. Это преимущество делает дисперсионные камеры эффективными для спектрального сканирования объектов в реальном времени.

Растровые гиперспектральные камеры данного типа широко применяются, например, в агропромышленном секторе для оценки качества фруктов [24], а также в сфере переработки отходов, включая классификацию пластиковых материалов по их спектральным характеристикам. Спектральное разрешение таких камер определяется характеристиками дисперсионного элемента, в частности разрешающей способностью дифракционной решётки или призмы.

Интерферометрическая гиперспектральная камера

Интерферометрическая гиперспектральная камера работает на основе связи между интерферограммой и спектральным распределением интенсивности излучения. Сначала с помощью интерферометра регистрируется интерференционная картина, возникающая при наложении спектральных компонент. Затем, с помощью обратного преобразования Фурье, восстанавливается спектральное изображение объекта.

В таких системах обычно используется интерферометры Фабри–Перо, Майкельсона или их комбинации, настроенные на определённую длину волны. Пример схемы интерферометра приведён на рис. 3 [25]. Свет, отражённый от исследуемого объекта, проходит через линзу и поступает на полупрозрачное зеркало, которое

разделяет его на два пучка. Один из них отражается от неподвижного зеркала, другой — от подвижного. Изменяя положение подвижного зеркала, можно регулировать разность хода пучков, тем самым точно настраивая интерферометр на заданный спектральный диапазон.

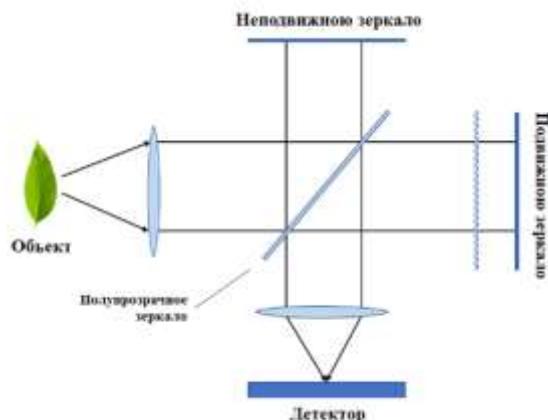


Рисунок 3 – Принципиальная схема интерферометрической гиперспектральной камеры.

Детектор фиксирует интерференционную картину. После её обработки с помощью Фурье-преобразования восстанавливается спектральная информация об объекте с высокой точностью. Подобные системы обеспечивают высокую спектральную разрешающую способность и находят применение в аэрокосмической съёмке и медицине [26].

Фильтрующие гиперспектральные камеры

Основное отличие гиперспектральных камер, основанных на использовании спектральных фильтров, заключается в следующем: перед детектором устанавливается фильтр, пропускающий излучение в заданном диапазоне длин волн, что позволяет детектору регистрировать интенсивность прошедшего

сигнала для каждого спектрального интервала. В зависимости от типа используемого фильтра, гиперспектральные камеры классифицируются следующим образом:

- Камеры с вращающимся фильтром;
- Камеры с настраиваемым фильтром;
- Камеры с клиновидным фильтром;
- Камеры с фильтром на квантовых точках.

Камера на основе вращающегося фильтра

Схема гиперспектральной камеры с колесом фильтров представлена на рисунке 4. В данной системе несколько узкополосных фильтров, каждый из которых характеризуется определённым диапазоном пропускания, закреплены на вращающемся диске.

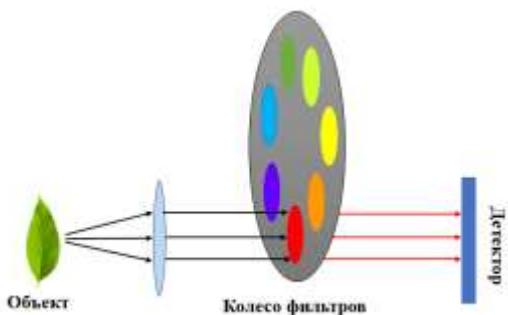


Рисунок 4 – Принципиальная схема гиперспектральной камеры с вращающимся фильтром.

Излучение, поступающее от исследуемого объекта, последовательно проходит через выбранный фильтр и фиксируется детектором, регистрирующим изображение в соответствующем спектральном интервале. Вращение

фильтрового колеса обеспечивает поочерёдную съёмку в различных спектральных диапазонах, что позволяет формировать гиперспектральный куб данных. Кроме того, скорость вращения может адаптироваться в зависимости от условий освещённости и параметров экспозиции детектора, что оптимизирует процесс получения данных без потери качества изображения. Примером реализации такой системы является разработка NASA, в которой улучшенная конструкция колеса фильтров позволяет минимизировать мёртвое время при смене фильтров, повышая эффективность сбора данных [27]. Дополнительно исследования, опубликованные [28], описывают компактный механизм двойного слоя колеса фильтров, приводимый в действие одним мотором, что позволяет улучшить спектральное разрешение и гибкость системы. Однако следует учитывать, что использование вращающихся фильтровых колёс может вводить геометрические искажения в получаемые изображения, что требует применения алгоритмов компенсации для обеспечения точности, полученных данных [29].

