

Подлипов Владимир Владимирович

**ИЗОБРАЖАЮЩИЙ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ОЦЕНКИ
ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ И СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ**

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ
и природной среды

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре технической кибернетики.

Научный руководитель:

Скиданов Роман Васильевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры технической кибернетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре технической кибернетики.

Официальные оппоненты:

Потатуркин Олег Иосифович, доктор технических наук, профессор, Руководитель научного направления «Нанотехнологии и информационные технологии» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук»;

Дашков Михаил Викторович, кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой линий связи и измерений в технике связи, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится «26» декабря 2025 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.11 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», по адресу: 443056, г. Самара, ул. Гая, д.43, ауд. 429.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева»: https://ssau.ru/storage/pages/6837/file_68f88cacc9b095.62431611.pdf

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.379.11
д.т.н., доцент

Зеленский В. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Мониторинг состояния почвы и состояния растительности является важной задачей контроля состояния природной среды для обеспечения экологической безопасности природопользования. К важнейшим показателям экологического благополучия природной среды, одним из элементов которой является почва и растения на ней, является плодородие почвы, основными определяющими факторами которого является содержание в почве углерода, влаги, и вегетационные показатели растений. Проведение мониторинга почвы и растительности, основанного на объективном учете большого количества разнообразных природных факторов (температура почвы, температуры воздуха, осадки, ветер и инсоляция), прямо или косвенно, с различным откликом и его задержкой, влияющих на вегетационные показатели растительности, необходимо для принятия дальнейших эффективных, экономически и практически целесообразных решений, как при проведении экологических мероприятий, так и при возделывании полевых агрокультур. Система мониторинга строится, основываясь на методической и технической компоненте. Методическая компонента включает в себя методы, модели и подходы к анализу данных и принятию решений на их основе. Техническая компонента включает технические и программные средства, необходимые для сбора, обработки, хранения и представления данных в удобном виде, необходимые для анализа полученных данных, анализ их изменений и выработки решений. Одним из возможных путей решения проблемы мониторинга состояния природной среды может быть использование дистанционного зондирования такими методами как, например, радиолокации, мультиспектральной съемки, изображающей спектроскопии с использованием гиперспектральной аппаратуры (ГСА). При этом, мультиспектральные и гиперспектральные камеры могут применяться на космических аппаратах, авиационных носителях, беспилотных воздушных средствах (самолеты, квадрокоптеры, дирижабли и др.), на наземных носителях и платформах (подвижная наземная техника, вышки, портативные носимые устройства). Стоит отметить, что в связи с развитием беспилотных наземных и воздушных средств, с улучшением тактико-технических характеристик, как самих носителей, так и ГСА, вспомогательных систем, их автономности, маневренности, дальности действия систем связи и навигации, актуальность их все возрастает, что позволяет проводить дистанционный мониторинг, в том числе и в осложненных условиях, детектировать пожары, обнаруживать очаги экологических проблем, утечек, оперативно отслеживать динамику. Применение ГСА на таких носителях и наземных установках в настоящий момент ограничено их высокой стоимостью, сложностью, массо-габаритными характеристиками. В связи с этим **актуальной задачей** становится создание и исследование ГСА для наземного базирования с широким угловым полем и сниженным уровнем внеосевых aberrаций, создание методов оценки влажности почв и содержания в них углерода и кальция.

Степень разработанности темы

Одной из важной задачей экологического мониторинга почвы является задача оценки ее относительной влажности. Наиболее распространенный метод оценки абсолютной и относительной влажности термостатно-весовой, измеряемой в процентах от максимальной влагоемкости, может занимать от одного до нескольких дней. Данный метод имеет наивысший уровень достоверности и повторяемости измерений, однако, использование такого метода на практике сложно из-за неоднозначности интерполяции в масштабах поля. В задачах автоматизированного орошаемого земледелия используются контактные датчики, устанавливаемые непосредственно в зону заглубления корневой системы выращиваемых агрокультур. Хорошо известны емкостные, индуктивные, тензиометрические, кондуктометрические (или их различные сочетания) сенсорные

контактные системы. В основе их работы лежит косвенная связь одного или нескольких физических, электрических параметров гетерогенной структуры почвы со степенью насыщения влагой, газами и питательными элементами. Они имеют достаточно высокую стабильность и точность измеренных электрических показателей этими датчиками (отклонение обычно не превышает 2-5%) при проведении изначальных калибровочных процедур термостатно-весовым методом. Однако, точность определения показателей почвы определяется в большей степени погрешностью установки датчика на необходимую глубину, внешними условиями, воздействиями и биологической деятельностью в приповерхностном слое почвы, что зачастую приводит к дрейфу оцениваемых показателей и необходимостью периодических перекалибровок, поправок и уточнения по классической пробоотборной методике. При этом информация об оцениваемых показателях поступает лишь точечно и не дает возможность картирования обширных территорий.

Во многих задачах для дистанционного мониторинга и пространственно-временного анализа изменения состояния почв и растительности успешно применяется монохромная или трехцветная аэрофотосъемка. В этом случае дешифрование результатов съемки невозможно без наземной верификации.

Ряд авторов (Lyon, J.P., Stenberg B., Zamoza R., Guerrero C., Vohland M., Knadel M., Sahoo R.N. и др.) исследовали возможности оценки показателей почвы и растений по данным картографирования территорий на основе изображений дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазоне длин волн 1-14 мкм.

