

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Подлипнов 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**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Скиданов Роман Васильевич,
доктор физико-математических наук,
доцент

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Методика гиперспектрального мониторинга и научное обоснование требований к ГСА в условиях наземной съемки природной среды	17
1.1 Особенности гиперспектральной съемки и требования к техническим характеристикам компактной наземной ГСА	18
1.2 Вегетационные, почвенные и водные индексы	34
1.3 Выводы к главе 1	40
Глава 2. Оценка вегетационных показателей растениеводства сельскохозяйственных (полевых) культур по гиперспектральным изображениям	42
2.1 Анализ методов оценки состояния сельскохозяйственных культур с использованием спектральных признаков.....	43
2.2 Экспериментальное определение влажности почвы по гиперспектральным изображениям снятым с наземной поворотной платформы	48
2.3. Выводы к главе 2.....	64
Глава 3. Оценка параметров почв сельскохозяйственного назначения по гиперспектральным изображениям.....	65
3.1. Формирование гиперспектральных изображений.....	70
3.2. Гиперспектральные индексы для почвы	76
3.3 Нейросетевая классификация	78
3.4. Выводы к главе 3.....	86
Глава 4. Рефракционно-дифракционный объектив с минимизированным уровнем внеосевых геометрических аберраций	88

4.1 Анализ изображающих дифракционно-оптических систем для формирования изображений	88
4.2. Расчет и моделирование дифракционной линзы для компенсации хроматической аберрации в составе рефракционно-дифракционной оптической системы.....	91
4.3 Экспериментальное исследование рефракционно-дифракционной изображающей системы	97
4.4 Экспериментальное исследование рефракционно-дифракционных изображающих оптических систем.....	103
4.5. Выводы к главе 4.....	109
Заключение	110
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	114
Приложение А. Акт о внедрении результатов диссертации в опытно-конструкторской работе	131
Приложение Б Акты о внедрении результатов диссертации в научно-исследовательской работе	133
Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс	135
Приложение Г. Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	136
Приложение Д. Патент на изобретение	138
Приложение Е. Патент на полезную модель.....	139

Введение

Диссертация посвящена созданию гиперспектральной аппаратуры (ГСА) с расширенным угловым полем зрения для наземного использования. На основе гиперспектральных изображений (ГСИ) получаемых с использованием указанной ГСА разработаны методики оценки состояния растительности, почвы, влагосодержания в почве, а также углерода и кальция.

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 ее плодородие, 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, 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 решениях, 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, необходимых для анализа полученных данных, их изменения 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, 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 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 аббераций, 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 1-14мкм.

Одним из возможных путей решения проблемы мониторинга состояния природной среды может быть использование дистанционного зондирования такими методами как, например, метод радиолокации (СВЧ радиометрией или радарам 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 различные 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 аберрациями. 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 аберрацией использование дифракционных линз позволяет компенсировать сферическую аберрацию. 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 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 aberrаций 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.

Цель и задачи

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 0,4 мкм до 1 мкм, 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 0,4 мкм до 1 мкм.

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

1. Обоснована возможность достоверного определения параметров природных объектов на открытой почве с помощью специализированной ГСА наземного базирования с полем зрения $10-20^{\circ}$, обеспечивающей формирование 60-120 спектральных каналов в диапазоне 400-1000 нм.

2. Предложена 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. Разработана 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. 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.

Теоретическая значимость

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 aberrаций и геометрических искажений.

Практическая значимость

Практическая значимость исследования заключается в возможности Мобильного кроссплатформенного ГСА, использования 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 программнотехнического 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.

Основными результатами работы являются:

1. Обоснование возможности достоверного определения параметров природных объектов на открытой почве с помощью специализированной ГСА наземного базирования с полем зрения 10-200, обеспечивающей формирование 60-120 спектральных каналов в диапазоне 400-1000 нм.

2. 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 700 нм а также 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.

Методология и методы исследования.

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, разработанного автором, в основе которого лежат методы геометрической и дифракционной оптики, ПО для расчета гиперспектральных индексов «ГИПЕР», которое позволяет рассчитывать нормализованные разностные индексы и индексы отношения.

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 натурных экспериментов, личном участии в апробации результатов исследования.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов работы подтверждается экспериментальными исследованиями, подтверждающими основные

теоретические положения диссертации, не противоречащие результатам исследований других авторов в данном научном направлении.

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 молодёжной школа "Информационные технологии и нанотехнологии" (ИТНТ-2021, Самара); IX Международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2023, Самара); XII международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва.

Публикации по теме диссертации

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.

Структура и объем диссертации

Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырёх 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.

Глава 1. Методика гиперспектрального мониторинга и научное обоснование требований к ГСА в условиях наземной съемки природной среды

Современное природопользование при выполнении хозяйственной деятельности несет в себе по многим причинам антропогенную нагрузку на многие объекты природной среды. Регулирование и контроль этой деятельности осуществляется на основе нормативно-правовых актов, таких как федеральный закон «Об охране окружающей среды», Парижское соглашение по климату ООН (подписано Россией в 2016), Конвенция о биологическом разнообразии (Ратифицирована в России в 1995). Важнейшей составляющей мероприятий по снижению антропогенной нагрузки способствующей изменению климата является снижение выбросов парниковых газов за счет сохранения лесов, применения ресурсосберегающих и экологически безопасных агротехнологий, сохранение почв, углерода в них и их плодородия. Большое количество информации в вопросах изменения климата сейчас поступает от глобальных платформ дистанционного зондирования земли агрегирующих информацию об атмосфере, земле, состоянию городской среды, морей, океанов, что позволяет отслеживать процессы изменения климата. В большинстве своем информация поступает от таких спутниковых группировок как Sentinel, серий 1-3 и 5P, Landsat, Modis. Однако в последние годы наблюдается практически экспоненциальный рост упоминаний в литературе об использовании гиперспектрального ДЗЗ из космоса, авиационными средствами и на Земле, на наземных носителях. Научные исследования посвящены как разработке специализированной гиперспектральной аппаратуры, так и различным подходам к обработке данных, выполнению классификации объектов, поиску объектов по

спектральным сигнатурам или использованию ГСА для определения различных показателей таких объектов природной среды как почвы, растительность и водные объекты. Гиперспектральные методы в отличие от мультиспектральной или многозональной съемки во многом позволяют осуществлять это более точно, более стабильно, ориентируясь на большое количество каналов. Важнейшим показателем природной среды для обеспечения стабильной вегетации растительности является вода и влага в почвах. Однако, не смотря большое количество публикаций посвященных оценки вегетации растений, вычислению водных индексов, почвенных индексов все еще не решена задача их оперативного получения, использования, принятия решений на их основе в непосредственной близости к объекту исследования для задач точного земледелия. Такое зондирование в научной литературе получило название «проксимальное» зондирование, что делается также с целью выделить его особенности связанные как с процессом получения данных, так и особенностями которые возникают в виде специфических пространственных искажений, особенностями спектральных характеристик из-за влияния ракурса съемки, который чаще всего невозможно осуществлять в надире, особенностями освещения или неравномерности засветки. В некоторой степени это относится и к съемки с БПЛА. При этом ГСА для осуществления проксимального зондирования также имеет особенности в виде необходимости использования более простых широкоугольных объективов, а сама ГСА должна быть маломассогабаритной. Каким образом сказываются эти изменения в ГСА на получаемые данные в известных исследованиях не уделяется должного внимания.

1.1 Особенности гиперспектральной съемки и требования к техническим характеристикам компактной наземной ГСА

Одним из путей решения проблемы оценки состояния почвы, а именно оценки содержание углерода и влажности, является применение оптической

спектроскопии [1-2]. Оптическая спектроскопия, равно как и фотометрия, и колориметрия может использоваться как косвенный метод для определения некоторых физико-химических характеристик почв [3]. Другое направление применения оптической спектроскопии для косвенной оценки состояния почвы основано на том принципе, что влажность почвы, а также содержание в ней углерода и других минералов, необходимых для питания и роста растений, существенно влияет на вегетационные показатели растений, их отражательную способность в красном и инфракрасном диапазонах, содержание каротиноидов, антоцианов, хлорофилла, что и позволяет, оценивая вегетационные индексы растений, судить о тех или иных недостатках питания растений, заболеваний или других повреждений растений. В качестве элементов сенсорики в таких применениях выступают неизображающие спектрометры, которые необходимо для получения спектров отражения листовой поверхности направлять непосредственно к листу и изображающие спектрометры, которые получают пространственную и спектральную информацию одновременно. Изображающие спектрометры с количеством спектральных каналов более 100 называют гиперспектрометрами и имеют в подавляющем большинстве сканирующий тип съемки известный как «push-broom». Использование изображающей спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения при наземной съемки или съемки с БПЛА позволяет на основе пространственной информации проводить классификацию типов подстилающей поверхности, объектов, текстур, повышая, тем самым информативность данных, а использование их на различных носителях, в том числе и наземных, повышает оперативность получения данных, вплоть до обработки данных он-лайн [4-6].

В последнее десятилетие бортовые, мобильные изображающие системы ГСА стали использоваться как один из ведущих элементов ДЗЗ из космоса и БПЛА для задач применения в сельском хозяйстве [7-11]. ГСА для мониторинга растительности и почвы сочетает в себе многие преимущества

РСА, однако существенным преимуществом ГСА является возможность работы на широком диапазоне дистанций съемки, широкий диапазон углов обзора, существенно меньшие габариты, масса и энергетические затраты.

В настоящее время гиперспектральная аппаратура (ГСА) используется в четырех основных вариантах установки. Первый вариант можно назвать классическим, это установка ГСА на орбитальные платформы, второй вариант – установка ГСА на авиационные носители, третий вариант – использование ГСА на беспилотных летательных аппаратах, наконец, четвертый вариант это съемка непосредственно на поверхности Земли, как в полевых, так и в лабораторных условиях.

Потенциально всем перечисленным требованиям удовлетворяют методы мониторинга на основе данных с ГСА с наземных платформ в непосредственной близости.

Известны работы, в которых описаны конструкции гиперспектрометров со сниженными массогабаритными характеристиками для применения на беспилотных летательных аппаратах, на наземных вращающихся платформах [1-16], что достигается чаще всего упрощением компоновки, конструкции и оптической схемы с приведением характеристик ГСА к минимально необходимыми для выполнения задач. ГСА с высоким спектральным разрешением имеют большее число каналов, а соответственно в каждом отдельно взятом канале регистрируемая яркость снижается пропорционально их числу. В данных системах всё большее значение приобретает требование получения данных с большей частотой фиксации кадра сенсором для оперативной съемки больших площадей или протяженных объектов, что требует уменьшения числа каналов. Данные камеры работают преимущественно в диапазоне 400-1000 нм. Однако отсутствуют работы, в которых бы была проведена оценка влияния изменений параметров гиперспектральной съемки, параметров самой ГСА, влияние на оценки

показателей почвы и растений при переносе ГСА на БПЛА или наземные платформы, что снижает практическую ценность получаемых результатов.

В основе оптической системы любого ГСА лежит дисперсионный элемент (чаще всего используется или призма или дифракционная решётка) и матричный сенсор регистрирующий сигналы. Они в наибольшей степени определяют спектральное и пространственное разрешение ГСА [17]. Если в качестве дисперсионного элемента используются решетки, то их частота обычно не более нескольких десятков линий на миллиметр. Высокочастотные дифракционные решетки (200-2000 линий на миллиметр) вносят существенные абберационные искажения в формируемое изображение. Использование радиально несимметричных дисперсионных элементов в изображающих системах в таком случае формирует более широкую ФРТ во внеосевых областях, что приводит к снижению спектрального и пространственного разрешения. Для обеспечения высокой частоты съемки ГСА, а также для снижения негативного абберационного искажения пространственно-спектральной информации используются дисперсионные элементы с небольшой угловой дисперсией, что также говорит о необходимости ограничить количество каналов минимально необходимым числом. Снизить абберационные искажения можно за счет использования дифракционных решёток на криволинейных поверхностях в схеме Оффнера [18] или в схеме Дайсона [19] или подбором специального дизайна дифракционной решетки со свободной формой [20]. Преимущества специального дизайна решетки, однако, зачастую приводит к неоправданным сложностям юстировки оптических элементов ГСА, повышенным требованиям к конструкционным элементам и др. [20].