Камеры с настраиваемым фильтром

Гиперспектральные камеры с настраиваемыми фильтрами используют спектральные элементы, позволяющие варьировать диапазон пропускания излучения посредством изменения их оптических характеристик. В частности, применяются жидкокристаллические (LCTF) и акустооптические (AOTF) фильтры, отличающиеся методами настройки. Схема гиперспектральной камеры с жидкокристаллическим фильтром (LCTF) представлена на рисунке 5.

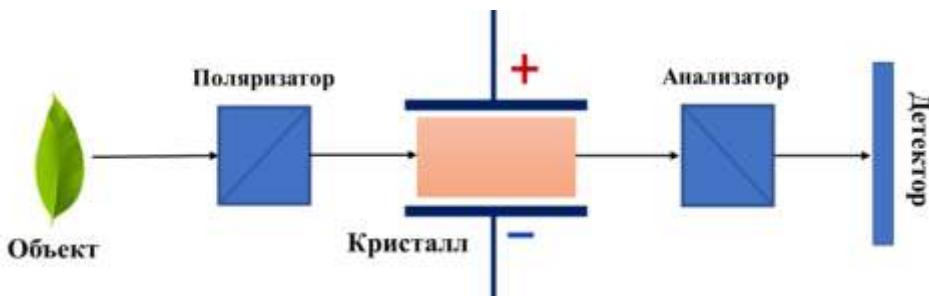


Рисунок 5 – Принципиальная схема гиперспектральной камеры с жидкокристаллическим фильтром.

При прохождении света определённой длины волны через первый поляризатор он приобретает линейную поляризацию. Далее поляризованный свет направляется в жидкий анизотропный кристалл, где происходит двойное лучепреломление. В результате обычный и

необыкновенный лучи, распространяющиеся с различными скоростями, формируют разность фаз на выходе из кристалла. Второй поляризатор (анализатор) преобразует полученную фазовую разницу в интерференционную картину, которая регистрируется детектором.

Регулировка разности фаз осуществляется путём изменения напряжённости электрического поля, воздействующего на кристалл, что обусловлено электрооптическим эффектом Поккельса. Таким образом, изменение

параметров электрического поля позволяет изменять длину волны проходящего света, что является основой настройки спектрального диапазона системы [30].

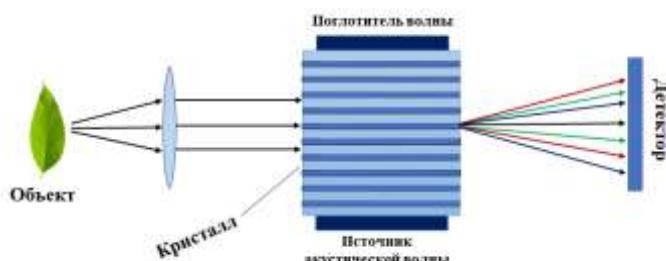


Рисунок 6 – Принципиальная схема гиперспектральной камеры с акустооптическим настраиваемым фильтром.

Гиперспектральная камера с акустооптическим настраиваемым фильтром (AOTF) состоит из двух основных компонентов: акустооптической среды (обычно анизотропного кристалла) и пьезоэлектрического элемента. (рис. 6). При подаче электрического сигнала на пьезоэлектрический элемент генерируется акустическая волна, которая распространяется через кристалл. Эта акустическая волна вызывает периодические изменения плотности среды, что, в свою очередь, приводит к вариациям показателя преломления. В результате в кристалле формируется динамически изменяющаяся пространственная дифракционная решётка, которая обеспечивает дифракцию падающего света и его спектральное разложение.

Регулировка параметров акустической волны позволяет точно настраивать спектральный диапазон, обеспечивая выбор необходимых спектральных компонент для анализа [31].

Гиперспектральная камера с клиновидным фильтром

Гиперспектральная камера с клиновидным (градиентным) фильтром обеспечивает непрерывное спектральное измерение в диапазоне видимого (и/или ближнего ИК) спектра. Градиентный фильтр представляет собой клиновидную пластину с нанесённым тонким многослойным интерференционным покрытием, размещенную непосредственно перед двумерным детекторным массивом (см. рис. 7) [32].

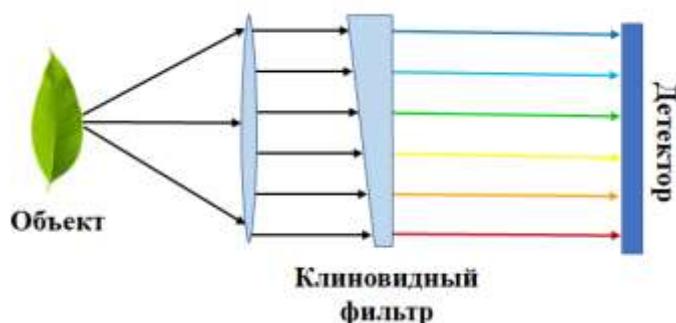


Рисунок 7 – Принципиальная схема гиперспектральной камеры с клиновидным фильтром.