Одним из возможных путей решения проблемы мониторинга состояния природной среды может быть использование дистанционного зондирования такими методами как, например, метод радиолокации (СВЧ радиометрией или радаром с синтезированной апертурой (РСА) работающих в X, C, L диапазонах и др.) Методами компьютерной обработки данных поляриметрии радиоволн различных диапазонов можно добиться картографирования поля по уровню радиометрической температуры, которая различными методиками может быть пересчитана в определенные показатели почвы и растений. Основные подходы к радиолокационному зондированию почвы для оценки ее показателей описаны в трудах Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г. Балдина Е.А., Бирюк А.А., Чухланцев А.А., Wang J.R. Недостатком данной технологии является достаточно сложная технология обработки данных, низкая оперативность, значительный уровень шумов. Открытые данные по спутниковой группировке Sentinel-1 с РСА имеют периодичность обновления данных над одной и той же территорией России от 15 до 80 дней в зависимости от региона, что делает данную технологию крайне ограниченной для задач экологического или сельскохозяйственного мониторинга в настоящее время.

Для мониторинга полей и растительности наибольшее распространение получили изображающие спектрометры, которые имеют возможность получать одновременно пространственную и спектральную информацию отражения, что активно используется в системах ДЗЗ из космоса, с БПЛА и наземными средствами. Для этих целей используется изображающая гиперспектральная аппаратура (ГСА). Данные получаемые с использованием ГСА позволяют получать широкий набор спектральных вегетационных индексов растительности, самые известные из которых NDVI, водные индексы, пожароопасности и др, на основе которых можно косвенно оценивать показатели природной среды.

Основные методы оценки относительной влажности земной поверхности при мониторинге сельскохозяйственных угодий или лесных насаждений основаны на использовании гиперспектральных изображений (ГСИ) в SWIR диапазоне длин волн до 2,2 мкм. Среди них можно выделить два подхода оценки состояния почв. Один основывается на обработке гиперспектральных изображений растительного покрова, по состоянию которого можно косвенно судить о параметрах почвы. В другом случае оценка осуществляется по открытым участкам почвы и может быть осуществлена классификация

и картирование типов почв, например, для оценки их плодородия, основным определяющим фактором при этом является содержание органического углерода в почве. Однако, в обоих подходах также использовали двухдиапазонный гиперспектрометр, работающий в видимом и ближнем (коротковолновом) ИК диапазоне, поскольку ключевыми спектральными каналами для определения содержания углерода были именно каналы из коротковолнового инфракрасного (КИК) диапазона.

От качества ГСА зависит спектральное и пространственное разрешение, однако слишком высокие частоты решеток или широкое угловое поле зрения объектива ГСА при наземном применении вносят существенные абберационные искажения, что приводит к уширению функции рассеяния точки во внеосевых областях изображения спектра на матричном фотоприемнике. Такие абберационные искажения можно существенно снизить применением оптической схемы Оффнера или Дайсона. Разрабатываемые системы ГСА для применения на земле должны учитывать эти особенности, где сочетаются оба фактора, а именно необходимость работы в широком угловом поле зрения и большом спектральном разрешении.

Еще одно существенное отличие ГСА для наземной съемки или для БПЛА от ГСА для космической съемки, заключается в использовании существенно более простых объективов. Самый простой способ упрощения объектива – совместное использование в оптической системе дифракционных и рефракционных элементов.

Совместное использование дифракционных и рефракционных элементов в оптических изображающих системах впервые было предложено Ломаном в 1970г. Но предложенное решение работало только для монохроматического света. В белом свете разработанный объектив обладал всеми недостатками дифракционной изображающей оптики, т.е. огромными хроматическими абберациями. Поэтому довольно долго публикаций по этой тематике не было и следующая публикация, определившая использование дифракционных линз в виде корректоров хроматизма появилась только спустя 18 лет. Дальше количество публикаций по этой тематике существенно увеличивается. Дубик Б., Кот С. и др. в 1995г. в своей работе показывают, что одновременно с хроматической абберацией использование дифракционных линз позволяет компенсировать сферическую абберацию. К сожалению, есть еще один недостаток – повышенное светорассеяние дифракционных линз, и это послужило препятствием к широкому использованию рефракционно-дифракционных систем в изображающей оптике, однако работы по преодолению этого недостатка велись и ведутся по настоящее время. В работах Грейсуха Г.И. предложены методы компенсации светорассеяния, в которых подразумевают необходимость изготовления 2-3-слойных дифракционных структур на сферических поверхностях. Такой подход приводит к существенному усложнению технологии изготовления рефракционно-дифракционного объектива, и как следствие, к тому, что такие системы редко реализуются на практике, в отличие от классической технологии изготовления дифракционных линз, которая позволяет реализовать весьма широкий спектр направлений применения. Так в 2017г. дифракционные линзы использовали для составной изображающей системы идентичной фасеточному глазу насекомых. Рефракционно-дифракционные элементы использовались в качестве составной части искусственных хрусталиков глаза. В качестве дифракционной структуры в работе предложено использовать бинарную линзу, которая являлась, одновременно, линзой и с положительной и с отрицательной оптическими силами. Это приводит к возникновению на оптической оси двух разделенных фокусов, и в промежутке между ними везде будет примерно одинаково резкое изображение. Таким образом, отпадает необходимость подстройки фокусного расстояния искусственного хрусталика.

Все чаще рассматриваются гибридные системы, содержащие как рефракционные, так и дифракционные элементы. Однако по гибридным системам не описаны все возможности коррекции аббераций на основе дифракционных линз. Дифракционные линзы в таких системах используются классическим образом как некий ахроматизирующий элемент в составе классического многолинзового объектива либо в

сочетании с рефракционным элементом свободной формы, который компенсирует геометрические aberrации в объективе. Также известны двухфокусные системы, но ни в одной работе не попытались модифицировать рельеф дифракционной линзы для компенсации основных геометрических aberrаций.