Ввиду особенностей оптической схемы и формирования изображения каналы гиперспектрального изображения (ГСИ), получаемого с ГСА частично или полностью могут быть не «чистыми», что определяется отсутствием или наличием спектрального перемешивания. Для примера можно рассмотреть

идеальную ГСА, в которой размер пикселя светочувствительной матрицы, отвечающей за регистрацию спектральной информации от разложения щелевой диафрагмы, которая также имеет проективный размер на матрице не более 1 пикселя. Однако, размер FWHM (full width at half maximum с англ. полная ширина на полувысоте) на изображении с матрицы не будет превышать 1 пикселя только в том случае, если ФРТ для всех длин волн спектрального диапазона ГСА также не превышает 1 пикселя. В таком случае, можно предположить, что параметры дифракционной решетки могут быть оптимизированы для получения разложения длин волн 400-1000 нм в области матрицы шириной, например, 100 пикселей для получения чистых 100 каналов ГСА с параметром FWHM не более 6 нм. Дифракционная решетка на поверхности выпуклого зеркала в оптической схеме Оффнера, расширяет угловое поле лучей в ГСА после отражения от зеркала, чем усиливает внеосевые абберации. Наиболее характерна абберация дисторсия, которая визуально выглядит как искажение кривизны спектральной линии монохроматического света (лазера), известна как «Улыбка» (Smile), а также трапецеидальное искажение спектральной области (Keystone), визуально выглядящее как расширяющееся к области больших длин волн спектральное распределение, что в результате дает распределение интенсивности в спектральной области 400-1000 нм в виде трапеции. Таким образом, появление таких искажений уже может приводить к спектральному перемешиванию в области красных и ближних ИК длин волн. Также следует учитывать наложение вторых порядков на первый порядок длин волн в области 800-1000 нм. Однако, можно отметить возможность учета и программного исправления указанных искажений за счет обработки исходных изображений с матричного сенсора ГСА с точностью до 1 пикселя для устранения трапецевидных искажения и типа «Улыбка». В большинстве реальных приборов для увеличения количества света в ГСА малого формата щелевую диафрагму делают несколько шире 1 пикселя светочувствительной матрицы

(размер которой не более 1'' чаще всего), также существуют как погрешности изготовления оптических элементов, так и погрешности формирования решетки, локальные дефекты, погрешности периода, осевого расположения элементов, сама щелевая диафрагма выполненная на подложке в виде плоско-параллельной пластинки. Используемый объектив также формирует ФРТ конечной ширины. Все эти факторы в сумме существенно расширяют FWHM. Учитывая приведенный пример для получения высококачественной и высокоразрешающей ГСА следует руководствоваться достижением баланса между частотой решетки, вносящей дополнительные aberrации, технологическими ограничениями изготовления оптики, размером пикселя, ФРТ схемы Оффнера, количеством света, параметрами объектива. Распространяя приведенную аналогию на ГСА наземного применения, к которым требования оптического качества и требования спектрального и пространственного разрешения не столь высокие, а при этом также накладываются дополнительные требования достаточно высокого угла зрения объектива, можно отметить, что в таком случае влияние ФРТ объектива и углового поля на конечные характеристики ГСА будут иметь преобладающее влияние. Использование существенно более широкоугольных объективов приводит к более высокому уровню внеосевых aberrаций.

Для оценки параметров объектива и поиска баланса характеристик закладываемых в проектирование ГСА наземного применения рассмотрим основные сценарии использования и задачи. ГСА может применяться на подвижных движущихся носителях, таких как колесная техника, опрыскиватели, дождевальные машины, беспилотные летательные аппараты. В этом случае ГСА устанавливается для съемки вниз или под некоторым углом, а сканирование осуществляется непосредственно движением, угол ГСА может дополнительно стабилизироваться гироскопом. Другое применение может быть на основе стационарной установки ГСА на высоком штативе или вышке. Что позволяет сканировать пространство круговым вращением,

формируя круговую панораму относительно точки установки. Масштаб объектов на таких изображениях обеспечивает возможность классификация не только по типу объекта (дорога, почва, растение, вода), но и отдельные элементы растений (стебель, лист, плод и др.), что позволяет идентифицировать дополнительно тип растений, тип почвы, но в некоторых случаях также проводить диагностику состояния, например, оценивать фотосинтетическую активность хлорофилла в листьях растений, отклонения состояния от нормы в большую или меньшую сторону, обнаруживать и/или классифицировать мелкомасштабные повреждения, вызванные начальными стадиями деятельности бактерий, грибков или вредителей. Последние сценарии подразумевают использование ГСА на достаточно близком расстоянии, чтобы обеспечить высокую детализацию, а эффективное дополнительное освещение в ультрафиолетовом или синем диапазоне может позволить вызывать свечение хлорофилла растений, бактерий, грибков или водорослей. Такой сценарий может потребовать использование объективов с широким углом зрения. При этом объекты наблюдения на изображениях, как правило, могут занимать большое количество пикселей. В таком случае задача может разбиваться на подзадачи, такие как обнаружение объектов заданного класса (растение, почва, камень) но и определение его вида (пшеница, кукуруза, овес), а также анализ его состояния, отклонения от нормы.

Еще одной особенностью применения ГСА на Земле с широкоугольными объективами это возможный относительно высокий разброс расстояний от точки расположения ГСА до объектов на изображении. При разноракурсном наблюдении, например, или круговом сканировании пространства, возможно получение спектрально пространственной информации от объектов одного класса одного типа и размера в разном масштабе, который может отличаться до 2-5 раз, при этом от масштаба или угла наблюдения спектральная информация также искажается. Однако, в некоторых случаях, зависимость спектра от угла наблюдения, или некоторые

особенности такого искажения спектра также могут стать признаками для выделения слаборазличимых объектов.

Исходя из перечисленных методов контроля растений, вегетационных показателей, почв и влагосодержания в почве, их достоинств и недостатков, можно заключить, что к методам и техническим средствам контроля указанных параметров предъявляются следующие требования: оперативность получения информации, до несколько раз в день; пространственное разрешение при оценки влажности почвы, до 1м, и пространственное разрешение при оценки вегетационных индексов, 1-5 см.

Определяющую роль на качество гиперспектрального изображения (ГСИ) оказывает объектив ГСА, его разрешение во всем диапазоне длин волн и угол обзора, а также абберационные искажения. Этим и определяется трудность одновременного получения высокого пространственного и спектрального разрешения в сочетании с широким углом обзора. Критерием оптимальности подбора спектрального разрешения, пространственного разрешения, угла обзора является размер функции рассеяния точки (ФРТ), который должен быть желательно не более одного пикселя регистрирующего сенсора на всем спектральном диапазоне длин волн. Попытки адаптации ГСА на основе различных оптических схем проводились и ранее, причем как в направлении уменьшения угла зрения ГСА для создания специализированного гиперспектрометра для авиационного применения [21], так и в направлении расширения углового поля гиперспектрометра [22]. Это делает актуальной задачу создания относительно простого объектива с минимизацией внеосевых aberrаций. Наиболее просто реализовать такой объектив за счет совместного использования в оптической системе дифракционных и рефракционных элементов.

В настоящее время применение ГСА в составе космических аппаратов и БПЛА нашло широкое применение в задачах сельского хозяйства, однако эти задачи во многом схожи с задачами мультиспектральной съемки. Более

высокоразрешающие системы ГСА наземного применения имеют более широкие возможности. Среди задач известны задачи оценки стресса растений из-за недостатка питания минеральными элементами, повреждениями вредителями или микроорганизмами, или стресса вызванного недостатком или избытком влаги в почве. Последнее наиболее актуально в задачах интенсивного орошаемого земледелия, где оперативность и точность принятия решения о проводимых технологических операциях на поле может существенно сказаться на итоговом урожае.

Достаточно давно появился метод прямой оценки увлажнения открытой поверхности почвы по уровню отражения от ее поверхности, которая значительно падает при попадании воды на поверхность почвы любого типа (от чернозема до песчаного типа и известняка), для чего нет необходимости использовать спектроскопические методы. Однако для большинства задач важно знать не поверхностное увлажнение почвы а наличие влаги в слое почвы 0-40см, где находится корневая система растений большинства полевых культур. Технология оценки влагосодержания по анализу ГСИ обусловлена в физическом смысле отзывчивостью процессов фотосинтеза в живых растениях на ограничивающие факторы, в том числе влага, что приводит к снижению фотопоглощения растениями, активацией защитных функций, а следовательно изменению уровня отражения в красном и в коротковолновом инфракрасном диапазоне (КИК диапазон) [23-32]. Такой особенностью, как указывалось, обладают все живые растения, что обуславливает применение как для сельскохозяйственных задач [23-28], так и для мониторинга лесной растительности [29-31]. Значительное снижение влагосодержания в листовом покрове лесов и лесных почвах определяет уровень пожарной опасности, увеличение сухой и отмирающей биомассы, а также увеличивающийся диапазон разброса суточных температур за счет снижения уровня влаги испаряющейся с поверхности древостоя и лесных почв [29]. Использование гиперспектрального мониторинга растительности во многих сферах актуально

также и с точки зрения унификации методов получения и методов обработки информации получаемой дистанционно как с применением космических носителей ГСА, так и авиационных и ГСА установленных на БПЛА, а в некоторых применениях и наземными средствами базирования.

Однако следует заметить, что в случае космического базирования ГСА существует ряд недостатков. Во-первых, существует привязка к погодным условиям, наличию облаков и, следовательно, невозможно предугадать будут ли получена оперативная информации о состоянии поля в нужный срок. Во-вторых, часто на спутниковых снимках не достаточное разрешение, что приводит к существенному спектральному перемешиванию каналов, перемешиванию спектров растительности и других объектов, а поскольку для анализа влагосодержания в большинстве публикаций описано использование информации спектров ИК диапазона с длиной волны от 1,4 мкм до 3 мкм (КИК диапазон) [32-33], то в данном диапазоне разрешение еще хуже (обычно около 30-60м для многоканальных изображений и 60-100м для ГСИ).

Преодолеть эти ограничения, повысить оперативность и пространственное разрешение в таком случае можно только используя гиперспектральную аппаратуру в непосредственной близости от области интереса, например, установив ее на беспилотные воздушные средства, передвижные наземные машины или механизмы обеспечивающие орошение, но при этом, крайне нежелательно использовать матрицу КИК диапазона. Использование светочувствительных матриц КИК диапазона для космических носителей является обычным, тогда как для наземных средств или для съемки с БПЛА такие ГСА очень дорогостоящие изделия из-за стоимости сенсора диапазона до 2-3 мкм. ГСА с такими сенсорами обладает существенно худшими параметрами размерности по сравнению с матрицами видимого диапазона и большими габаритами.

Оценка состояния почвы может осуществляться косвенно по состоянию растительного покрова на ней. В случае монокультуры по ее состоянию

можно косвенно судить о параметрах почвы [34]. Недостаток питания минеральными веществами, как и влаги существенно сказывается на состоянии хлорофилла, антоцианов, каротиноидов и других пигментированных участках растений, осуществляющих активный рост, воздухообмен, образование плодов или семян. Оценку этого пигмента или влагосодержания в листьях, оценку динамики их изменения легко осуществлять, используя гиперспектральный мониторинг.

Результаты анализа ГСИ как с космических систем мониторинга так и систем на авиационных носителях, БПЛА и наземных могут быть включены в различного рода географические информационные системы, что позволяет отслеживать также временные изменения, проводить диагностику растительности на поле как один из элементов системы точного (координатного) земледелия (ТЗ), мониторинг водоемов [35-36].

Использование ГСА в космосе или на авиационных платформах имеет как преимущества, так и недостатки. К преимуществам относят широкий охват территорий, возможность получения изображений периодически, отсутствие труднодоступных территорий. К недостаткам относят относительно низкое пространственное разрешение применяемых в настоящий момент в ДЗЗ из космоса ГСА, возможные влияния облаков, сложность дешифрования данных и необходимость наземного подтверждения данных [36]. Информативность данных гиперспектральной информации ДЗЗ зависит от таких ключевых параметров ГСА как пространственное разрешение, спектральное разрешение, спектральный диапазон и периодичность получения данных. Вариации указанных параметров на различных космических аппаратах (КА) зачастую делает невозможность прямого сопоставления данных ДЗЗ. А некоторые спектральные диапазоны перекрываются лишь частично или зонально.

Следует разделять мультиспектральные данные и гиперспектральные ввиду особенностей их получения. Мультиспектральные данные чаще всего

получают с использованием набора специализированных камер, включающих в себя специализированные полосовые (зональные фильтры). В ряде случаев на одном летательном аппарате могут присутствовать несколько камер панхроматических (что позволяет получать в видимом диапазоне данные с высочайшим разрешением, а также камеры мультиспектральные с несколько худшим пространственным разрешением, в том числе, камеры коротковолнового инфракрасного диапазона (1-3мкм) и тепловизионные камеры (8-14мкм). Одновременная и синхронизированная съемка на БПЛА с использованием ГСА и высокоразрешающими камерами позволяет повысить точность геопространственной привязки гиперспектральных изображений, а также, используя данные цветного изображения, применяя алгоритмы обработки изображений можно получить данные ДЗЗ для оперативного мониторинга состояния растительности с использованием ряда широкодиапазонных спектральных индексов, например индекса NDVI [37].