При прохождении света через такой фильтр формируется интерференционная картина, приводящая к образованию полос равной толщины вследствие отражения от поверхности.

Локальная разность хода световых волн зависит от толщины фильтра в данной точке, что позволяет удовлетворить условие интерференционного максимума только для определённой длины волны. Таким образом, каждый участок

фильтра пропускает свет определённого спектрального диапазона, а соответствующие элементы матрицы детектора фиксируют излучение своей длины волны.

Современные градиентные фильтры обладают высокой оптической прозрачностью (коэффициент пропускания до 70 %) и обеспечивают спектральное разрешение на уровне 1 % от центральной длины волны, что делает их

перспективным решением для компактных и энергоэффективных гиперспектральных систем [33].

Гиперспектральная камера с матрицей фильтров

Матрица фильтров представляет собой периодическую оптическую структуру, состоящую из повторяющихся элементарных блоков (примитивов), каждый из которых подразделяется на n областей с уникальными оптическими характеристиками. Центральная длина волн, проходящая через каждую область, определяется посредством точного контроля толщины пленочного слоя, нанесённого на соответствующую

зону, что обеспечивает требуемую спектральную селективность и стабильность прохождения света [34]. В схеме, приведенной на рис. 8 изображена конфигурация фильтрующего массива, где каждая область примитива отвечает за фиксацию определённого диапазона длин волн. После сбора спектральных данных осуществляется агрегация элементов изображения, соответствующих одной и той же области во всех примитивах. Такой подход позволяет сформировать окончательное спектральное изображение объекта с высоким пространственным и спектральным разрешением, что является критически важным для точного анализа характеристик исследуемого материала [35].

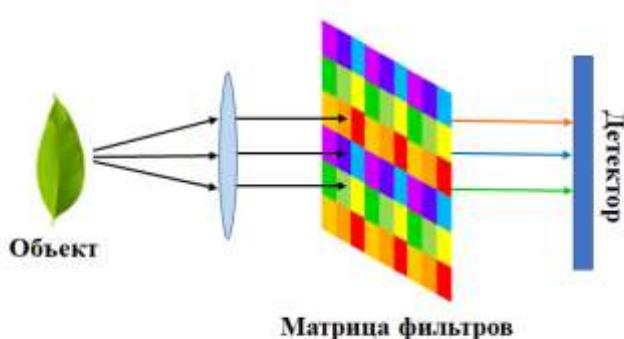


Рисунок 8 – Принципиальная схема гиперспектральной камеры с матрицей фильтров.

Гиперспектральная камера с фильтром на квантовых точках

Гиперспектральные камеры, использующие фильтры на квантовых точках, применяют данные наноструктуры в качестве активных элементов для формирования спектрально-адаптивных фильтров. Интеграция квантовых точек на единой подложке позволяет создавать детекторные массивы, способные регистрировать изображения по всему спектральному диапазону с высокой дискретизацией.

Квантовая точка (КТ), или искусственный атом, представляет собой фрагмент проводника или полупроводника, в котором движение носителей заряда (электронов или дырок) квантово ограничено по всем трём пространственным направлениям. Благодаря своим малым размерам квантовые эффекты становятся доминирующими, что приводит к дискретизации энергетических уровней в КТ. В результате спектры излучения и поглощения квантовых точек имитируют спектры отдельных атомов. При этом энергия дискретных уровней

зависит от габаритов квантовой точки, что позволяет регулировать спектры поглощения и флуоресценции посредством изменения её размеров — увеличение размеров КТ приводит к снижению энергии края спектра поглощения [36]. Таким образом, с помощью точного контроля размеров можно создавать квантовые точки, настроенные на определённые длины волн падающего излучения.

При интеграции квантовых точек на одной подложке достигается возможность одновременной фиксации изображений по всему спектральному диапазону, что значительно расширяет возможности гиперспектрального зондирования. Такой подход обеспечивает получение более точных и детализированных спектральных изображений, способствующих глубокому анализу физических и химических характеристик исследуемых объектов [37].