Разработке и исследованию ГСА различного применения, объективов к ним, и дисперсионных элементов посвящено множество работ зарубежных и отечественных авторов, таких как Zhang, H., Green, R.O., Goetz, F.H., Виноградов, А.Н., А.И. Родионов, Е.С. Воропай, А.С.Мачихин, Демин А.В., Головин А.Д., Грейсух Г.И. Дубик Б. и других.

Однако, необходимо подчеркнуть, что в работах вышеперечисленных авторов:

1. Не рассмотрены ГСА, объективы и их особенности с расширенным угловым полем зрения для наземного применения.

2. Не рассматривалось применение ГСА для оценки влажности почв на основе индекса влагосодержания в растениях в диапазоне длин волн 0,4-1,0 мкм.

3. Не рассматривалась возможность применения ГСА для оценки содержания углерода и кальция в почве по ГСИ открытой поверхности почвы.

4. Не рассмотрено применение рефракционно-дифракционных объективов в составе ГСА для одновременной компенсации геометрических и хроматических aberrаций по широкому полю зрения.

Целью работы является создание изображающего гиперспектрометра наземного размещения для оценки вегетационных индексов растительности, влажности почв и содержания в ней кальция и углерода, как средства оперативного мониторинга состояния почвы и растений и, как следствие, повышения эффективности её использования, сохранения плодородия почв, что опосредовано положительно отразится на экологической обстановке и безопасности окружающей среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Определение особенностей и требований к техническим параметрам гиперспектральной аппаратуры для наземного размещения.

2. Разработка компактного мало-массогабаритного рефракционно-дифракционного объектива с компенсацией хроматических aberrаций в диапазоне от 0,4 до 1 мкм с пониженным уровнем внеосевых геометрических aberrаций.

3. Разработка и экспериментальное исследование пригодной для практического применения методики косвенной оценки влажности почвы на основе гиперспектральных данных растительности в диапазоне длин волн от 0,4мкм до 1мкм, произрастающей на этих почвах.

4. Разработка и экспериментальное исследование пригодного для практического применения методики оценки содержания углерода и кальция по гиперспектральным изображениям почв, полученным в диапазоне длин волн от 0,4мкм до 1мкм.

5. Проведение ряда лабораторных экспериментов и создание датасета для обучения нейросетевых алгоритмов для оценки углерода и кальция на основе пространственно-спектральных данных ГСА.

Научная новизна работы

1. Обоснована возможность достоверного определения параметров природных объектов на открытой почве с помощью специализированной ГСА наземного размещения с полем зрения 10-20°, обеспечивающей формирование 60-120 спектральных каналов в диапазоне 400-1000 нм. [1*, 3*, 5*]

2. Предложена методика выбора параметров оптической схемы рефракционно-дифракционного объектива, обеспечивающая требуемую ширину ФРТ по всему полю зрения, и позволяющая полностью скомпенсировать хроматическую aberrацию по границам заданного спектрального диапазона от 400 до 700нм и снизить в 2-3 раза уровень внеосевых aberrаций по сравнению с aberrациями, одиночной сферической линзы с тем же фокусным расстоянием [8*, 9*].

3. Разработана методика косвенного определения влажности почвы в бинарном режиме: «влажные – сухие», основанная на оценке влагосодержания в растениях с использованием вегетационного индекса NDVI, и индекса WI, рассчитанного по спектральным яркостям, определяемым с помощью ГСА, на длинах волн 900нм и 970нм. [4*]

4. Разработана методика разделения открытых почв сельскохозяйственного назначения на три класса по содержанию углерода и кальция (мало, норма, много), основанная на обработке данных гиперспектрального анализа почв в сверточной нейросети, обученной на экспериментально полученном датасете с суммарным количеством 1120000 гиперпикселей, элементный состав которого валидирован методом энергодисперсионного микроанализа. [5*, 6*, 7*]

Методология и методы исследований

Для решения научных задач, поставленных в данной диссертационной работе, применяются: экспериментальные методы, в том числе методы гиперспектральной съемки с поворотной платформы в полевых условиях, методы моделирования оптических систем, основанные, как на использовании широко распространенного коммерческого пакета ZEMAX, так и на основе программного обеспечения (ПО), разработанного автором Harmony, в основе которого лежат методы геометрической и дифракционной оптики, ПО для расчета гиперспектральных индексов «ГИПЕР», которое позволяет рассчитывать нормализованные разностные индексы и индексы отношения.

Теоретическая значимость заключается в разработке алгоритма итерационного процесса подбора параметров элементов оптических систем рефракционно-дифракционного объектива для ГСА с заданным угловым полем зрения и компенсацией хроматических аберраций и геометрических искажений.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования мобильного кроссплатформенного ГСА, разработанных методик в задачах точного земледелия, мониторинга лесов, мониторинга почв, экологии.

Результаты диссертационного исследования являются эффективным решением, для точного земледелия и для экологического мониторинга.

Соответствие паспорту специальности 2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Область исследования соответствует пунктам направлений исследований:

3. Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

4. Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды.

6. Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии.

Положения выносимые на защиту:

1. Обоснование возможности достоверного определения параметров природных объектов на открытой почве с помощью специализированной ГСА наземного базирования с полем зрения 10-20°, обеспечивающей формирование 60-120 спектральных каналов в диапазоне 400-1000 нм.

2. Методика выбора параметров оптической схемы РДО, обеспечивающая требуемую ширину ФРТ по всему полю зрения, и позволяющая полностью скомпенсировать хроматическую aberrацию по границам заданного спектрального диапазона от 400 до 700нм и снизить в 2-3 раза уровень внеосевых aberrаций по сравнению с aberrациями, одиночной сферической линзы с тем же фокусным расстоянием.