ГСА отличается от мультиспектральной или многозональной съемочной аппаратуры, так как в сенсоре используется один объектив, проецирующий изображение на щелевую диафрагму, после которой происходит фокусировка изображения щелевой диафрагмы на диспергирующий элемент и далее следующей частью изображающей системы происходит проецирование изображения щелевой диафрагмы и ее спектрального разложения на светочувствительный сенсор [32]. Наличие щелевой диафрагмы и ее ширина обуславливают спектральное разрешение ГСА. Гиперспектральные изображения (ГСИ) в таком случае формируются сканированием пространства, а один кадр, получаемый в ГСА за одну единицу времени содержит в себе лишь одну пространственную координату, располагаемую вдоль щели, где другая координата получается путем добавления данных из последующих кадров последовательно. В зависимости от того какие оптические элементы лежат в основе спектрального блока, а главное какой диспергирующий

элемент ГСА может иметь также свои особенности и разные виды искажений. [38]

Оптическая дифракционная решетка или призма обычно используется для разделения спектральных компонент света. Оптические схемы Дайсона и Оффнера [39] являются предпочтительными для создания гиперспектрометров. Схема Дайсона является одной из наиболее простых [40-43].

Использование геопривязанных ГСИ со спутниковых аппаратов связанных с мониторингом состояния полей, ограничено невысоким пространственным разрешением (как правило 5-30м) и невысокой периодичностью (до 4-8дней в зависимости от источника данных). ГСИ, кроме того, имеют достаточно высокий объем данных, который кратно растет с увеличением спектрального диапазона и количества спектральных каналов. Объем данных ГСИ можно оценить по формуле

$$V = N \cdot M \cdot t \cdot K, \quad (1.1)$$

где N количество пикселей изображения вдоль щели, M – количество снятых полос вдоль траектории сканирования, t – разрядность представления информации (обычно 8 бит/пиксель), K – количество каналов.

Например, для ГСА установленной на космическом аппарате Ресурс П №3 Максимальное количество спектральных каналов 216, разрядность 14 бит/пиксель, 1024 пикселей вдоль щели, частота кадров в секунду около 35 к/с что формирует поток информации около 108 млн бит/сек. Другие версии КА Ресурс П №4 имеет до 255 спектральных каналов, тогда как самая последняя версия ГСА на Ресурс П №5 (запуск декабрь 2024года) имеет не более 200 каналов. Это также косвенно является показателем того, что дальнейшее увеличение спектральных каналов, конкурирующее с другими оптическими характеристиками ГСА (пространственное разрешение, смаз, не добавляет информативности гиперспектральным изображениям. В маршрутном режиме съемки около 100с могут формироваться необработанные данные для ГСИ объемом до 1,3 Гбайт. Все это требует достаточно высокопроизводительного

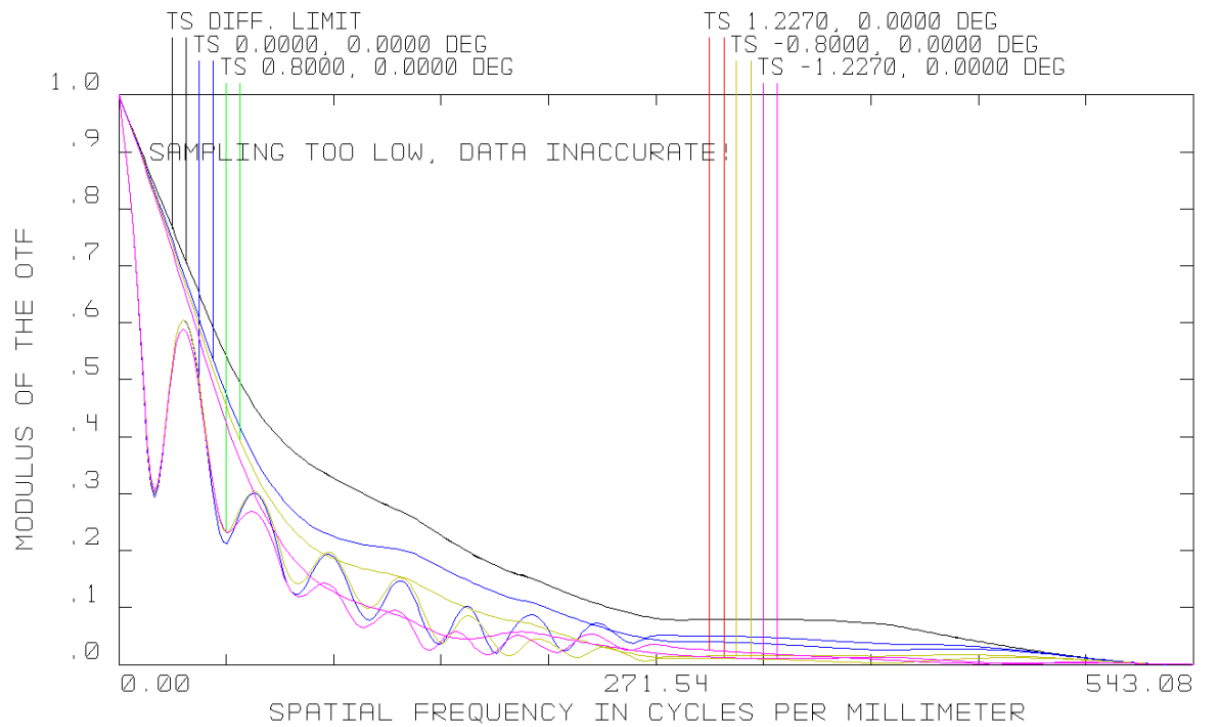
бортового оборудования и наличия высокоскоростного канала связи для возможности работы с такими данными [44].

Намного более высокую оперативность и информативность потенциально имеют данные полученные с применением аэрофотосъемки с использованием самолетов или БПЛА. Пространственное разрешение при такой съемке может достигать уже нескольких сантиметров.

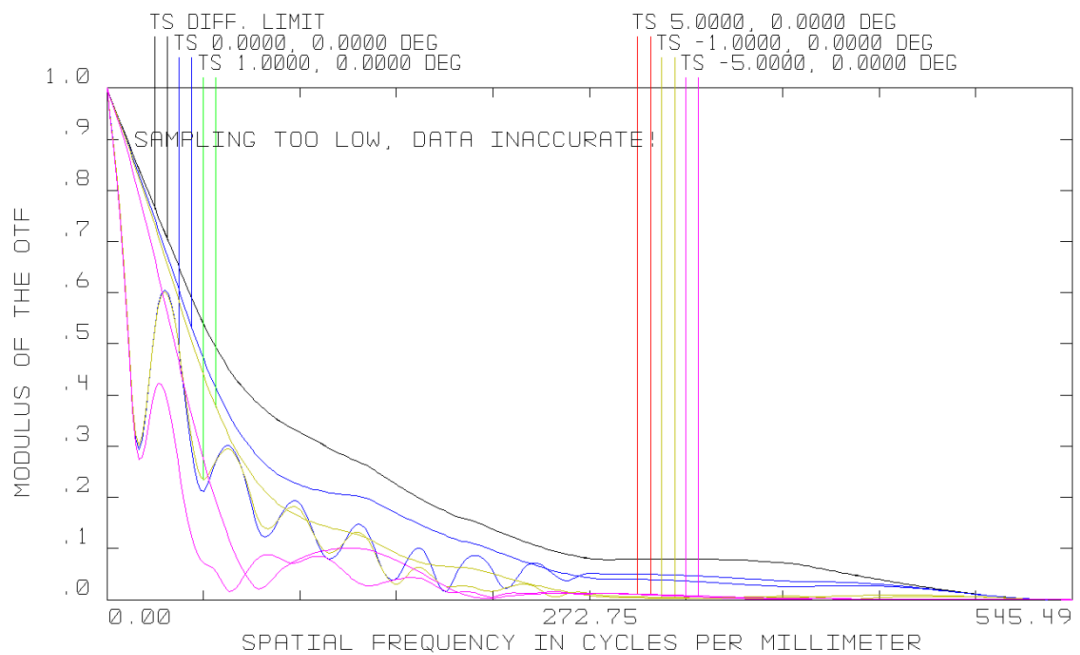
В варианте размещения, ГСА непосредственно на наземных платформах для ряда технических применений носителями могут быть автомобили, для мониторинга состояния дорожного полотна [45], водные суда для мониторинга состояния воды и дна [46], подводные аппараты для мониторинга состояния растительности в воде, кораллов, донных отложений или подводных инженерно-технических конструкций [47], на сельскохозяйственной технике для мониторинга состояния растений, влагосодержания в растениях и почве [48*], что позволяет адаптивно подстраивать режимы работы указанной техники, контролировать состояние влажности в растениях, получать индексы вегетации, индексы влажности, осуществлять поиск сорняков.

Однако использование ГСА вблизи поверхности Земли накладывает ряд условий на параметры. Такая ГСА имеет существенно более широкое поле зрения по сравнению с орбитальными и даже авиационными изображающими спектрометрами. Так характерное поле зрения ГСА, установленной на орбитальной платформе составляет 1-5°. Однако для ГСА наземного базирования такое поле зрения неприемлемо, поскольку это дает крайне узкую полосу захвата поверхности. Так при дистанции съемки 10м угол поля зрения 1° обеспечивает полосу захвата шириной в 0,17м. Поэтому для ГСА, установленной на наземном носителе характерные углы составляют 10-20°. Столь резкое увеличение углового поля накладывает дополнительные ограничения на пространственное разрешение и на спектральное разрешение.

Так на Рисунке 1.1а [49] представлена функция передачи модуляции для изображающего спектрометра на основе схемы Оффнера с полем зрения $2,5^\circ$, на Рисунке 1.1б представлена функция передачи модуляции изображающего спектрометра на основе схемы Оффнера с полем зрения 10°



(a)



(b)

Рисунок 1.1 – Полихроматическая функция передачи модуляции для изображающего спектрометра с полем зрения 2,5°(а) и функция передачи модуляции для изображающего спектрометра с полем зрения 10°(б).

Как видно из Рисунка 1.1 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, в любом случае достаточно хорошим, просто за счет близости объектов. 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

$$f = \frac{L}{\Delta s} \cdot A \quad (1.2)$$

где L – расстояние до объекта съемки, Δs – размер листа, A – размер светочувствительного элемента. Согласно [50] 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.

Еще одним результатом ухудшения функции передачи модуляции является снижение реального количества спектральных каналов, которое в таком спектрометре для наземной съемки будет составлять не более 80-120.

1.2 Вегетационные, почвенные и водные индексы

Растения достаточно чувствительны к факторам, являющимся необходимым для их жизнедеятельности, таким как наличие питательных веществ и минералов, влаги, света, тепла, состоянию газовой среды окружающей растения. Многие растения по разному отзываются на изменения окружающей среды связанной с погодными явлениями и могут испытывать так называемый стресс из-за неблагоприятных условий, что в конечном итоге сказывается на снижении урожайности, возникновению болезней из-за снижения способности противостоять неблагоприятным факторам. Болезни растений в свою очередь приводят также и к снижению качества продукции растениеводства. Проведение своевременного мониторинга и выявление неблагоприятных факторов позволяет провести своевременно различные агротехнологические операции, что позволит снизить потери продукции в дальнейшем.

Спектральные данные, характеризующие состояние растительных объектов, получаемые дистанционно с помощью изображающих гиперспектрометров, чрезвычайно информативны. Часто для оценки достаточно и мультиспектральной съемки с относительно небольшим количеством спектральных каналов, поскольку есть методы, основанные широкодиапазонных вегетационных спектральных индексах [51-52]. Самый известный из таких индексов – индекс NDVI, который позволяет оценить количество зеленой массы в площади пиксела при съемке с ГСА космического базирования. Поскольку площадь такого пикселя зачастую составляет до нескольких десятков метров, то космическое наблюдение растительности в начальный период вегетации на поле от состояния посева (как правило по открытой почве при классической технологии), зачастую отражает не состояние самой растительности, а в большей степени связано с таким термином как проективное покрытие растениями [53]. Таким образом, изменение значение индекса NDVI отражает не столько состояние

растительности, сколько прирост фитомассы, которая постепенно покрывает собой открытую почву, которая также может иметь различные отражательные свойства в зависимости от ее типа. Соответственно, дополнительно, для интерпретации данных из космоса также приходится оперировать почвенными индексами, индексами вегетации устойчивыми к влиянию почвы, листовой индекс LAI ((Leaf Area Index) индекс отношение суммарной односторонней площади листовой поверхности растений к площади участка на которой находятся растения) и ряд других, позволяющих косвенно оценить влияние дополнительных факторов. Однако, поскольку при наземной съемке растительность либо попадает, либо не попадает в пиксель (полное отсутствие спектрального перемешивания ввиду значительно более высокого разрешения по пространству), изменение итого индекса свидетельствует уже не о количестве зеленой массы, а, возможно, о состоянии данного конкретного растения. И такого переосмысления для наземной съемки требуют все вегетационные индексы. ГСИ имеют более высокое спектральное разрешение, на основе ГСИ возможно вычисление существенно большего количества уже узкополосных вегетационных спектральных индексов. Изображения, полученные с использованием беспилотного воздушного судна (БВС), оснащенного ГСА, могут предоставить информацию отражательной способности поверхности растений в тех участках спектрального диапазона, которые обычным взглядом не заметить в виду их малой интенсивности сигнала, практически не заметного на фоне более интенсивных соседних линий спектра. При этом некоторые спектральные линии очень точно могут характеризовать физиологические процессы.