Ниже представлен сравнительный анализ гиперспектральных камер по достоинствам и недостаткам (без описания принципов работы) (Таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ гиперспектральных камер

Тип камеры	Достоинства	Недостатки
Дисперсионные	<p>Высокая скорость регистрации: возможность одновременной фиксации спектральных компонент обеспечивает съёмки в реальном времени.</p> <p>Широкий спектральный диапазон: способны охватывать непрерывный интервал длин волн.</p> <p>Низкие потери сигнала: минимальное затухание света за счёт использования явлений дифракции дисперсии.</p>	<p>Большие размеры системы: требуют крупных оптических компонентов, что затрудняет создание компактных устройств.</p> <p>Высокая стоимость: сложность конструкции и точная калибровка оптики ведут к значительным затратам.</p>
Интерферометрические	<p>Высокая светимость: использование интерференционных эффектов позволяет работать с коротким временем экспозиции.</p> <p>Большая угловая апертура: некоторые интерферометры (например, Фабри-Перо) могут принимать свет под широким диапазоном углов, что повышает эффективность системы.</p> <p>Высокая спектральная чувствительность: возможность обнаружения незначительных изменений в спектральном составе.</p>	<p>Чувствительность к изменениям освещённости: временные колебания условий освещённости могут приводить к ошибкам при сравнении интенсивностей на разных длинах волн.</p> <p>Сложность калибровки: точное согласование оптических путей требует дополнительных усилий, что ограничивает применение в динамичных условиях.</p> <p>Ограниченностя применения: наиболее эффективны в задачах, где не требуется строгая межканальная калибровка.</p>
Фильтрующие	<p>Гибкость настройки спектральных диапазонов: возможность выбора и адаптации спектральных каналов (как при использовании вращающихся, так и настраиваемых фильтров).</p> <p>Потенциальная компактность: отсутствие крупных дисперсионных элементов позволяет создавать более компактные системы, особенно при использовании настраиваемых фильтров (LCTF, AOTF) или квантовых точек.</p> <p>Одновременная регистрация (при некоторых технологиях): современные реализации (например, с квантовыми точками) позволяют фиксировать данные по всему спектральному диапазону без механического сканирования.</p>	<p>Механические ограничения (при вращающихся фильтрах): механическое переключение может вызывать вибрации и увеличивать время экспозиции, а спектральное покрытие остаётся дискретным.</p> <p>Низкий коэффициент пропускания и температурная нестабильность (при LCTF): эти факторы могут снижать точность и качество получаемых изображений.</p> <p>Ограниченный спектральный диапазон (при АOTF): полоса пропускания акустооптического элемента может существенно ограничивать настройку длины волны.</p>

Основные виды гиперспектральных камер

Гиперспектральные камеры представляют собой высокоточные оптико-электронные системы, предназначенные для детального анализа спектральных характеристик материалов в широком диапазоне длин волн. Благодаря своей универсальности они находят применение в промышленности, сельском хозяйстве, экологии, медицине и фундаментальных научных исследованиях. В данном разделе представлен обзор основных типов гиперспектральных камер, их ключевых характеристик и областей практического применения.

Линейка камер HySpex.

1) HySpex Baldur V-1024 N работает в видимом и ближнем ИК-диапазоне (VNIR), от 400 до 1000 нм. Она представляет собой гиперспектральную камеру, которая способна регистрировать сотни спектральных каналов. Эта камера использует метод линейного сканирования (pushbroom), при котором каждая линия объекта снимается одновременно во множестве спектральных каналов, что позволяет получить как пространственные, так и спектральные данные. Камера отличается высокой точностью, обеспечивая пространственное разрешение менее 1,7 пикселя. Она предназначена для промышленного контроля и научных исследований, где критически важна максимальная точность в видимом и ближнем ИК-диапазоне [38].

2) HySpex S-640i N – это гиперспектральная камера для ближнего ИК-диапазона (SWIR), работающая в диапазоне 970–1670 нм. Как и другие камеры HySpex, она регистрирует большое количество спектральных каналов и использует pushbroom-сканирование. Отличается высоким пространственным разрешением (менее 1,5 пикселя). Эта модель идеально подходит для полевых и лабораторных исследований, требующих высокой точности в SWIR-диапазоне [39].

Линейка камер Specim.

1) Specim FX10 охватывает видимый и ближний ИК-диапазон (VNIR) 400–1000 нм и обеспечивает высокое спектральное разрешение в 5,5 нм при 224 каналах. Пространственное разрешение составляет 1024 пикселя, а частота достигает 330 кадров в секунду (FPS) при полном кадре и до 9900 FPS при биннинге – методе обработки сигналов в матрицах детекторов, при котором соседние пиксели объединяются (складываются) в один «суперпиксель». В гиперспектральных камерах биннинг часто

применяют для уменьшения шума при съёмке слабых сигналов, ускорения получения гиперкуба, а также для балансировки между спектральным и пространственным разрешением. Благодаря pushbroom-принципу и высокой скорости, FX10 широко применяется в задачах промышленной сортировки и научного анализа [40].

2) Specim FX17 ориентирована на SWIR-диапазон (900–1700 нм), имеет спектральное разрешение 8 нм и 224 канала. Пространственное разрешение составляет 640 пикселей. Частота кадров варьируется от 670 FPS (полный кадр) до 15000 FPS (при использовании биннинга). Это делает камеру отличным выбором для высокоскоростных промышленных задач [41].