3. Методика косвенного определения влажности почвы в бинарном режиме: «влажные – сухие», основанная на оценке влагосодержания в растениях с использованием вегетационного индекса NDVI, и индекса WBI, рассчитанного по спектральным яркостям, определяемым с помощью ГСА, на длинах волн 900нм и 970нм,

4. Методика разделения открытых почв сельскохозяйственного назначения на три класса по содержанию углерода и кальция (мало, норма, много), основанная на обработке данных гиперспектрального анализа почв в сверточной нейросети, обученной на экспериментально полученном датасете с суммарным количеством 1120000 гиперпикселей, элементный состав которого валидирован методом энергодисперсионного микроанализа.

5. Результаты экспериментальных исследований разработанной ГСА.

Достоверность результатов работы обеспечивается совпадением полученных экспериментальным путем данных с теоретическими положениями диссертации, подтверждается непротиворечивостью с результатами исследований других авторов в данном научном направлении.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: HOLOEXPO 2018, XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, (Нижний Новгород, 2018 г.); HOLOEXPO 2020, XVII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, (Москва, 2020г.); VII Международная конференция и молодежной школа "Информационные технологии и нанотехнологии" (ИТНТ-2021, Самара); IX Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2023, Самара); XII международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 9 статей опубликованы в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Web of Science, Scopus и рекомендованных ВАК РФ; получены 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 3 работы опубликованы в иных рецензируемых изданиях.

Личный вклад автора

Личный вклад соискателя состоит в определяющем участии соискателя в создании и исследовании работы экспериментальных образцов ГСА, рефракционно-дифракционного объектива, получении исходных данных для отработки алгоритмов классификации, сборке датасета по растениям, датасета по почвам из гиперспектральных изображений, используемых для машинного обучения, проведении моделирования, а также в разработке и настройке оптического оборудования, необходимого для экспериментальных установок и проведении натуральных экспериментов, личном участии в апробации результатов исследования.

Структура и объем диссертации

Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка основных сокращений и обозначений, списка литературы из 135 наименований, шести приложений. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, включающего 36 рисунков, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы научно-квалификационной работы, приведён обзор существующих работ, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы и их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В **первой главе** проведено исследование с помощью ПО Zetax и анализ частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) ГСА на основе схемы Оффнера с различными углами зрения входных объективов.

Анализ ЧКХ показал, что расширение поля зрения всего лишь до 10° привело к сокращению предельной разрешаемой частоты с в 2-3 раза. (со 110мм-1 до 30-50 мм-1) Поэтому стремиться к высокому разрешению по спектру, не имеет смысла, ГСИ будут иметь реально высокое разрешение только по центру кадра, спектральное разрешение к краям кадра будет снижаться. При этом пространственное разрешение будет достаточно хорошим по причине близости объектов при наземном размещении. Простой расчет параметров объектива изображающего спектрометра можно сделать на основе пространственных параметров снимаемых объектов и пространственных параметров современных светочувствительных матриц. Минимальное фокусное расстояние объектива f можно оценить по формуле

$$f=L/\Delta s \cdot A \quad (1)$$

где L – расстояние до объекта съемки, Δs – размер листа, A – размер светочувствительного элемента. Обычно минимальный размер листьев основных сельскохозяйственных культур выращиваемых в России составляет около 2см. Размер светочувствительного элемента в современных камерах около 5мкм. При средней дистанции съемки от 10 до 100м нужен объектив с фокусным расстоянием от 2,5 мм до 25мм соответственно.

Еще одним результатом ухудшения частотно-контрастной характеристики является снижение реального количества спектральных каналов, которое в таком спектрометре для наземной съемки будет составлять не более 80-120. В таком случае в диапазоне длин волн 0,4-1,0 мкм, если исходить из ширины канала в 10нм, то потребуется ГСА у которой всего 60 спектральных каналов, при ширине 5нм эта оценка увеличивается до 120 спектральных каналов.

В **первой главе** также проведен анализ ряда вегетационных индексов, в том числе широкополосных и узкополосных которые известны из статей посвященных исследованию состояния растений по данным ДЗЗ. Наиболее близкорасположенные каналы при расчетах таких индексов тем не менее отстают друг от друга не менее чем на 30нм. Что можно также косвенно учесть при создании ГСА для оценки состояния растений. В качестве примера можно привести вегетационный индекс такой, как Флавоноловый отражательный индекс

$$FRI = C_3 + \left(\frac{1}{I_{410}} - \frac{1}{I_{460}} \right) \times I_{800} \quad (1),$$

где $C_3 = 0,5 - 0,7$. Он показывает содержания флавонолов (желто-оранжевых растительных пигментов), накопление которых является признаком угнетения растений и замедления их роста. Для расчета этого индекса используются каналы, соответствующие длинам волн 410 и 460 нм, которые будут хорошо разрешаться даже ГСА имеющей всего лишь 60 спектральных каналов с шириной канала в проекции на пиксель 10 нм. Особенностью ГСА с ограниченным количеством спектральных каналов можно также отметить возможность получения необработанных исходных изображений для формирования гиперкубов по схеме Poshbroom с повышенной частотой в следствии

снижения информационных пикселей в зоне интереса на светочувствительном сенсоре, уменьшение информационного потока и как следствие вычислительной нагрузки. Всего этого можно добиться, используя относительно низкочастотные дифракционные решетки с периодом 10-20 мкм, технология изготовления которых может быть значительно упрощена.