ГСА в отличие от мультиспектральных камер имеет почти равномерное (отклонение от линейности около 0,02%) распределение каналов на всем спектральном диапазоне. Объединение каналов может быть получено при последующей обработке данных, что позволит из данных ГСА получить данные, которые бы полностью покрывали возможности большинства

мультиспектральных камер. Также можно осуществлять кросс-калибровку данных ГСА, позволяющую сопоставлять данные полученные с различных аппаратных съемочных комплексов [54].

Из указанной выше особенности ГСА следует, что и потенциальные применения к дешифрованию информации включающей в себя и пространственную информацию и спектральную на ГСИ могут быть намного более широкими, чем применения мультиспектральной аппаратуры. В работе [55] была сделана попытка разделить спектральные индексы, определяемые по широким спектральным полосам в 100-300 нм (Таблица 1.1) и гиперспектральные индексы определяемые по узким полосам в 5-10нм (Таблица 1.2). Если исходить из ширины полосы для расчета гиперспектральных индексов в 10 нм, то потребуется ГСА у которой всего 60 спектральных каналов, при ширине 5 нм эта оценка увеличивается до 120 спектральных каналов. Таким образом, оценка ширины спектральной полосы в [55] хорошо согласуется с выводами, полученными ранее о снижении спектрального разрешения ГСА при относительно широком поле зрения в 10°.

В Таблице 1.1. под мультиспектральными изображениями понимаются простейший вариант с 4 спектральными каналами: синий – BLUE, зеленый – GREEN, красный –RED, ближний инфракрасный – NIR.

Таблица 1.1 – Индексные формулы, используемые для анализа мультиспектральных изображений растительности [55]

Обозначение	Название	Формула	Решаемая задача
NDVI	Нормализованный разностный вегетационный индекс	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{NIR + RED}$	Определение количества зеленой массы
SAVI	Скорректированный почвенный вегетационный индекс	$SAVI = 1.5 \cdot \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + 0.5)}$	Аналогичен NDVI, но подавляет влияние пикселей почвы

Обозначение	Название	Формула	Решаемая задача
GARI	Индекс зеленой растительности, стойкий к влиянию атмосферы	$GARI = \frac{NIR - (GREEN - (BLUE - RED))}{NIR + (GREEN - (BLUE - RED))}$	Индекс чувствителен к широкому диапазону концентраций хлорофилла и менее чувствителен к атмосферным воздействиям, чем NDVI
VARI	вегетационный индекс растительности основанный на видимых RGB изображениях (атмосферостойкий)	$VARI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED}$	Индекс устойчив к влиянию атмосферы и используется для оценки доли растительности, а также ее видового состава.

В Таблице 1.2 перечислены некоторые из гиперспектральных индексов, используемых в сельскохозяйственном мониторинге, под обозначением I_λ понимается яркость ГСИ на дине волны λ .

Таблица 1.2 – Основные индексные формулы, используемые для анализа гиперспектральных изображений растительности [55]

Обозначение	Название индекса	Формула	Решаемая задача
TCARI (Transformed Chlorophyll Absorbtion Ratio Index)	Трансформированный относительный индекс поглощения в хлорофилле	$TCARI = 3 \left[(I_{700} - I_{670}) - \frac{0,2 I_{700} (I_{700} - I_{550})}{I_{670}} \right]$	Показатель содержания антоцианов (красно-фиолетовых растительных пигментов), накопление которых является признаком угнетения растений и замедления их роста

Обозначение	Название индекса	Формула	Решаемая задача
ARI (Anthocyanin Reflectance Index)	Антоциановый отражательный индекс	$ARI = 0,5 + \left(\frac{1}{I_{550}} - \frac{1}{I_{700}} \right) I_{750}$	Показатель содержания антоцианов (красно-фиолетовых растительных пигментов), накопление которых является признаком угнетения растений и замедления их роста
ChlRI (Chlorophyll reflection index)	Отражательный индекс хлорофилла	$ChlRI = \frac{I_{750} - I_{705}}{I_{750} + I_{705} - 2I_{445}}$	Показатель содержания хлорофилла, характеризующий емкость фотосинтетического аппарата и его потенциальную способность абсорбировать солнечный свет
FRI (Flavonol Reflectance Index)	Флавоноловый отражательный индекс	$FRI = C_3 + \left(\frac{1}{I_{410}} - \frac{1}{I_{460}} \right) \times I_{800}$ где $C_3 = 0,5 \dots 0,7$	Показатель содержания флавонолов (желто-оранжевых растительных пигментов), накопление которых является признаком угнетения растений и замедления их роста
PRImod (Modified Photochemical Reflectance Index)	Модифицированный фотохимический отражательный индекс	$PRImod = C_1 - \frac{I_{570} - I_{531}}{I_{570} + I_{531}}$ $C_1 = 0,3$	Показатель фотохимической активности фотосинтетического аппарата, позволяющий оценить интенсивность тепловой диссипации. Указывает на изменение

Обозначение	Название индекса	Формула	Решаемая задача
			относительного уровня ксантофиллов (желтых растительных пигментов)
SIPI (Structure Intensive Pigment Index)	Структурный индекс интенсивности пигментов	$SIPI = \frac{I_{681} - I_{445}}{I_{800} - I_{680}}$	Показатель рассеяния света, зависящий от внутренней структуры листа
TCARI (Transformed Chlorophyll Absorbtion Ratio Index)	Трансформиро ванный относительный индекс поглощения в хлорофилле	$TCARI = 3 \left[\frac{(I_{700} - I_{670}) - 0,2I_{700}(I_{700} - I_{550})}{I_{670}} \right]$	Содержание хлорофилла
WBI (Water Band Index)	Водный индекс	$WBI = \frac{I_{900}}{I_{970}}$	Применяется для определения содержания воды в растительности

Сравнивая две таблицы, можно сделать вывод о существенно большем потенциале ГСИ по сравнению с мультиспектральными изображениями.

Также из Таблицы 1.1 хорошо видно, что вегетационные спектральные индексы можно условно разделить на три типа: чувствительные к растительной массе, минимизирующие влияние атмосферы, устойчивые к почвенному влиянию (влиянию спектрального перемешивания характеристик отражения растений с характеристиками отражения почвы, что приводит к неоднозначному трактованию значений вегетационного индекса с характеристиками вегетации растений, например на ранних стадиях вегетации когда на поле значительные участки открытой поверхности почвы в междурядьях посевов).

Для исследования почвенных покровов и наблюдения за изменениями используются такие характеристики на изображениях как: текстура, цвет, яркость, тон, которые также связаны друг с другом прямо или косвенно. При

этом в зависимости от способа обработки почвы (вспашка, посев или боронование), пространственного разрешения, топографических особенностей, уклонов рельефа и др. одна и та же почва может выглядеть иначе.

В Таблице 1.2 гиперспектральные индексы устойчивые к почвенному влиянию не приводятся, по причине их огромного количества. Сточки зрения съемки ГСА на поверхности Земли, нет смысла в минимизации влияния почвы, поскольку разрешение съемки всегда можно подобрать так, чтобы практически исключить в основной массе пикселей сочетания зеленой массы и почвы, в таком случае пиксели относящиеся к растениям и пиксели открытой почвы разделены пространственно с значительно более высокой точностью. Однако в реальных условиях съемки сканирующей ГСА стоит учитывать влияние смаза вызванного, например, перемещением не только камеры, но и вегетативных частей растений в результате ветра.

Потенциально, с использованием мониторинга состояния сельскохозяйственных культур с помощью ГСА, можно определить следующие показатели:

- недостаток влаги растительности и почвы;
- оценка потребности в удобрениях;
- обнаружение повреждений и болезней;
- картографирование водных потоков и управление орошением;
- мониторинг эрозии и потерь почвы;
- создание карт уклонов и зон воздействия солнечного света.

1.3 Выводы к главе 1

1. Для вычисления узкополосных индексов допускается снижение спектрального разрешения с 4 нм до 12 нм, что не сказывается на точности вычисления индексных изображений.

2. ГСА для наземного применения должна иметь существенно большее поле зрения по сравнению с ГСА космического базирования ($10-20^\circ$ по сравнению с $1-5^\circ$), что приводит к 2-3 кратному снижению пространственного и спектрального разрешения вследствие увеличения внеосевых абберрационных искажений в оптической системе.

3. При дистанциях съемки от 10 до 100 м до области интереса с использованием ГСА на наземном носителе необходимое фокусное расстояние используемого объектива должно составлять 2,5-25 мм.

Глава 2. Оценка вегетационных показателей растениеводства сельскохозяйственных (полевых) культур по гиперспектральным изображениям

Наиболее важным с точки зрения земледелия является оценка влагосодержания с точки зрения оценки основного жизненно важного показателя для растений.

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 на фоне общего отражения 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 [56], использующий каналы вблизи линии 1,24 мкм или нормализованный инфракрасный индекс разности NDII (normalized difference infrared index), рассчитываемый на основе яркости спектральных каналов на длинах волн 1,64 мкм, соответственно, а в качестве опорной длины волны используется отражение на длине волны 0,86 мкм. NDII использует более сильную полосу поглощения воды (канал, центрируемый около 1,64 мкм). Как видно они используют линии воды расположенные в КИК диапазоне. Единственным доступным для вычисления индексом из широко описываемых в литературе для определения влажности растительности из видимого и ближнего ИК диапазона 0,4-1,0 мкм остается водный индекс WBI на основе линии поглощения воды в районе 0,97-0,98 мкм [57]. Таким образом, эти индексы подобны, но индекс с меньшей чувствительностью к воде NDWI нашел распространение для поиска областей на изображениях с открытой водной поверхностью, как реки, озера. Более чувствительный индекс на длине волны 1,64 мкм нашел применение для оценки меньшего содержания воды в

объектах, что удобно использовать для оценки водного стресса растительности. Однако, стоит учитывать сильную корреляцию также и с состоянием атмосферы, водяного пара в приземной области, процессами транспирации воды растениями и из открытой почвы. Зачастую, указанные выше оценки возможно выполнить лишь находясь непосредственно в исследуемой территории. Более важным с этой точки зрения является выделить поглощение влагой находящейся непосредственно в растениях, что легко осуществимо при наземной гиперспектральной съемки.

2.1 Анализ методов оценки состояния сельскохозяйственных культур с использованием спектральных признаков

Техническим средствам для оценки влагосодержания в почве внимание уделялось практически с момента появления метеорологии как науки. Именно влага определяет доступность питания растений и их вегетацию.

В настоящее время контроль состояния влажности почвы в подавляющем большинстве случаев осуществляется при орошаемом земледелии при наличии систем автоматизированного управления орошением с использованием контактных датчиков, устанавливаемые непосредственно в зону заглубления корневой системы выращиваемых агрокультур. Среди таких датчиков хорошо известны емкостные, индуктивные, тензиометрические, кондуктометрические [58]. Такие элементы сенсорики позволяют оперативно получать данные о состоянии водного режима на поле с периодичностью от несколько раз в сутки, до нескольких раз в час, имеют возможность программирования, могут иметь беспроводное исполнение. Однако, несмотря на достаточно высокую стабильность и точность измеренных показателей этими датчиками (отклонение обычно не превышает 2-5%) при проведении изначальных калибровочных процедур термостатно-весовым методом, точность определения влажности почвы определяется погрешностью установки датчика на необходимую глубину, внешними условиями и

воздействиями. При этом пробоотборный метод на основе термостатно-весового определения содержания влаги в пробах допускает погрешность до 5% [59]. В зависимости от рельефа поля также возможны пространственные неоднородности влагосодержания в локальных микроучастках поля, достигающая 10- 30% относительной влажности (от уровня устойчивого завядания растений, до уровня переувлажнения). Таким образом, репрезентативными данными являются лишь усредненные данные по нескольким сенсорам, установленным в различных участках контроля.