3) Specim FX50 работает в среднем ИК-диапазоне (MWIR) – от 2700 до 5300 нм, что делает её уникальной для задач в этой области. Спектральное разрешение составляет 35 нм при 154 каналах, а пространственное разрешение – 640 пикселей. Частота кадров достигает 380 FPS. Как и другие камеры серии FX, она использует pushbroom-методику и предназначена для высокотемпературных или химически чувствительных производств [42].

Камера Resonon Pika XC2 охватывает VNIR-диапазон (400–1000 нм) с выдающимся спектральным разрешением – 1,9 нм и 447 каналами. Она имеет высокое пространственное разрешение (1600 пикселей) и работает с частотой 165 FPS. С применением pushbroom-принципа, камера подходит для точных лабораторных и полевых исследований [43].

Unispectral Monarch II – это компактное решение для ближнего ИК-анализа в диапазоне 690–935 нм. Камера использует технологию туннельного фильтра, обеспечивая 10 каналов с шагом в 30 нм. Пространственное разрешение достигает 1280×1024 пикселей, а частота кадров – 60 FPS. Камера предназначена для портативных и интегрируемых систем в сельском хозяйстве, пищевой промышленности и мобильной аналитике материалов [44].

Камеры FigSpec – это линейка гиперспектральных систем, предназначенных для спектрального анализа, в частности, для исследования состояния растений. Эти камеры используют pushbroom-сканирование. Они работают в диапазонах, охватывающих видимый свет и ближний инфракрасный спектр, что критически важно для анализа растительности [45].

Линейка FigSpec включает несколько моделей, каждая из которых оптимизирована для конкретных задач:

1) FigSpec FS-13: Эта модель – высокоточный лабораторный инструмент. Она работает в диапазоне от 400 до 1000 нм, имеет высокое спектральное разрешение 2,5 нм и 1200 каналов, что обеспечивает детальный анализ. Пространственное разрешение составляет около 0,3 мм/пиксель. FS-13 идеально подходит для создания обучающих выборок и выявления фитопатологий [46].

2) FigSpec FS-23: Компактная и мобильная камера, работающая в том же диапазоне 400–1000 нм. Её спектральное разрешение составляет 5 нм при 120 каналах. Благодаря своим небольшим размерам, она часто используется для быстрой диагностики в полевых условиях, позволяя оперативно оценить состояние растений [47].

3) FigSpec FS-60: Эта модель – наиболее универсальная и мощная. Её диапазон шире, чем у предыдущих, от 400 до 1700 нм, что позволяет проводить более глубокий анализ. Спектральное разрешение 5 нм и 300 каналов дают возможность диагностировать не только заболевания, но и дефицит питательных веществ, а также стрессовые факторы у растений [48].

Выбор камеры полностью зависит от конкретных условий и задач исследования. Нет одной универсальной камеры, каждая модель оптимизирована для определённого применения. При проведении лабораторных и высокоточных исследований приоритетной целью является получение максимально детализированных и точных данных в контролируемой среде, например, для создания обучающих выборок или глубокого анализа фитопатологий, лучше всего подойдут следующие камеры:

1) Resonon Pika XC2 обладает самым высоким спектральным разрешением (1,9 нм) и большим количеством каналов (447), что идеально для детального спектрального анализа [43].

2) FigSpec FS-13 имеет исключительное количество каналов (1200) и высокое спектральное разрешение (2,5 нм). Это делает её идеальным инструментом для лабораторных исследований, где требуется максимальная детализация спектральных данных [46].

3) HySpex Baldur V-1024 N отличается очень высоким пространственным разрешением, что важно для получения детализированных изображений [38].

В полевой и мобильной диагностике важна портативность и возможность оперативной съёмки вне лаборатории, в связи с чем следует

рассматривать более компактные и лёгкие модели:

1) Unispectral Monarch II – это компактное решение, специально разработанное для портативных и интегрированных систем. Хотя у неё меньше каналов (10), она идеально подходит для быстрой мобильной аналитики в полевых условиях или на производстве [44].

2) FigSpec FS-23 – компактная и мобильная камера, предназначенная для быстрой диагностики прямо в полевых условиях [47].

В промышленной сортировке и при необходимости высокоскоростного контроля, особенно в условиях производства, где ключевую роль играют скорость и высокая пропускная способность, предпочтительнее камеры с высокой частотой кадров:

1) Specim FX17 отличается самой высокой частотой кадров (до 15000 FPS при биннинге), что делает её оптимальным выбором для конвейерных линий и других высокоскоростных задач [41].

2) Specim FX10 также имеет высокую скорость (до 9900 FPS) и отлично подходит для промышленной сортировки и анализа [40].

3) HySpex Baldur V-1024 N и HySpex S-640i N. Обе модели могут быть использованы для промышленного контроля, особенно там, где важна точность, а не максимальная скорость [38, 39].