Во **второй главе** рассматривается методика определения влажности почвы по гиперспектральным изображениям, снятым с наземной поворотной платформы, а также с дождевальными машинами в качестве носителя.

Обычно для оценки влагосодержания в почве используются сведения о том, что в спектре отражения от земной поверхности присутствуют линии поглощения воды и паров воды в атмосфере. Наиболее сильное поглощение электромагнитного излучения происходит водными объектами (реки, озера) далее растения, имеющие значительное содержание влаги в листовой поверхности, и затем почвы. Обычно для оценки влаги используют такие вегетационные индексы как широко известный NDWI или нормализованный инфракрасный индекс разности NDII (normalized difference infrared index), который определяется по формуле

$$NDII = \frac{I_{860} - I_{1640}}{I_{860} + I_{1640}} \quad (2)$$

где I_{860} , I_{1640} – яркости спектральных каналов на длинах волн 860нм и 1640нм, соответственно. NDII подобен NDWI за исключением того, что он использует более сильную полосу поглощения воды (канал, центрируемый около 1,64 мкм). Как видно они используют линии воды расположенные в КИК диапазоне

Таким образом, единственным доступным для вычисления индексом из широко описываемых в литературе для определения влажности растительности из диапазона 0,4-1,0 мкм остается водный индекс WBI. Для оценки эффективности его применения были проведены экспериментальные съемки с использованием ГСА на опорно-поворотной платформе. Эксперимент проводился автором в ООО «Агропредприятие «Бессергеновское» Октябрьского района Ростовской области на посевах лука репчатого и посадках картофеля. Измерения проводили до полива при влажности почвы 80 % НВ (80 % наименьшей влагоемкости) в слое глубиной до 0,4 м и непосредственно после полива. Почвенный покров однороден и представлен лугово-черноземными почвами.

Полученные ГСИ были намеренно ограничены 250 спектральными каналами, равномерно распределенными в диапазоне 420-970 нм.

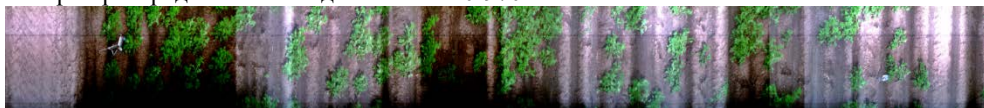


Рисунок 1 – Пример RGB реконструкции одного из снятых экспериментальных ГСИ

Гиперспектральная камера на основе схемы Оффнера использовалась для получения ГСИ экспериментальных участков поля с произрастающими на них растениями.

Камера устанавливалась на штатив с опорно-поворотной платформой с возможностью регулировки высоты установки и угла наклона, а также с возможностью установить угловую скорость вращения камеры (рисунок 2).



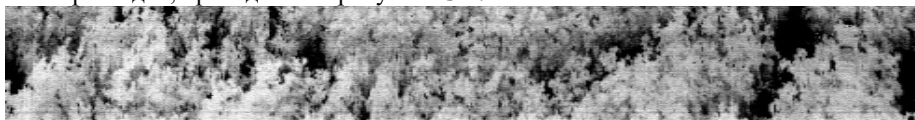
(а)



(б)

Рисунок 2 – Экспериментальный участок для проведения экспериментов: (а) место съемок на картах, (б) внешний вид гиперспектрметра на вращающейся установке для полевых исследований

Предварительно была проведена калибровка коэффициентов спектральной яркости, где в качестве эталона использовались спектральные данные монохроматора-спектрографа Sol Instruments MS5204i со спектральным разрешением не хуже 0,05 нм/пкс. Калибровка положения каналов с высокой точностью осуществлялась с использованием лазеров с длинами волн 532 нм, 632.8 нм, а также лазера с перестраиваемой длиной волны EKSPLA NT242. Результаты съемки одних и тех же участков до полива растений и после полива через 2 дня, приведены на рисунках 3-4.



а)

Рисунок 3 – Распределение индекса влажности WBI по изображению растительности (картофель) (а)

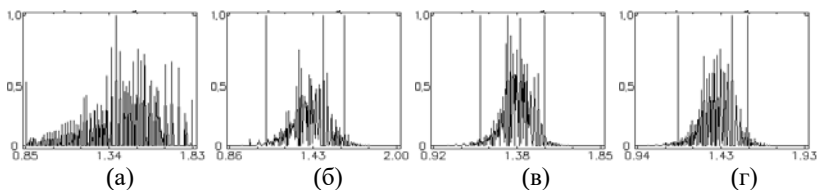


Рисунок 4 – Гистограммы распределения индекса влажности по ГСИ на

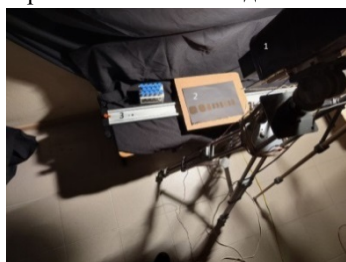
экспериментальных участках (а) картофеля до полива (влажность почвы 80% НВ), среднее WBI 1,34, (б) картофеля после полива (влажность почвы 100% НВ), среднее 1,43, (в) лука до полива (влажность почвы 80% НВ), среднее 1,38, лука после полива, среднее значение индекса 1,43 (влажность почвы 100% НВ)

Как видно, анализируя распределения на гистограммах индекса WBI соответствующих изображений, среднее значение, а также максимальное значение индекса на изображениях после орошения претерпевают заметное увеличение по всем исследуемым культурам.