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. Для диапазона LWIR (8-15 мкм) существуют относительно дешевые и компактные термоболометрические сенсоры и камеры, которые возможно устанавливать как на спутники ДЗЗ, на БПЛА так и подвижные наземные носители. Для диапазона SWIR (1-3мкм), MWIR (3-8мкм) используются охлаждаемые вплоть до криогенных температур, а потому громоздкие и крайне дорогие сенсоры, а также объективы к ним, что ограничивает их применение на земле и для съемки с беспилотных средств. Лишь для ограниченной части NSWIR (1-2,4 мкм) возможны сенсоры без охлаждения, но и с худшими показателями чувствительности и соотношения сигнал/шум.

Также хорошо известны возможности мультиспектральных съемочных систем VIS-NIR (0,4-1мкм), позволяющие получать изображения в нескольких диапазонах называемые полосами пропускания, на основе которых можно вычислить некоторые вегетационные индексы, в том числе NDVI.

Одним из возможных путей решения проблемы картирования неоднородности полей может быть использование радиолокационного дистанционного зондирования [60], Радиолокационное зондирования для мониторинга состояния почвы основано на использовании данных со

спутников с радаром с синтезированной апертурой (РСА) работающих в X, C и L диапазонах. Методами компьютерной обработки данных поляриметрии радиоволн различных диапазонов можно добиться картографирования поля по уровню влагосодержания в почве и растениях до 5м в глубину [61] Увеличение частоты зондирующего сигнала способствует увеличению пространственного разрешения, однако увеличивается и влияние поверхностного покрова на точность определения влажности почвы, также возникает и необходимость вносить поправки в зависимости от типа почвы, и содержащихся в ней минеральных веществ. Как правило, такие системы имеют корреляцию с измеренной влажностью почвы по термостатно-весовому методу (ТВМ) по ГОСТ 28268-89 до 0,8-0,9. Ошибка определения влажности при проведении наземной валидации обычно находится в пределах 8-10% при радиометрической точности фиксации сигнала с антенн около 99-99,5%. [62] Недостатком данной технологии является достаточно сложная технология обработки данных, крайне низкая оперативность получения космических данных. Данные по спутниковой группировке Sentinel-1 с РСА имеют периодичность обновления данных над одной и той же территорией России от 20 до 50 дней, что делает данную технологию крайне ограниченной для задач экологического или сельскохозяйственного мониторинга в настоящее время. Однако, несомненно, имеются перспективы применения как на малых космических аппаратах, так и с применением БПЛА [63].

Среди других методов оценки влагосодержания в почве можно упомянуть также бесконтактных метод оценки основанный на СВЧ радиометрии в микроволновом диапазоне [64-66]. Точность данного метода, как и других косвенных методов картирования влажности почвы, определяется точностью геопозиционирования при СВЧ зондировании, однородностью физических свойств почв, а именно плотности, температуры, содержанию элементов, наличием и видом растительности и др.

Первые подходы к изучению свойств объектов природной среды с их отражательной способностью в различных диапазонах длин волн видимого спектра относят к 1934 г. выполненные Шароновым В.В. [67] и Криновым Е.Л. в 1947 г. [68].

Обнаруженные особенности отражения различных объектов в том числе почв позволили сформировать своего рода цветовые шкалы для сопоставления и классификации их типов. В последствии были также выявлены и особенности отражения не только в видимой глазу человека спектральной области, но и доступный уже для систем технического зрения более широкий диапазон, включая ближний ИК. Например, особенности отражения растительности в ИК диапазоне, когда растения интенсивно поглощают необходимый для фотосинтеза свет в синем диапазоне и красном, при этом более высокое отражение зеленым листовым пигментом хлорофиллом, а также практически полное отражение света в области спектра ближнего ИК, который не участвует в фотохимических процессах жизнедеятельности растений. Указанные особенности, свойственные большинству наземной зеленой растительности легли в основу различных способов дешифрирования аэро- и космических снимков. Выявленные особенности, а также, всё увеличивающиеся требования разрешения съемочных систем, особенно космического базирования, привели к тому что возникла конкурирующая с требованиями расширения спектрального диапазона для дешифрирования снимков, возникла необходимость поиска выбора наиболее информативных зон съемки для решения конкретных задач и идентификации определенных объектов. Помимо этого, также существуют спектральные окна прозрачности атмосферы, где различные газы и воздушные примеси не имеют поглощение, мешающее наблюдению объектов земной поверхности из космоса. Соответственно чувствительность съемочных систем в зонах парниковых газов не прибавляет, а только снижает информативность космических снимков. Так возникли спектрально-зональные и мультиспектральные съемочные

системы, которые оптимизировались по параметрам повышения точности выявления объектов определенного типа, с максимально возможным при этом пространственным разрешением. Для опознавания объектов по многозональным снимкам не важны абсолютные значения их коэффициентов спектральной яркости, а важны характеризующие определенный класс объектов соотношения между значениями яркости объекта в различных информативных спектральных зонах. Мультиспектральные съемочные системы могут иметь более узкие спектральные полосы каналов, так, что несколько каналов мультиспектральных систем могут соответствовать одному каналу зональных снимков, при этом и более высокие возможности дешифрования или более высокое пространственное разрешение. В то же время, особенности спектрального поглощения в определенных зонах спектра и применение узкоспектральных каналов позволяет, в том числе, и численно оценивать уровень пожароопасности лесов по степени поглощения водяным паром или влагосодержанием в зеленой растительности.

Для оценки содержания азотных минеральных веществ и необходимости дополнительной подкормки растений азотом зачастую достаточно применения широкополосного вегетационного индекса NDVI. Исследования различных авторов в отношении содержания многих других элементов питания в некоторых отношениях разнятся.

В отношении содержания фосфора авторами показано в работе [69] что с содержанием подвижного фосфора в диапазоне 0-40 мг/кг большую взаимосвязь имеют индексы NDVI, PSSRB, NDRE, NDWI, каналы SWIR и синий. Как видно среди индексов показывающих общее здоровье растений, фотосинтетическую активность, наличие пигментов, высокую корреляцию с минеральным содержанием имеет индекс NDWI (стандартизованный индекс увлажненности) показывающий содержание влаги в растениях. Точность моделей по классификации территорий по содержанию фосфора в работе

отмечается на уровне 71%. Однако, индекс NDWI рассчитываемый по формуле введенной Gao в 1996 году [70-71]:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2.2)$$

в своем применении имеет ограничение, связанное с необходимостью использовать SWIR канал (1550-1750нм) который коррелирует с линией поглощения воды в SWIR диапазоне на длине волны 1200-1400 нм. В отношении узкополосных каналов в работе [70] описано применение узкополосного индекса для длин волн 860нм и 1240нм. Аналогичным образом объясняется корреляция каналов SWIR с содержанием минеральных веществ. Поглощение в области синего также имеет значение для обеспечения реакций фотосинтеза и их интенсивности, а значит и общего здоровья почв и растений.

Однако, на практике важнее классифицировать какой именно фактор имеет лимитирующее влияние на вегетацию, рост и общее здоровье растений, какое именно минеральное вещество участвующее в питании или наличие влаги в почве влияет.

В связи с этим в диссертационном исследовании ставилась задача исследования применения изображающего гиперспектрометра для оценки содержания в растениях влаги и основных элементов минерального питания, азот, фосфор, калий.

2.2 Экспериментальное определение влажности почвы по гиперспектральным изображениям снятым с наземной поворотной платформы

Как было указано в главе 1, в настоящее время существует технология определения относительной влажности земной поверхности по анализу гиперспектральных изображений в так называемом SWIR диапазоне или КИК [23-32]. Технология дистанционного определения недостатка влагосодержания в растительности может быть применена как на

сельскохозяйственных землях [24-28], так и при мониторинге лесной растительности [29-31]. Гиперспектральные методы в отличие от пробоотборных или контактных косвенных методов мониторинга обладают рядом преимуществ, ввиду их дистанционного использования. Съемка может осуществляться на Земле, в воздухе с авиационных или беспилотных носителей, также и из космоса, обеспечивая требуемую оперативность, пространственное или спектральное разрешение, но при всём этом, крайне нежелательно использовать матричные сенсоры SWIR.

Рядом авторов рассматривалось применение ГСА в непосредственной близости от области интереса [45-47, 53], что показало высокую эффективность такого подхода для картирования спектральных неоднородностей, для последующей косвенной оценки связи этих спектральных свойств с существующими проблемами, вызвавшие эти локальные неоднородности. В этой связи, в задачах орошаемого земледелия было также предложено установить ГСА в непосредственной близости к орошаемой растительности на многоопорную дождевальную машину [74]. Растения получают стресс, как от недостатка воды, так и от переувлажнения. Переизбыток влаги затрудняет усваивание газов, питательных элементов в прикорневой зоне, способствует развитию патогенной флоры. Поэтому необходима разработка методов способных проводить мониторинг влажности при использовании элементов точного земледелия. Такой подход потенциально может обеспечить управление орошением также и в режиме он-лайн, формируя ГСИ, обрабатывая их и создавая управляющие воздействия на непосредственно исполнительные механизмы для дозирования влаги, снижая неоднородности влагосодержания в почве. Более сложные алгоритмы управления могут учитывать дополнительно исторические данные гиперспектрального мониторинга, текущие погодные условия, данные космического мониторинга, оценку транспирации, оценку продуктивного запаса влаги, прогноз осадков, карту продуктивности поля и др. [75-77].

Однако для использования методов управления дождевальными машинами существует первоочередная задача косвенной оценки относительной влажности почвы. В качестве одного из способов может быть рассмотрено использование водных вегетационных индексов, которые обладают различной чувствительностью к содержанию воды в объектах подстилающей поверхности и в атмосфере.

Таким образом в диссертации рассматривается метод измерения относительной влажности почвы по гиперспектральным изображениям снятым в диапазоне длин волн от 0,4 до 1 мкм а также пример организации системы дифференцированного полива с использованием обработки данных получаемых гиперспектрометром оффнеровского типа [48*, 72-73].

Наиболее известный водный индекс NDWI, который вычисляется по формуле (2.2). Данный индекс при значении более 0,5 позволяет классифицировать объекты как объекты с открытой поверхностью воды, однако в случае, если значение менее, можно косвенно определять по его уровню отклонение влагосодержания в водных объектах. В этом смысле он схож с индексом NDVI для классификации не только наличия растительности, но и уровня вегетации в целом. Индекс может быть вычислен как по гиперспектральным изображениям, так и по данным многоканальной съемки известными группировками спутников Modis, Landsat, Sentinel.

Однако, индекс NDWI, как уже было указано выше не подходит в качестве базового индекса для определения влажности, ввиду присутствия в индексной формуле полосы из КИК диапазона, что требует существенного усложнения конструкции изображающего спектрометра.

Есть еще несколько широко используемых индексов влажности растительности [78].

Нормализованный инфракрасный индекс разности NDII (normalized difference infrared index), который определяется по формуле

$$NDII = \frac{I_{860} - I_{1640}}{I_{860} + I_{1640}} \quad (2.3)$$

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). Так же, как и для NDWI, нормализованное вычисление индекса NDII уменьшает влияние почвы.

Индекс влажности поверхности земли LSWI (land surface water index), который определяется по формуле

$$LSWI = \frac{I_{860} - I_{2130}}{I_{860} + I_{2130}} \quad (2.4)$$

Как видно из формул (2.3) и (2.4) эти индексы также требуют информации из КИК диапазона. Таким образом, единственным доступным для вычисления индексом для определения влажности растительности из диапазона 400нм-1000нм остается водный индекс WBI (табл.1.1). К сожалению, с вычислением этого индекса тоже есть технические проблемы, связанные с тем, что обе длины волны для его расчета 900нм и 970нм расположены вблизи границы диапазона чувствительности регистрирующей матрицы изображающего спектрометра. Чувствительность на этих длинах волн составляет около 0,1 от чувствительности матрицы в точке максимума, поэтому и статистически точность определения WBI, будет существенно снижена, ввиду существенно большего влияние шумов коэффициентов спектральной яркости для пикселей с изначально низким уровнем значения. Из этого следует задачей исследования являлась проверка чувствительности изменения WBI растительности к изменению относительной влажности почвы под этой растительности. Обычно в задачах орошаемого земледелия в зависимости от произрастающей полевой культуры существует необходимость выявления изменения относительной влажности почвы в трех градациях в диапазоне 75-100%. Эти три градации обусловлены градациями норм вылива воды дождевальными машинами. При достижении условной нижней

границы 75% относительной влажности почвы определяется необходимость включения дождевальной машины, при 75-80% дается повышенная норма дождевания, при которой форсунка осуществляет разбрызгивание при полном открытии электромагнитного клапана (непрерывное открытие), при 80-90% средняя норма, а при 90-100% в участках переувлажнения минимальная норма полива. Большее число градаций для данной задачи не целесообразно из-за чрезмерного усложнения системы управления форсунками или электромагнитными клапанами, что также способствует снижению надежности. Регулирование нормы вылива может происходить за счет уменьшения времени открытия электромагнитного клапана управления (импульсно-периодический режим). Управляющие импульсы к электромагнитным клапанам могут передаваться сигналами с ПЛК (программируемый логический контроллер).