Для исследовательских задач, требующих анализа в более широком диапазоне длин волн (от видимого до SWIR), следует выбирать камеры, которые охватывают обе области:

1) FigSpec FS-60 – универсальная модель с широким спектральным диапазоном (400–1700 нм), что позволяет проводить глубокую диагностику, выявляя не только болезни, но и дефицит питательных веществ [48].

2) Specim FX50 – камера, работающая в среднем ИК-диапазоне (MWIR), что открывает возможности для анализа высокотемпературных процессов и химически чувствительных материалов [42].

Таким образом, для различных задач гиперспектрального анализа оптимальными решениями станут: Resonon Pika XC2 и FigSpec FS-13 – для лабораторных исследований, где особенно важны высокая точность измерений и стабильность данных; Specim FX10 и FX17 – для промышленного применения, требующего высокой скорости съёмки и надёжности при интеграции в производственные процессы; Unispectral Monarch II и FigSpec FS-23 – для мобильной и оперативной диагностики в полевых условиях, когда необходима компактность и

простота использования; FigSpec FS-60 и Specim FX50 – для универсальных задач и углублённого научного анализа, требующих широкого спектрального диапазона, гибкости настройки и расширенных аналитических возможностей.

Проведённый анализ показал, что гиперспектральные камеры FigSpec FS-13 и FigSpec FS-23 VNIR-диапазона являются оптимальными для выполнения комплекса лабораторно-полевых исследований. Данные приборы обеспечивают съёмку в спектральном диапазоне 400–1000 нм с разрешением 2,5–5 нм и

пространственным разрешением порядка 0,3 мм/пиксель. Их применение позволяет проводить обработку полученных изображений в программной среде ENVI с последующим анализом спектров объектов и построением классификационных моделей в специализированном программном обеспечении Breeze с использованием языка IDL. Такой выбор оборудования обеспечивает высокую точность спектральных измерений, эффективность обработки данных и адаптивность к различным сценариям практического применения.

Заключение

В данной работе проведён сравнительный анализ основных типов гиперспектральных камер: дисперсионных, интерферометрических и фильтрующих. Выбор оптимального типа гиперспектральной камеры зависит от конкретных требований приложения. Дисперсионные камеры характеризуются высокой скоростью регистрации и широким спектральным охватом, однако требуют массивных оптических компонентов и значительных затрат. Интерферометрические системы обладают высокой спектральной чувствительностью, но их применение ограничивается зависимостью от стабильности освещения. Фильтрующие камеры

обеспечивают гибкость настройки и потенциальную компактность, однако могут иметь механические и спектральные ограничения, обусловленные характеристиками фильтра.

Благодарности

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант ИРН АР23485162 «Разработка инновационного метода мониторинга и ранней диагностики болезней зерновых культур с использованием технологии гиперспектрального зондирования»).

Литература References

- 1 J.Y. Hardeberg, F. Schmitt, H. Brettel, Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter, *Optical Engineering* **41**(10), 2532–2548 (2002). <https://doi.org/10.1117/1.1503346>
- 2 M.E. Klein, B.J. Aalderink, R. Padoan, G. De Bruin, T.A. Steemers, Quantitative hyperspectral reflectance imaging, *Sensors* **8**(9), 5576–5618 (2008). <https://doi.org/10.3390/s8095576>
- 3 F. Rosi, C. Miliani, R. Braun, R. Harig, D. Sali, B.G. Brunetti, A. Sgamellotti, Noninvasive analysis of paintings by mid-infrared hyperspectral imaging, *Angewandte Chemie International Edition* **52**(20), 5258–5261 (2013). <https://doi.org/10.1002/anie.201209929>
- 4 M. Schlerf, G. Rock, P. Lagueux, F. Ronellenfitsch, M. Gerhards, L. Hoffmann, T. Udelhoven, A hyperspectral thermal infrared imaging instrument for natural resources applications, *Remote Sensing* **4**(12), 3995–4009 (2012). <https://doi.org/10.3390/rs4123995>
- 5 M.J. Barnsley, J.J. Settle, M.A. Cutter, D.R. Lobb, F. Teston, The PROBA/CHRIS mission: A low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **42**(7), 1512–1520 (2004). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004827260>
- 6 K. Tohsing, M. Schrempf, S. Riechelmann, G. Seckmeyer, Validation of spectral sky radiance derived from all-sky camera images, *Atmospheric Measurement Techniques* **7**, 2137–2146 (2014). <https://doi.org/10.5194/amt-7-2137-2014>
- 7 X. Ye, K. Sakai, H. Okamoto, L.O. Garciano, A ground-based hyperspectral imaging system for characterizing vegetation spectral features, *Computers and Electronics in Agriculture* **63**(1), 13–21 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.01.011>
- 8 C.F. Cull, K. Choi, D.J. Brady, T. Oliver, Identification of fluorescent beads using a coded aperture snapshot spectral imager, *Applied Optics* **49**(10), B59–B70 (2010). <https://doi.org/10.1364/AO.49.000B59>
- 9 M. Kamruzzaman, G. Elmasry, D.W. Sun, P. Allen, Application of NIR hyperspectral imaging for discrimination of lamb muscles, *Journal of Food Engineering* **104**(3), 332–340 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.024>