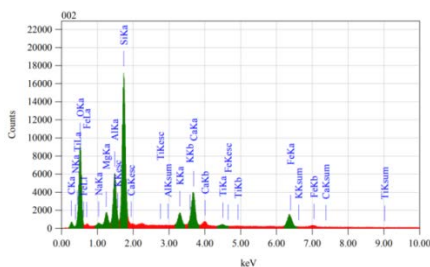
Таким образом, экспериментально показана возможность оценивать необходимость орошения сельскохозяйственных культур по данным съемки с ГСА на опорно-поворотной платформе, где в качестве критерия принятия решения можно использовать

вегетационные индекс WBI.

В **третьей главе** рассматривается методика оценки содержания углерода и кальция в почвах на основе данных, полученных с использованием сканирования поверхности почв разработанной ГСА для наземной съемки. Съемка проводилась в лабораторных и в полевых условиях. Анализ ГСИ и полученных спектральных сигнатур не выявил явных различий спектральных свойств отражения среди почв одного типа с различным содержанием углерода. Выявить по этой причине индексную формулу для классификации разных типов почвы с высокой степенью достоверности также не удалось. Поиск индекса проводился по формуле разностно-нормализованного типа и индекса отношения для всех 250 спектральных каналов. Для дальнейшего исследования было решено использовать нейросетевые алгоритмы дополненные ансамблями бинарных классификаторов с нормализацией и предварительной обработкой для нормировки освещения, удалению полос. Была предложена методика нейросетевой классификации, основанной на обработке ГСИ предварительно приготовленных сухих образцов почв с использованием экспериментального образца ГСА, разметка и обучение на относительно небольшой выборке данных. Разметка проводилась на классы на классы трех градаций углерода (низкой содержание углерода, среднее и высокое). На рисунке 5, а приведена фотография экспериментального стенда.



(а)



(б)

Рисунок 5 – Фотография экспериментальной установки (а): 1 – гиперспектрометр, 2 – платформа с образцами, 3 – рельс системы перемещения платформы, характеристический спектр энергодисперсионного микроанализа образца почвы (б)

Также в **третьей главе** описан процесс получение исходного датасета, содержащий ГСИ, разметку данных и проведенные оценки элементного состава почв, выполненные с использованием энергодисперсионного микроанализа для обучения нейронных сетей. Для обучения нейронных сетей был использован датасет с суммарным количеством 1120000 гиперпикселей, соответствующие одному из трех классов градаций уровня содержания в образцах углерода и аналогично выполненный датасет размеченный на три градации уровня содержания кальция в почве. Градации соответствовали трем уровням содержания веществ, высокий, средний и низкий уровень. Полученный датасет и обученная на нем сверточная нейронная сеть для классификации почв по уровню углерода позволила проводить классификацию почв с точностью до 96%.

Для примера на рис. 7 показано полное изображение 9 образцов почвы на 240-ом спектральном слое, что соответствует длине волны 956nm.

Для обучения нейронных сетей был использован датасет с суммарным количеством 1120000 гиперпикселей, соответствующие одному из трех классов градаций уровня содержания в образцах углерода и аналогично выполненный датасет размеченный на три градации уровня содержания кальция в почве. Градации соответствовали трем уровням содержания веществ, высокий, средний и низкий уровень. Полученный датасет и

обученная на нем нейронная сеть для классификации почв по уровню углерода позволила проводить классификацию почв с точностью до 96%.

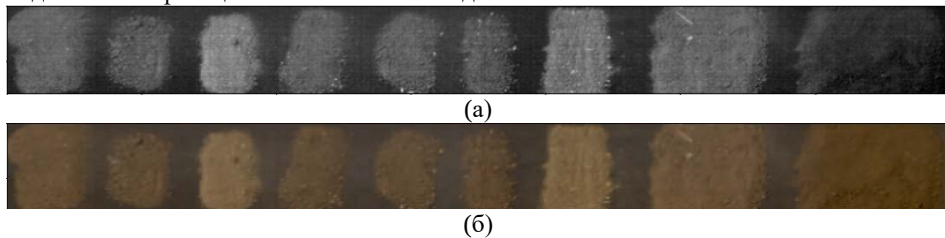


Рисунок 6 – Гиперспектральное изображение 9 образцов почв: 240 слой гиперкуба длина волны 956 нм (а), цветосинтезированное изображение на основе трех каналов, соответствующих цветам RGB (б) (красный – 635 нм, зеленый – 534 нм, синий – 485 нм)

Четвёртая глава посвящена разработке рефракционно-дифракционного объектива где дифракционная линза используется для компенсации хроматических аббераций в заданном спектральном диапазоне. Основную оптическую силу объектива в таком случае несет классическая рефракционная линза. Представлено математическое описание рефракционно-дифракционного объектива, которое положено в основу моделирования полихроматической функции рассеяния точки в любой заданной области поля зрения объектива в составе ГСА с широким угловым полем. В качестве критерия оптимизации использовалось условие ахроматизации (равенство фокусных расстояний системы из двух линз при двух длинах волн. Формула описывающая фокусное расстояние рефракционной линзы на длине волны λ_1 выглядит таким образом

$$f(\lambda_1) = \frac{R_1 R_2 n(\lambda_1)}{[n(\lambda_1) - 1][n(\lambda_1)(R_1 + R_2) - d(n(\lambda_1) - 1)]} \quad (3)$$

где R_1 – радиус кривизны первой поверхности, R_2 – радиус кривизны второй поверхности, d – толщина линзы, $n(\lambda_1)$ – показатель преломления на длине волны λ_1 .