Для проверки возможности осуществления дозирования подачи воды путем получения и обработки ГСИ с ГСА установленной на дождевальной машине был проведен эксперимент в ООО «Агропредприятие «Бессергеновское» Октябрьского района Ростовской области на орошаемых посевах различных агрокультур, таких как лук репчатый, посадки картофеля, свекла и морковь на однородном круговом поле с лугово-черноземными почвами. Для проверки данного подхода проводилось два вида экспериментов. Первый это использование установленной на опорно-поворотной платформе со штативом ГСА и получение ГСИ путем вращения. Второй это установка ГСА непосредственно на дождевальную машину и получение ГСИ сканированием в процессе движения. Для обоих опытов гиперспектральную съемку растительности и оценку вегетационных индексов осуществляли до полива при влажности почвы 80 % НВ (80 % наименьшей влагоемкости) в слое до глубины 0,4 м и непосредственно после полива (100% наименьшей влагоемкости) [48*, 79*]. В качестве экспериментального образца ГСА использовалась гиперспектральная камера на основе схемы Оффнера [73].

Результаты первого эксперимента при съемке с наземной опорно-поворотной платформой подробно описаны и опубликованы в работе [48*].

В экспериментальных условиях наблюдалась сухая малооблачная или безоблачная погода, слабый ветер (не более 5 м/с). Для установки камеры на штативе с поворотным механизмом высота установки составляла около 2,5 м, при размещении на дождевальных машинах высота установки соответствовала высоте относительно Земли 4,6-4,7 м. Для того чтобы на ГСИ не возникало побочных теней от штатива или опор (трубопроводов) круговой дождевальной машины, камера устанавливалась под углом вперед около 45 градусов. При съемке использован объектив с фиксированным фокусным расстоянием МИР-1В 2,8/37 (Россия) (М42 с шагом 1 посадочная резьба с рабочим отрезком 45,46 мм), с диафрагмой, установленной на значении приблизительно 3,2. Выбор указанного объектива обусловлен достаточным углом обзора с относительно малого расстояния до растительных объектов съемки, обеспечивая адекватную полосу обзора. Эквивалентное фокусное расстояние для сенсора CMV4000 (CMOSIS, Бельгия) с кроп-фактором 2,7 равно примерно 85 мм, что соответствует углу обзора вдоль щели примерно 25 градусов. Регистрация изображения проводится на сенсор с разрешением 2040x2048 пкс, что с биннингом 2x2 дает кадр с итоговым разрешением 1020x1024 пкс. Биннинг позволяет повысить светочувствительность, суммируя сигналы пикселей 4 в 1 и усреднить шумы сенсора, снижая их до 4 раз. Благодаря использованию в оптической схеме Оффнера отражающей дифракционной решетки с блеском, также обеспечивается достаточно высокая освещенность на матричном сенсоре в области интереса. Полевая съемка выполнена с экспозицией 65 мс. Точное время экспозиции подбиралось по гистограмме в процессе съемки с фиксацией кадра камерой, направленной на белую область калиброванной цветовой шкалы X-Rite ColorChecker Video. Полученные ГСИ имеют 250 спектральных каналов, равномерно распределенных в диапазоне 420-979 нм. Частота кадров

во всех сценах зафиксирована и соответствует 15 к/с, что обеспечивает постоянство пространственного разрешения вдоль направления движения на всех полученных ГСИ. Пространственное разрешение вдоль щели остается неизменным, независимо от частоты кадров, так как обеспечивается лишь количеством пикселей вдоль щели.

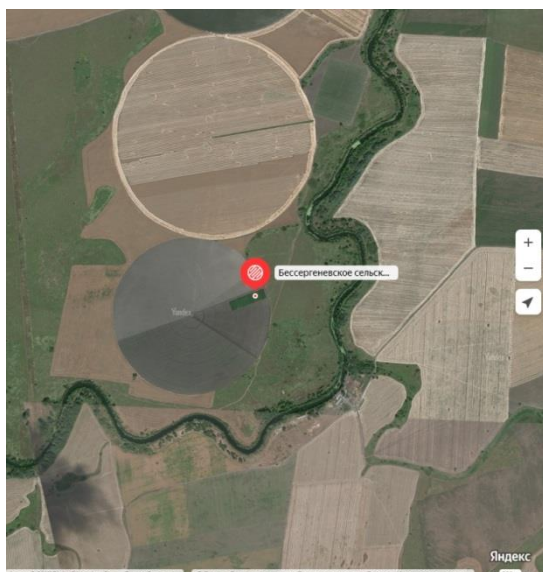
Учитывая индивидуальные особенности растений в разных областях поверхности Земли, на разных почвах и в разных климатических условиях, совершенно ясно, что никаких абсолютно точных показателей для определения влажности получить нельзя. Основная цель проводимых экспериментов, разработка метода, который позволил бы отделять политые участки зеленой растительности от не политых в условиях одного поля (влажность почвы 80 % НВ).

ГСА для проведения эксперимента была установлена на штатив, с возможностью регулировки высоты установки и угла наклона, а также с возможностью установить угловую скорость вращения камеры (Рисунок 2.1).

В ходе эксперимента осуществлялась съемка гиперспектральных изображений на местности с использованием вращающейся платформы на штативе с постоянной скоростью. В экспериментах рассматривались участки поля площадью по 40м², на которых в 10-15 точках осуществлялось измерение относительной влажности. Данные измерения в определенной степени моделируют условия съемки специализированной аппаратуры, которую предлагается устанавливать на дождевальную машину нового поколения кругового действия.

При формировании гиперспектрального изображения используется только часть кадра, как показано на Рисунке 2.2, описываемая некоторой зоной интереса (пунктирные линии).

На рисунке 2.2 представлен вид спектрального распределения для одного положения гиперспектрометра.



(а)



(б)

Рисунок 2.1 – Экспериментальный участок для проведения экспериментов:

(а) место съемок на картах; (б) внешний вид гиперспектрметра на вращающейся установке для полевых исследований

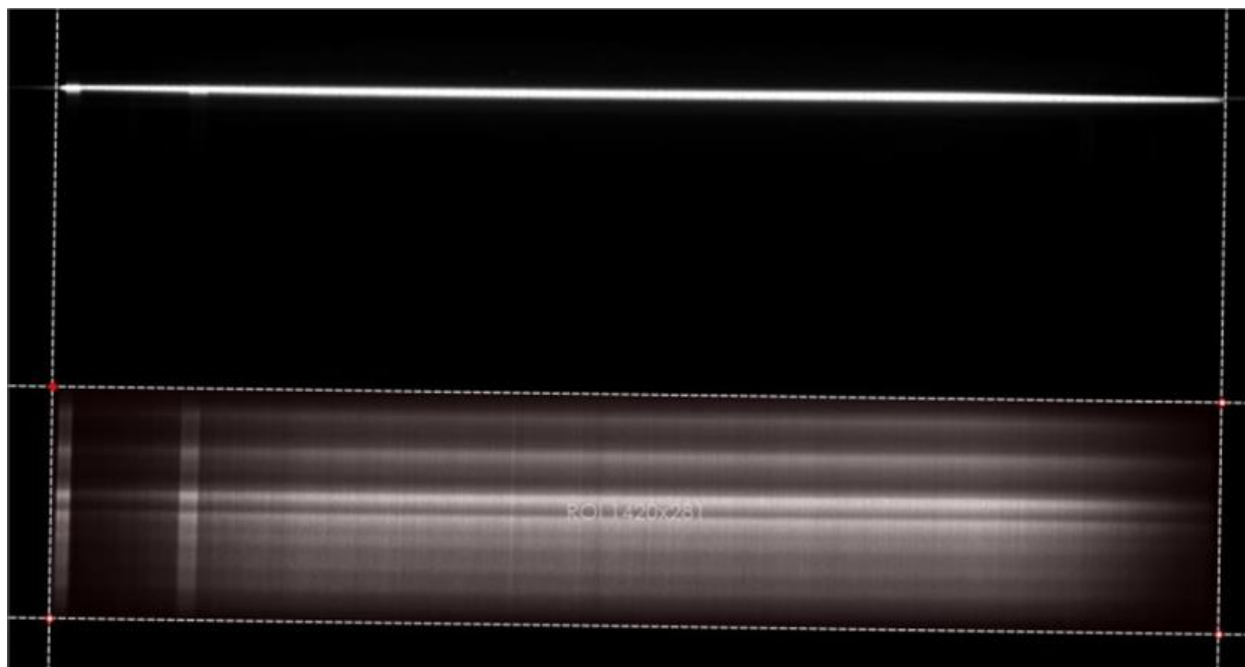


Рисунок 2.2 – Вид спектрального распределения зарегистрированного на светочувствительной матрице для одного положения гиперспектрметра.

Для сборки гиперспектрального изображения (ГСИ) местности использовалась программа автоматизированно вырезающая из исходных кадров сенсора гиперспектрометра зону интереса, далее корректировались угловые положения зоны интереса, и затем из последовательности кадров, кадр за кадром, вырезая эти строки, собираются слои гиперкуба и далее уже из слоев куб формата geotiff с расширением «.tiff».

Для сборки проводилась предварительная калибровка зоны интереса на исходных изображениях, что позволило поставить в соответствие номер каналов ГСИ (строка исходной зоны интереса) длине волны. Полученное изображение показывает круговую развертку охватываемого при съемке пространства. Каждому слою гиперкуба соответствует определенный спектральный канал, т.е. столбец на рисунке 2.3.

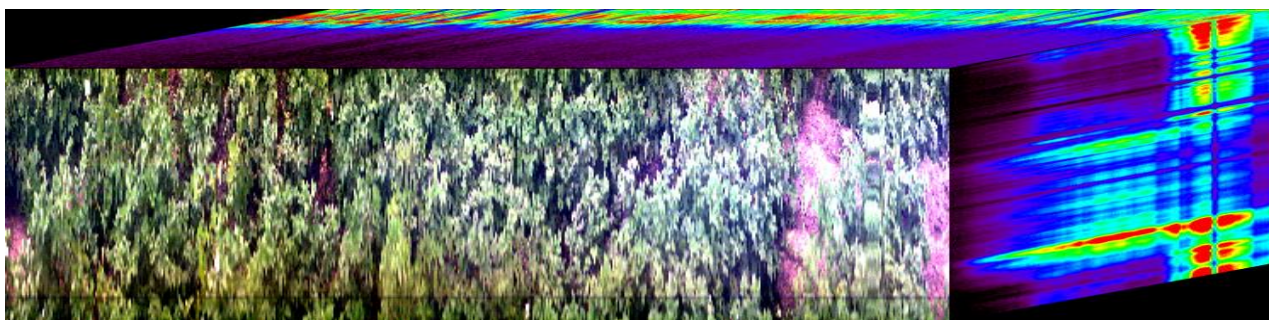


Рисунок 2.3 – Схематическое изображение гиперкуба

На Рисунок 2.4а приведен пример одного из слоев снятого гиперкуба. Это развертка кольца с внешним радиусом 5м и внутренним радиусом 1м с правильными пропорциями по обеим координатам. Аналогично на рисунке 2.4, б, приведено цветосинтезированное изображение поля с рядками свеклы красной, на котором отчетливо видно пространственные и спектральные искажения возникающие в результате вращения камеры относительно точки установки, из-за чего растительность на каждом участке кадра имеет различные углы освещения и, соответственно, отражения, что искажает абсолютные или относительные значения яркости (коэффициенты спектральной яркости).



(a)



(б)

Рисунок 2.4 – Изображения растительности снятой с использованием ГСА на штативе с опорно-поротной платформой кругового сканирования: (а) – слой гиперкуба на длине волны 530нм, (б) – цветосинтезированное изображение поля со всходами красной свеклы.

Для использования ГСИ в дальнейшем, для получения вегетационных индексов растительности, оценки влагосодержания важно точно поставить в соответствие каждому спектральному каналу определенную длину волны. Калибровка гиперспектрометра для ГСА осуществлялась с использованием перестраиваемого лазера EKSPLA NT 242, который позволяет менять длину в видимом и ИК диапазонах 400-2600 нм с шагом 0,5 нм в диапазоне 400-840нм и с шагом 1нм далее. На рисунке 2.5 представлена схема установки для калибровки гиперспектрометра.