- 10 A. Mahlein, U. Steiner, C. Hillnhütter, H. Dehne, E. Oerke, Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases, *Plant Methods* **8**, Article 3 (2012). <https://doi.org/10.1186/1746-4811-8-3>
- 11 R. Roscher, J. Behmann, A.-K. Mahlein, J. Dupuis, H. Kuhlmann, L. Plümer, Detection of disease symptoms on hyperspectral 3D plant models, *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III-7*, 89–96 (2016). <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-7-89-2016>
- 12 H. Aasen, E. Honkavaara, A. Lucieer, P.J. Zarco-Tejada, Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: a review, *Remote Sensing* **10**(7), Article 1091 (2018). <https://doi.org/10.3390/rs10071091>
- 13 O. Mutanga, L. Kumar, Estimating and mapping grass phosphorus concentration in an African savanna using hyperspectral image data, *International Journal of Remote Sensing* **28**(21), 4897–4911 (2007). <https://doi.org/10.1080/01431160701253253>
- 14 A. Terentev, V. Dolzhenko, A. Fedotov, D. Eremenko, Current state of hyperspectral remote sensing for early plant disease detection: a review, *Sensors* **22**(3) (2022). <https://doi.org/10.3390/s22030757>
- 15 S.M. De Jong, F.D. Van Der Meer, J.G. Clevers, *Basics of Remote Sensing. Remote Sensing Image Analysis: Including the Spatial Domain*, Dordrecht: Springer, 2007, 260 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2560-0_1
- 16 P. Mishra, M.S.M. Asaari, A. Herrero-Langreo, S. Lohumi, B. Diezma, P. Scheunders, Close range hyperspectral imaging of plants: a review, *Biosystems Engineering* **164**, 49–67 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.009>
- 17 D.A. Landgrebe, *Signal Theory Methods in Multispectral Remote Sensing*, (Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2003), 528 p. <https://doi.org/10.1002/0471723800>
- 18 R. Green et al., Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS), *Remote Sensing of Environment* **65**, 227–248 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00064-9)
- 19 C.-I. Chang, *Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification*, (New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003), 390 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9170-6>
- 20 X. Jia, J. Richards, D. Ricken, *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, (Berlin/Heidelberg: Springer, 2006), 240 p.
- 21 M. Aikio, *Hyperspectral Prism-Grating-Prism Imaging Spectrograph*, (Espoo, VTT Publications 435, 2001), 114 p.
- 22 X. Qingsheng, T. Zhongtian, Y. Bai, L. Jishen, L. Chang, W. Fupeng, L. Qian, Underwater hyperspectral imaging system using a prism–grating–prism structure, *Applied Optics* **60**(4), 894–900 (2021). <https://doi.org/10.1364/AO.415351>
- 23 G. Wong, Snapshot hyperspectral imaging and practical applications, *Journal of Physics: Conference Series* **178**(1), 012048 (2009). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/178/1/012048>
- 24 X. Li, R. Li, M. Wang, Y. Liu, B. Zhang, J. Zhou, Hyperspectral imaging and their applications in the nondestructive quality assessment of fruits and vegetables, in *Hyperspectral Imaging in Agriculture, Food and Environment*, (London, IntechOpen, 2018), pp. 27–63.
- 25 Y. Zhang, Q. Lv, Y. Tang, P. He, B. Zhu, X. Sui, Y. Yang, Y. Bai, Y. Liu, Super-Resolution Multicomponent Joint-Interferometric Fabry–Perot-Based Technique, *Applied Sciences* **13**(2), 1012 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13021012>
- 26 A. Armaşelu, New spectral applications of the Fourier transforms in medicine, biological and biomedical fields, in *Fourier Transforms – High-tech Application and Current Trends*, (Rijeka: InTech, 2017), pp. 235–254.
- 27 J.C. Bremer, Multispectral imager with improved filter wheel and optics, (NASA Tech Briefs, 2007).
- 28 L. Ma, H. Wu, S. Tan, X. Zhang, L. Wang, N. Zhou, J. Jia, S. Mu, W. Wang, Research on the technology of a compact double-layer multispectral filter-wheel mechanism driven by a single motor, *Applied Sciences* **14**, Article 10686 (2024). <https://doi.org/10.3390/app142210686>
- 29 J. Brauers, N. Schulte, T. Aach, Multispectral filter-wheel cameras: geometric distortion model and compensation algorithms, *IEEE Transactions on Image Processing* **17**(12), 2368–2380 (2008).
- 30 X. Wang, Y.H. Zhang, X. Ma, T.F. Xu, G.R. Arce, Compressive spectral imaging system based on liquid crystal tunable filter, *Optics Express* **26**(19), 25226–25243 (2018). <https://doi.org/10.1364/OE.26.025226>
- 31 N. Gupta, Acousto-optic tunable filter based spectropolarimetric imagers, *Proc. SPIE* **6972**, 69720C (2008). <https://doi.org/10.1117/12.782800>
- 32 D. Manolakis, R. Lockwood, T. Cooley, *Hyperspectral Imaging Remote Sensing: Physics, Sensors, and Algorithms*, (Cambridge: Cambridge University Press, 2016), 706 p.
- 33 R. Mahendra, R. Chandra, Design of linear variable optical filter for hyperspectral imaging, *Engineering Research Express* **2**, 025041 (2021). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-358928/v1>
- 34 B. Geelen, N. Tack, A. Lambrechts, A compact snapshot multispectral imager with a monolithically integrated per-pixel filter mosaic, *Proc. SPIE* 8974, *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VII*, 89740L (2014). <https://doi.org/10.1117/12.2037607>
- 35 A. Bhargava, A. Sachdeva, K. Sharma, M.H. Alsharif, P. Uthansakul, M. Uthansakul, Hyperspectral imaging and its applications: a review, *Heliyon* **10**(12), Article e33208 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33208>
- 36 V.I. Klimov, *Nanocrystal Quantum Dots*, (Boca Raton, CRC Press, 2017), 485 p.
- 37 M. Kianinia, C. Bradac, B. Sontheimer et al., All-optical control and super-resolution imaging of quantum emitters in layered materials, *Nature Communications* **9**, 874 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03290-0>