Для дифракционной линзы фокусное расстояние будет определяться формулой

$$f^d(\lambda_1) = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_1} \quad (4)$$

Где λ_0 – расчетная длина волны, f_0 – расчетное фокусное расстояние. Точно так же для длины волны λ_2 можно записать формулы

Фокусное расстояние оптической системы из дифракционной и рефракционной линз можно описать формулой

$$F = \frac{ff^d}{f + f^d - D} \quad (5)$$

Таким образом, получим

$$f_0 = \frac{2 \cdot \{f(\lambda_1)f(\lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_2) - d \cdot [f(\lambda_2)\lambda_2 - f(\lambda_1)\lambda_1]\}}{(\lambda_1 + \lambda_2)[f(\lambda_1) - f(\lambda_2)]} \quad (6)$$

Исходя из приведенных формул, можно рассчитать параметры рефракционно-дифракционного дублета.

Моделирование по этим формулам проводилось в программе HARMONY. Так для рефракционной выпукло-плоской линзы с фокусным расстоянием 75мм из стекла марки ВК7, оптимизация в программе HARMONY дала значение фокусного расстояния дифракционного корректора $f_0=626$ мм. Кроме этого в программе HARMONY осуществлялась оптимизация ширины внеосевой функции рассеяния точки. В качестве параметров оптимизации выступали высоты микрорельефа в каждой дифракционной зоне. Высота каждой дифракционной зоны рассматривалась как отдельная координата и оптимизация велась методом покоординатного спуска.

На рисунке 7 приведены изображения функции рассеяния точки для системы из рефракционной и дифракционной линз, которая описана выше, до и после оптимизации соответственно.

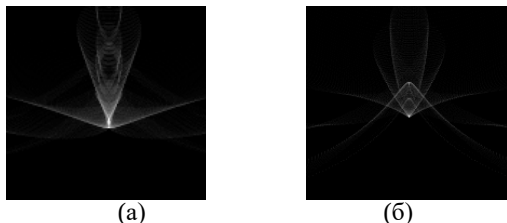


Рисунок 7 – Функция рассеяния точки 8° от оси до оптимизации (а) и после оптимизации (б) в квадрате 64×64 мкм

Для экспериментальных исследований разработанный объектив был изготовлен и исследован. С помощью данного объектива были получены и проанализированы изображения мира специальным ПО, позволяющим оценить ЧКХ (рисунок 8).



Рисунок 8 – Внешний вид рефракционно-дифракционного объектива в пластиковом корпусе (а) и мира для эксперимента с гибридным объективом (б), экспериментально полученное изображение мира (в)

Эксперимент с изготовленным на основе проведенного расчета объективом, показал, что этот объектив помимо уменьшенной хроматической аберрации имеет существенно меньший уровень внеосевых геометрических аберраций. В **Заключении** представлены основные результаты работы и даны рекомендации по дальнейшей разработке темы.

Заключение

В диссертации предложены, теоретически и экспериментально обоснованы изображающий гиперспектрометр наземного размещения и методики его применения для бесконтактного контроля вегетационных индексов растительности и оценки содержания влаги, углерода и кальция в почвах.

Основными результатами работы являются:

1. Определены особенности использования ГСА наземного размещения, связанные с существенным расширением поле зрения по сравнению с ГСА космического или авиационного базирования ($10\text{--}20^\circ$ по сравнению с $1\text{--}5^\circ$). Показано что несмотря на 2-3 кратное снижение спектрального разрешения вследствие увеличения внеосевых аберрационных искажений в оптической системе достаточно для получения необходимой ширины спектральных каналов для вычисления узкополосных индексов в 5-10 нм, используемых в задачах определения параметров природных объектов.

2. Разработан и исследован рефракционно-дифракционный объектив гиперспектрометра с оптической схемой, сформированной методом оптимизации параметров по критерию ширины ФРТ, полученной методом трассировки лучей, который имеет полностью скомпенсированную хроматическую аберрацию по границам заданного спектрального диапазона от 0,4-1,0 мкм и снижает в 2-3 раза уровень внеосевых аберраций по сравнению с аберрациями, одиночной сферической линзы с тем же фокусным расстоянием.

3. Разработана и экспериментально исследована методика косвенной оценки влажности почв, в результате чего показано, что на основе гиперспектральных

изображений и последовательном использовании вегетационного индекса NDVI для выявления растительности и далее применением индекса влагосодержания в растениях WBI, рассчитываемого на основе спектральных яркостей на длинах волн 900нм и 970нм, как единственного доступного при использовании простой ГСА, позволяет определять влагу в почвах в бинарном режиме: влажные, сухие, что достаточно для технических установок используемых в точном сельском хозяйстве и дает возможность отказаться от использования сложной двухдиапазонной ГСА для определения влажности почвы традиционными методами, основанными на использовании индексных формул со спектральными каналами соответствующими длинам волн поглощения воды 1240нм, 1630нм, 2130нм.

4. Разработана и экспериментально исследована пригодная для практического применения методика разделения открытых почв сельскохозяйственного назначения на три класса по содержанию углерода и кальция (мало, норма, много), основанная на обработке данных гиперспектрального анализа почв в сверточной нейросети, обученной на экспериментально полученном датасете с суммарным количеством 112000 гиперпикселей, элементный состав которого валидирован методом энергодисперсионного микроанализа.

Результаты получили внедрения в научно-исследовательской деятельности в СамГАУ, РосНИИ ПМ, ООО «Локус». Разработанная маломассогабаритная ГСА наземного размещения с рефракционно-дифракционным объективом тиражирована опытной серией и нашла применение для контроля состояния почв и растений, влажности почв, а также в образовательном процессе по точному земледелию и позволяет развивать. В связи с внедрением технологии оценки растений, почвы с использованием данных с ГСА, актуальны дальнейшие работы по исследованию ее возможности применения в других задачах распознавания, классификации и оценки на основе пространственно-спектральных признаков.