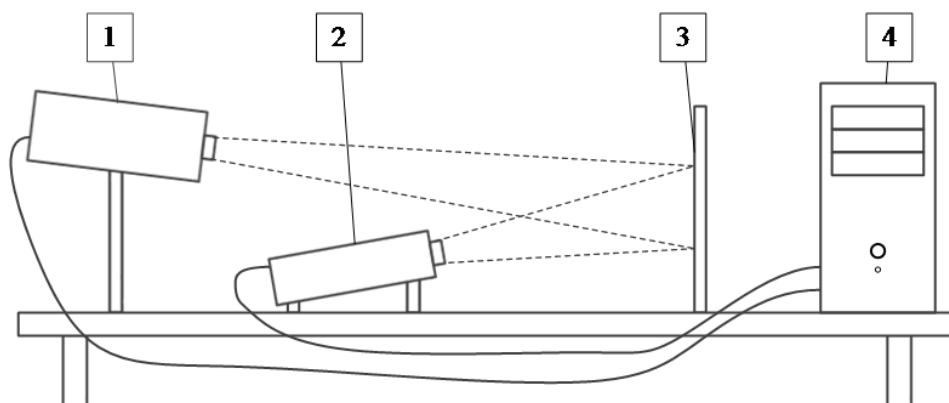


Рисунок 2.5 – Схема расположения оборудования для проведения эксперимента внутри помещения: гиперспектрометр по схеме Оффнера (1), перестраиваемый лазер NT 242 (2), экран (3), компьютер (4).

По итогу обработки данных формировался калибровочный файл с указанием центральной длины волны каждого из 250 каналов, в котором точно указывается соответствие между номером столбца на матрице и длиной волны. В Таблице 2.1 приведена часть этого файла, которая хорошо показывает линейность связи между номером пикселя и длиной волны.

Таблица. 2.1 – Калибровка положения спектральных каналов на светочувствительной матрице

Длина волны лазера	Номер столбца на матрице	Шаг на 1нм (пиксели изображения)
420	3	—
440	11	0,4
460	20	0,45
480	29	0,45
500	38	0,45
520	47	0,45
540	56	0,45
560	65	0,45
570	70	0,45

600	82	0,4
630	95	0,43
650	105	0,5
670	114	0,45
690	123	0,45
710	132	0,45
750	150	0,45
770	159	0,45
790	168	0,45
810	177	0,45
830	186	0,45
843	192	0,45
850	195	0,45

Полученный калибровочный файл использовался при формировании гиперкубов. На Рисунке 2.6 представлен вид усредненных спектров для различных сельскохозяйственных культур, полученных по результатам съемки нескольких участков

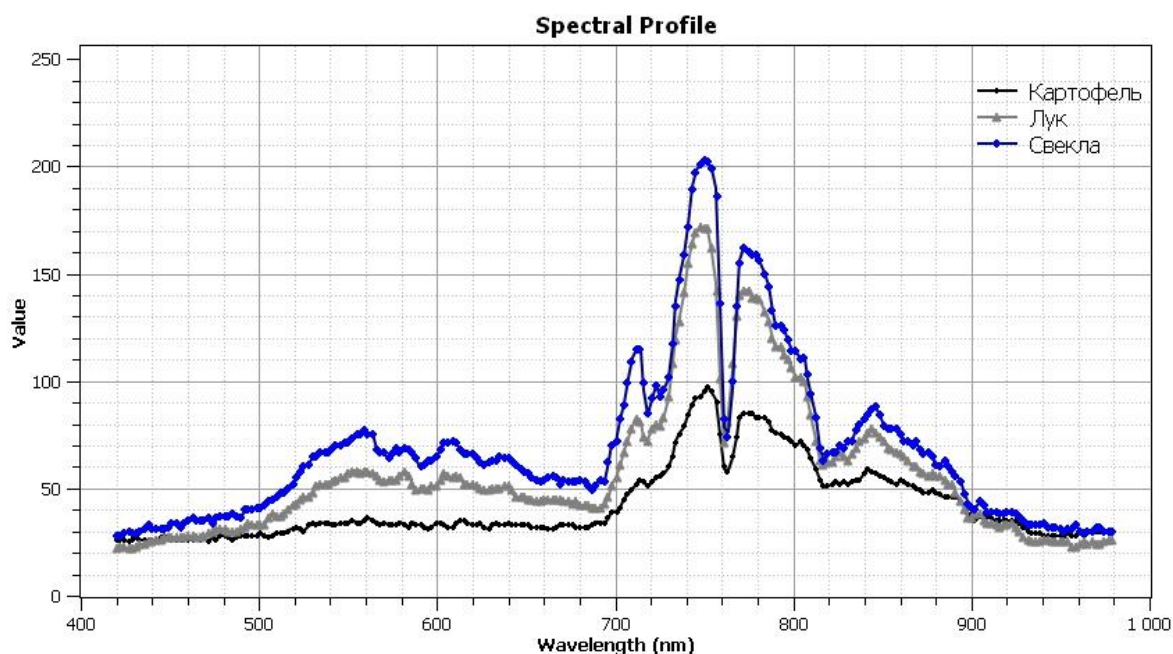


Рисунок 2.6 – Спектры, полученные по гиперспектральным изображениям.

Сверху вниз: свекла, лук, картофель

На спектрах можно заметить линию поглощения, присутствующая на изображениях всех сельскохозяйственных культур, она соответствует длине волны 761 нм. По данным источников [80] данная линия соответствует линии поглощения кислорода 760 нм, что говорит о хорошей точности калибровки сканирующего изображающего гиперспектрометра, ширина одного спектрального канала которого 2,24 нм и ограничена дискретностью используемой ПЗС матрицы (CMV4000).

В видимой и ближней инфракрасной областях спектра практически нет линий или полос поглощения водяного пара. Газообразная вода поглощает излучение в основном в диапазоне длин волн более 1400 нм, поэтому получить точные данные о влажности используя спектральные распределения в диапазоне длин волн 0,4 мкм-1 мкм, практически невозможно и основная задача рассматриваемого метода в бинарном разделении относительно влажных и относительно сухих участков.

Дальнейшая обработка полученных гиперспектральных изображений осуществлялась путем определения индексов NDVI и WBI. Индекс NDVI определял положение растительности в кадре, а индекс WBI рассчитывался только в точках, где индекс NDVI превышал пороговое значение, т.е. там где присутствует растительность в каждой точке гиперспектрального изображения, где присутствует зелень. На Рисунок 2.7а представлено изображение распределения индекса WBI.

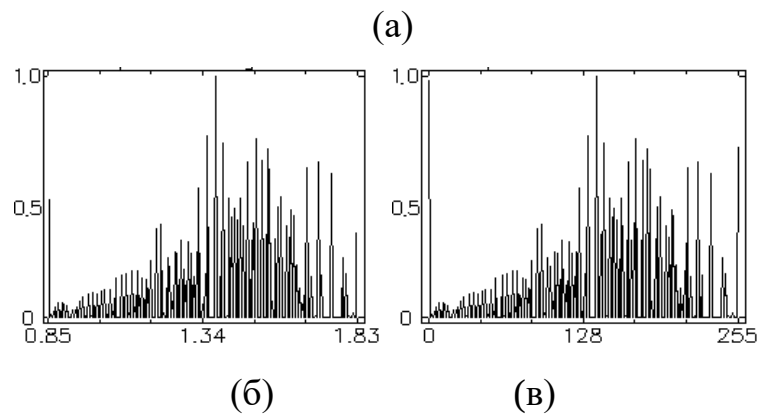
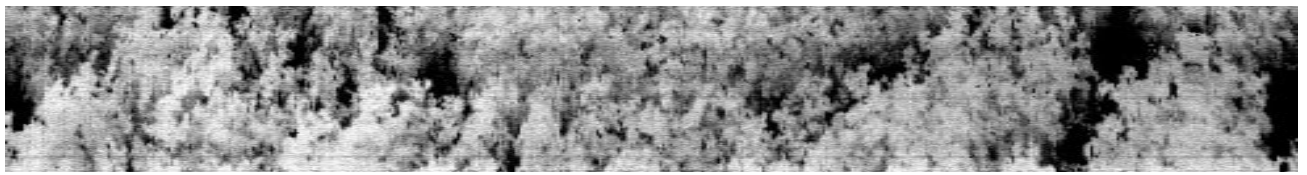


Рисунок 2.7 – Распределение индекса влажности по изображению растительности: (а) – (картофель), (б) – гистограмма распределения индекса влажности.

На Рисунке 2.7, а представлено изображение пространственного распределения индекса WBI (256 градаций серого 0..255) яркость которого пропорционально индексу WBI в диапазоне значений индекса 0,85 и до 1,83. На Рисунке 2.8б представлена гистограмма распределения этого индекса по изображению, т.е. количество пикселей с определенным значением индекса WBI нормированное на максимальное значение. В целом, как по среднему значению индекса, так и по распределению в гистограмме участки с повышенной влажностью отличаются от участков сухих (Рисунок 2.8).

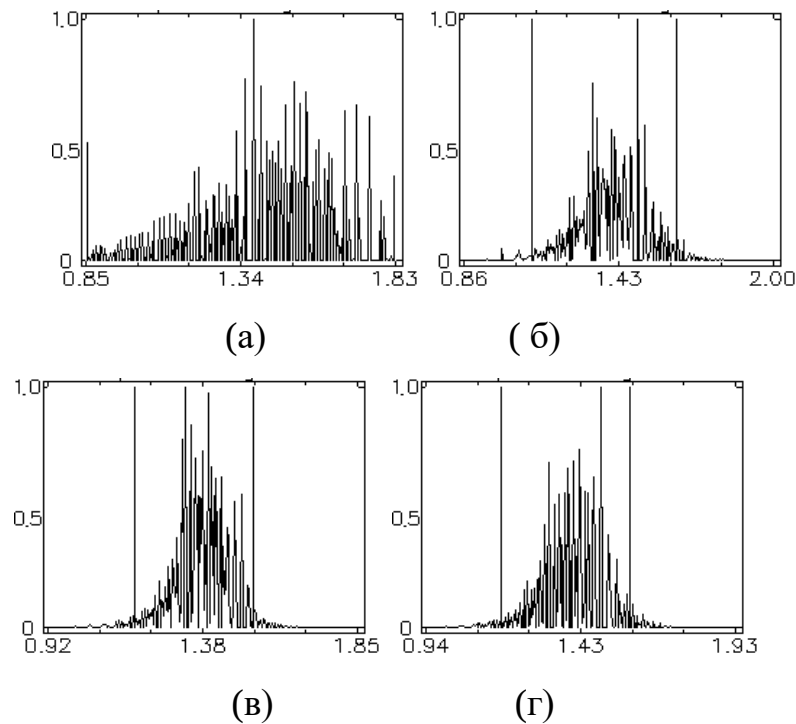


Рисунок 2.8 – Распределение индекса влажности в яркостной аппроксимации: (а) – гистограмма для участка картофеля до полива (влажность почвы 80% НВ), среднее значение индекса WBI 1,34; (б) – гистограмма для участка картофеля после полива (влажность почвы 100% НВ), среднее значение индекса 1,43; (в) – гистограмма для лука до полива (влажность почвы 80% НВ), среднее значение индекса 1,38; (г) – гистограмма для лука после полива, среднее значение индекса 1,43 (влажность почвы 100% НВ)

Как видно из Рисунка 2.8 гистограммы и средние значения индекса влажности существенно отличаются не только для изображения, где растительность занимает почти всю площадь изображения (Рисунок 2.8, а, б), но и в том случае, когда на изображении довольно большие участки, не покрытые зеленой массой (Рисунок 2.8, в, г). Всего было проанализировано от 6 до 10 участков для каждой культуры, и средние значения индекса WBI несущественным образом менялись от измерения к измерению (абсолютное СКО по всем измерениям менее 0,02). Таким образом, несмотря на

невозможность анализа КИК диапазона (1мкм-3мкм) возможно бинарное детектирование влажности почвы методами гиперспектральной изображающей спектроскопии с использованием ГСА наземного базирования и дальнейшего анализа индексного изображения на основе расчета индекса WBI для каждого пикселя и дальнейшей статистической обработки этих значений для ограниченной локальной зоны местности в пределах которой происходит получение и анализ ГСИ. Это принципиально важный результат, поскольку стоимость стандартных ПЗС матриц на видимый и ближний инфракрасный диапазон на два порядка отличается от стоимости матриц КИК диапазона, что не дает возможности использовать их на технике сельхозназначения.