- 38 HySpex Baldur V-1024 N (Electronic resource), URL: <https://www.hyspex.com/hyspex-products/hyspex-baldur/baldur-v-1024-n>, Retrieved 29.08.2025.
- 39 HySpex Baldur S-640i N (Electronic resource), URL: <https://www.hyspex.com/hyspex-products/hyspex-baldur/baldur-s-640i-n>, Retrieved 29.08.2025.
- 40 Specim FX10 (Electronic resource), URL: <https://www.specim.com/products/specim-fx10/>, Retrieved 29.08.2025.
- 41 Specim FX17 (Electronic resource), URL: <https://www.specim.com/products/specim-fx17/>, Retrieved 29.08.2025.
- 42 Specim FX50 (Electronic resource), URL: <https://www.specim.com/products/specim-fx50/>, Retrieved 29.08.2025.
- 43 Pika XC2 (400–1000 nm) (Electronic resource), URL: <https://resonon.com/Pika-XC2>, Retrieved 29.08.2025.
- 44 Unispectral Monarch II (Electronic resource), URL: https://www.isuzuoptics.com/en/products/Unispectral_Monarch_II#Specifications, Retrieved 29.08.2025.
- 45 Spectrum Link Everything. Manufacturer of Hyperspectral Camera (Electronic resource), URL: <https://www.figspec.com/en/>, Retrieved 29.08.2025.
- 46 Hyperspectral camera FS1X series (line scanning) (Electronic resource), URL: <https://www.figspec.com/en/h-col-125.html>, Retrieved 29.08.2025.
- 47 Imaging hyperspectral camera FS2X series (Electronic resource), URL: <https://www.figspec.com/en/h-col-141.html>, Retrieved 29.08.2025.
- 48 FS60 UAV Hyperspectral Measurement System (Electronic resource), URL: <https://www.figspec.com/en/h-col-127.html>, Retrieved 29.08.2025.

Мақала тарихы:

Түсті – 13.05.2025

Түзетілген түрде түсті – 08.07.2025

Қабылданды – 20.08.2025

Article history:

Received 13 May 2025

Received in revised form 08 July 2025

Accepted 20 August 2025

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Римма Уалиева** – PhD, профессор, «Торайғыров университеті» КеАҚ, Павлодар, Қазақстан, e-mail: ualiyeva.r@gmail.com

2. **Тимур Тұхфатуллин** (автор корреспондент) – ғылым кандидаты, доцент, Ұлттық ядролық зерттеу университеті МИФИ Алматы қаласындағы филиалы, Алматы, Қазақстан, e-mail: tta@tpu.ru

3. **Бойцова Елена** – ғылым кандидаты, Томск политехникалық ұлттық зерттеу университеті, Томск, Ресей Федерациясы, e-mail: boi55@tpu.ru

4. **Каверина Мария** – «Торайғыров университеті» КеАҚ, Павлодар, Қазақстан, e-mail: k.ma96@mail.ru

Information about authors:

1. **Rimma Ualiyeva** – PhD, Professor, Toraigyrovo University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: ualiyeva.r@gmail.com

2. **Timur Tukhfatullin** (corresponding author), PhD, Associate Professor, Almaty Branch of National Research Nuclear University MEPhI, Almaty, Kazakhstan, e-mail: tta@tpu.ru

3. **Elena Boytsova**, PhD, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: boi55@tpu.ru

4. **Maria Kaverina**, Doctoral Candidate, Toraigyrovo University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: k.ma96@mail.ru