Результаты диссертационной работы также использованы при выполнении различных НИР и ОКР, а также в междисциплинарном проекте в рамках гранта РНФ №20-69-47110 «Система мониторинга сельскохозяйственных показателей в видимом, инфракрасном и гиперспектральном режимах съемки».

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, реферируемых Scopus, WoS

1. Ivliev NA, **Podlipnov VV**, Skidanov RV. A compact imaging hyperspectrometer. J Phys Conf Ser 2019; 1368(2): 022053. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022053
2. Kazanskiy N., Ivliev N., Skidanov R., **Podlipnov V**. An airborne offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements. Sensors. 2020. Т. 20. № 12. С. 1-10.
3. **Подлипов В.В.**, Скиданов Р.В. Калибровка изображающего гиперспектрметра Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 6. С. 869-874.
4. **Подлипов В.В.**, Щедрин В.Н., Бабичев А.Н., Васильев С.М., Бланк В.А. Экспериментальное определение влажности почвы по гиперспектральным изображениям Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 5. С. 877-884.
5. Фирсов Н.А., **Подлипов В.В.**, Ивлиев Н.А., Николаев П.П., Машков С.В., Ишкин П.А., Скиданов Р.В., Никоноров А.В. Нейросетевая классификация гиперспектральных изображений растительности с формированием обучающей выборки на основе адаптивного вегетационного индекса Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 6. С. 887-896.
6. Gaidel A.V., **Podlipnov V.V.**, Ivliev N.A., Paringer R.A., Ishkin P.A., Mashkov S.V., Skidanov R.V. Agricultural plant hyperspectral imaging dataset Computer Optics. 2023. Т. 47. № 3. С. 442-450.
7. Фирсов Н.А., **Подлипов В.В.**, Ивлиев Н.А., Рыськова Д.Д., Пирогов А.В., Музыка А.А., Макаров А.Р., Лобанов В.Е., Платонов В.И., Бабичев А.Н., Монастырский В.А., Ольгаренко В.И., Николаев П.П., Скиданов Р.В., Никоноров А.В., Казанский Н.Л., Соيفер В.А. Ансамбли спектрально-пространственных сверточных нейросетевых моделей для задачи

классификации типов почв на гиперспектральных изображениях Компьютерная оптика. 2023. Т. 47. № 5. С. 795-805.

8. Evdokimova Vv., **Podlipnov V.V.**, Ivliev N.A., Petrov M.V., Ganchevskaya S.V., Fursov V.A., Yuzifovich Y.Y., Stepanenko S.O., Kazanskiy N.L., Nikonorov A.V., Skidanov R.V. Hybrid refractive-diffractive lens with reduced chromatic and geometric aberrations and learned image reconstruction. Sensors. 2023. Т. 23. № 1. С. 415.

9. Скиданов Р.В., Ганчевская С.В., Васильев В.С., **Подлипнов В.В.** Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе дифракционных линз, корректирующих aberrации Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 4. С. 443-447.

Патенты Российской Федерации

10. Патент на изобретение 2825084 Российская Федерация. Простейший изображающий гиперспектрометр для съемки близкорасположенных объектов. / Р.В. Скиданов, Н.А. Ивлиев, **В.В. Подлипнов**, М.А. Маркушин, Ю.В. Ханенко, А.С. Пронин; заявитель и патентообладатель Самарский Университет №2023130286; заявл. 20.11.2023. опубл. 19.08.2024.

11. Патент на полезную модель 229845 Российская Федерация. Гиперспектральная камера на основе схемы Оффнера для беспилотных летательных аппаратов. / А.В. Никоноров, Н.А.Фирсов, Р.В. Скиданов, Н.Л. Казанский, Н.А. Ивлиев, **В.В. Подлипнов**, М.А. Маркушин, Ю.В. Ханенко; заявитель и патентообладатель Самарский Университет №2024123613; заявл. 15.08.2024. опубл. 30.10.2024.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

12. Свид. 2024610276 Российская Федерация. Программа определения степени засоренности посевов сельскохозяйственных культур по гиперспектральным данным сверхвысокого разрешения / Петров М.В., Фирсов Н.А., Макаров А.Р., Ивлиев Н.А., **Подлипнов В.В.**, Никоноров А.В. заявитель и патентообладатель ФИЦ ИУ РАН №2023688778; заявл. 15.12.2023. опубл. 09.01.2024.

13. Свид. 2024610356 программный модуль "Гипер" Скиданов Р.В., Ивлиев Н.А., **Подлипнов В.В.** заявитель и патентообладатель ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» №2023688609; заявл. 19.12.2023. опубл. 10.01.2024.

Публикации в прочих изданиях

14. Скиданов Р. В., Ганчевская С. В., **Подлипнов В. В.** Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе кольцевой гармонической линзы // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 60–65 (ISBN 978-5-7038-5516-4).

15. Безус Е. А., Досколович Л. Л., Скиданов Р. В., Бланк В.А., Ганчевская С.В., **Подлипнов В.В.**, Быков Д.А., Головастиков Н.В. Расчёт и исследование "спектральных" дифракционных линз, фокусирующих излучение различных длин волн в различные точки // XII международная конференция по фотонике и информационной оптике : Сборник научных трудов, Москва, 01–03 февраля 2023 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2023. – С. 40-41. – EDN MFBFRFR.

16. Щедрин В.Н., Васильев С.М., Бабичев А.Н., Скиданов Р.В., **Подлипнов В.В.**, Журавель Ю.Н. Наземная гиперспектральная аппаратура для измерения вегетативных индексов в задачах прецизионного орошения сельскохозяйственных культур. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2018. № 1 (29). С. 1-14.