Полученные в ходе этого эксперимента результаты также были апробированы в результате съемки подстилающей поверхности камерой установленной на дождевальную машину, которая способна осуществлять круговое сканирование пространства и в реальном времени анализировать растительность, производить расчет индексного изображения на основе WBI и проводить локальные статистические оценки участков местности пример кадра полученного с ГСА на дождевальной машине показан на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Пример RGB реконструкции одного из снятых экспериментальных ГСИ

Как видно по Рисунку 2.9, в процессе съемки в результате облачности несколько раз в течение 10 минут сканирования меняется освещенность более чем в 5 раз, приводящая к изменению яркости пикселей, относящихся к растительности от уровня 200 до уровня менее 40. Однако, несмотря на то, что невозможно напрямую работать с каналами ГСИ напрямую, индекс NDVI и WBI, являющиеся нормированными индексами в формуле которых стоишь

отношение, то даже такое ГСИ позволяет выполнить классификацию растительности от фона на основе индекса NDVI, затем произвести формирования бинарной маски для исключения из расчета индекса WBI фона не относящегося к растениям (по порогу значения $NDVI > 0.3$)

2.3. Выводы к главе 2

1. Изображающий гиперспектрометр 0,4-1,0 мкм является эффективным инструментом для определения относительной влажности почвы.

2. Водный индекс WBI, рассчитываемый на основе спектральных яркостей на длинах волн 900нм и 970нм позволяет с использованием ГСА, работающей в диапазоне 400-1000нм, проводить относительную бинарную оценку (достаточно/недостаточно) влажности почв по растительности в качестве маски, осуществляющей фильтрацию почвы на ГСИ, используя индекс NDVI. 3. Разработан метод с использованием индексов NDVI и WBI для оценки состояния растительности и оценки стресса растений из-за недостатка влаги в почве.

Глава 3. Оценка параметров почв сельскохозяйственного назначения по гиперспектральным изображениям

Важным аспектом оценки состояния почв наряду с продуктивной влагой, является оценка плодородия почв, количественная оценка почвенного углерода, участвующего в углеродном цикле в природе и динамики его изменения. Углерод в почве присутствует в основном в виде гумуса, растительных остатков и в виде карбонатов (в основном карбонаты кальция, значительно меньше карбонаты натрия и магния, поэтому кроме содержания углерода важно также знать содержание кальция. Чем выше содержание в почве этих компонентов, тем темнее почва и выше ее плодородие, характерным примером чего являются черноземные почвы. Последнее десятилетие развиваются методы детектирования участков земной поверхности с так называемой открытой (голой) почвой (bare soil) [81]. Открытая почва, по определению, это участки почвы без растений или зданий на поверхности Земли [81-82]. Такие участки являются одним из составляющих участков растительного покрова [83]. Детектирование таких участков является важной задачей экологического мониторинга [81-82]. Изменение числа участков голой почвы с течением времени обычно указывает на усиление урбанизации в данном районе [84]. В последнее время технология дистанционного зондирования Земли широко используется для мониторинга обнаженной почвы на больших площадях [85]. Для классификации типов поверхности используются как традиционные подходы [86], так и методы машинного обучения [87-88] и методы спектрального разделения [89]. Таким образом можно сказать, что задача определения количества углерода и кальция в открытой почве является актуальной. Однако, что указанные выше методы довольно сложны, очень чувствительны к ошибкам при вычислениях, а также существенно зависят от количества образцов [90-91].

Для ГСИ растительности существует большое количество методов на основе использования спектральных индексов, которые позволяют получить из гиперспектральных изображений большое количество целевой информации [83]. Есть много специализированных индексов: нормализованный разностный индекс вегетации растительности (NDVI) для определения количества зеленой массы [92], нормализованный разностный индекс воды (NDWI) для определения содержания поверхностных вод [93] и нормализованный разностный индекс непроницаемой поверхности (NDISI) для непроницаемой поверхности [94]. Но для открытой почвы универсальных почвенных индексов не существует. Для этого есть несколько причин. Во-первых, спектр почвы напрямую связан с ее свойствами [95], а эти свойства меняются из-за очень многих факторов, связанных, например, с погодой, обработкой и др. [96]. Во-вторых, оголённую почву сложно отличить от поверхностей другого типа. Индекс открытой почвы (BI) рассчитывается с использованием информации о среднем инфракрасном диапазоне, а также завязан на состояние растительности вблизи этого участка [97]. BI предназначен для определения участков открытой почвы в лесных массивах. Разностный нормализованный почвенный индекс (RNDISI) был получен эмпирически, т.е. для него не ясен его физический смысл [95]. Кроме этого, сложность использования этого индекса возрастает из-за того, что его формула зависит от отобранных образцов в районе исследования. Индекс на основе формулы отношения для светлой почвы (RIBS) и индекс для темной почвы (PIDS) не дали стабильных результатов. В работе [98] предложили нормализованный разностный индекс открытой почвы (NDBSI). Однако, вычисление этого индекса также требует информации из КИК диапазона. Кроме этого, следует заметить, что все приведенные выше публикации использовали спектральные данные с довольно низким спектральным разрешением. Использование гиперспектрометров с большим количеством спектральных каналов позволяет не только детектировать открытую почву или

осуществлять ее грубую классификацию, но и определять некоторые ее критические параметры. Одним из таких параметров является содержание в почве органического углерода. Почва накапливает больше углерода в наземной экосистеме, чем растительность и атмосфера в совокупности. Почвенный углерод чувствителен к любым изменениям земной поверхности и климату. Содержание углерода оказывает влияние на продуктивность почв. Таким образом, есть необходимость в количественной оценке содержания углерода в почвах, это позволяет выявлять локальную деградацию почв, а также обеспечивать геоданными системы точного земледелия для дифференцированного возделывания земель с целью уменьшения потерь почвами углерода или даже накоплению углерода. Уже есть работы, в которых для определения содержания углерода в почве использовались гиперспектрометры высокого разрешения [99-100]. Однако, в работе [99] также использовали двухдиапазонный гиперспектрометр, работающий диапазоне 0,4-1мкм и в КИК диапазоне.

Предполагается что применение систем ДЗЗ и алгоритмов дешифрования данных позволит, опираясь на данные космических снимков и снимков, полученных с применением БПЛА существенно упростит процесс создания почвенных карт, систематизирует процессы наземной валидации при выделении границ участков, участков ландшафта, проведение мониторинга состояния и оценки динамики этих изменений для своевременного устранения негативных процессов, способных привести к необратимым потерям плодородия и неизбежному выведению земель из сельскохозяйственного оборота (засоление, заболачивание, эрозия). Относительно низкие трудозатраты космической съемки являются существенным преимуществом по сравнению с аэрофотосъемкой. В работе [101] проведено исследование мультиспектральных космических изображений с использованием красных и инфракрасных каналов. Проведен анализ особенностей распределения типов почвенного покрова в зависимости от микрорельефа, проведена оценка

плодородия указанных микроучастков и прилегающих участков. Была проведена кластеризация космических снимков на основе данных NDVI. На основе проведенных исследований сделать однозначные выводы по растительности о качестве и продуктивности почв невозможно. Необходимо учитывать разновременные и разносезонные данные учитывающие также особенности накопления и динамики влаги в фазе вегетации растительности [102].

Гиперспектральный анализ состояния почвы обычно основывается на обработке гиперспектральных изображений растительного покрова, по состоянию которого можно косвенно судить о параметрах почвы [34]. Однако последнее десятилетие развиваются методы детектирования участков земной поверхности с так называемой открытой (голой) почвой (bare soil) [81]. Открытая почва, по определению, это участки почвы без растений или зданий на поверхности Земли [81-82]. Такие участки являются одним из составляющих участков растительного покрова [83]. Детектирование таких участков является важной задачей экологического мониторинга [24]. Изменение числа участков голой почвы с течением времени обычно указывает на усиление урбанизации в данном районе [84]. Мониторинг участков обнаженной почвы, особенно в городских и сельских районах, где наиболее активна деятельность человека, дает четкое понимание экологических последствий урбанизации. В последнее время технология дистанционного зондирования Земли широко используется для мониторинга обнаженной почвы на больших площадях [85]. Для классификации типов поверхности используются как традиционные подходы [86], так и методы машинного обучения [87-88] и методы спектрального разделения [89]. Можно отметить, что указанные выше методы довольно сложны, очень чувствительны к ошибкам при вычислениях, а также существенно зависят от количества образцов [90-91].

Существует большое количество методов на основе использования спектральных индексов, которые позволяют получить из гиперспектральных изображений большое количество целевой информации. При этом такой подход отличается простотой [83]. Существует довольно много специализированных индексов: нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) для определения количества зеленой массы [92], нормализованный разностный индекс воды (NDWI) для определения содержания поверхностных вод [93] и нормализованный разностный индекс непроницаемой поверхности (NDISI) для непроницаемой поверхности [94]. Но универсальных почвенных индексов не существует. Для этого есть несколько причин. Во-первых, спектр почвы напрямую связан с ее свойствами [95], а эти свойства меняются из-за очень многих факторов, связанных, например, с погодой [96]. Во-вторых, оголённую почву сложно отличить от непроницаемых поверхностей в виде асфальтовых и бетонных покрытий, поскольку их спектры очень похожи. Индекс открытой почвы (**baresoil index**) (BI) рассчитывается с использованием информации о среднем инфракрасном диапазоне, а также завязан на состояние растительности вблизи этого участка [97-98]. BI предназначен для определения участков открытой почвы в лесных массивах. Разностный нормализованный почвенный индекс (RNDISI) был получен эмпирически, т.е. для него не ясен его физический смысл [95]. Кроме этого, сложность использования этого индекса возрастает из-за того, что его формула зависит от отобранных образцов в районе исследования. Индекс на основе формулы отношения для светлой почвы (RIBS) и индекс для темной почвы (PIDS) не дали стабильных результатов. В работе [99] предложили нормализованный разностный индекс открытой почвы (NDBSI). Однако, вычисление этого индекса требует информации из коротковолнового инфракрасного диапазона, который регистрируется не во всех гиперспектрометрах. Кроме этого, следует заметить, что все приведенные выше публикации использовали спектральные данные с довольно низким

спектральным разрешением. Использование гиперспектрометров с большим количеством спектральных каналов позволяет не только детектировать открытую почву или осуществлять ее грубую классификацию, но и определять некоторые ее критические параметры. Одним из таких параметров является содержание в почве органического углерода. Почва накапливает больше углерода в наземной экосистеме, чем растительность и атмосфера в совокупности. Почвенный углерод чувствителен к любым изменениям земной поверхности и климату. Содержание углерода оказывает влияние на продуктивность почв. Таким образом, есть необходимость в количественной оценке содержания углерода в почвах, это позволяет выявлять локальную деградацию почв, а также обеспечивать геоданными системы точного земледелия для дифференцированного возделывания земель с целью уменьшения потерь почвами углерода или даже накоплению углерода. Уже есть работы, в которых для определения содержания углерода в почве использовались гиперспектрометры высокого разрешения [99-100]. Однако, в работе [99] 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. К сожалению, высокая стоимость светочувствительных матриц для коротковолнового инфракрасного диапазона делает такие гиперспектрометры малодоступными для широкого использования. В диссертации рассматривается возможность разделения почв по содержанию углерода и кальция на основе анализа гиперспектральных снимков в диапазоне 0,4-1 мкм [103*].

3.1. Формирование гиперспектральных изображений

Для экспериментального исследования классификации типов почв были заранее исследованы спутниковые данные территории нескольких полей с

посадками монокультур озимой и яровой пшеницы с применением технологии безплугового земледелия («ноутилл») одного и фермерских хозяйств Самарской области. На основе изображений в программе агроскаутинга на нескольких полях были выбраны по 1 однородной зоне внутри каждого поля, на которых на протяжении нескольких сезонов наблюдались устойчивые зоны продуктивности с соответствующей картиной распределения индекса NDVI. Данные устойчивые зоны были использованы для отбора проб. Для получения более детальной информации о почвах отбор проб на этих участках осуществлялся по два образца с глубин поверхностного слоя 0-10 см и более глубокого 10-20 см, так как поверхностный слой почвы подвержен более высокой потере углерода под воздействием солнца, ветра, дождя в течении вегетационного сезона. Пример изображения одного из полей приведен на Рисунке 3.1.

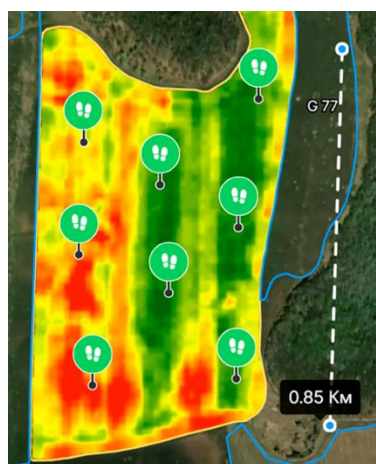


Рисунок 3.1 – Изображение поля G77 с распределением индекса NDVI
(красный – низкое значение, зеленый – высокое значение)

Для эксперимента были отобраны 9 образцов почв. Для исследования элементного состава почв использовался метод энергодисперсионного микроанализа с использованием системы JED-2300 в составе растрового электронного микроскопа. Для проведения анализа все пробы почв были одинаково размолоты до однородной морфологии фракции с помощью грунтовой роликовой мельницы. На Рисунке 3.2.б приведено изображение

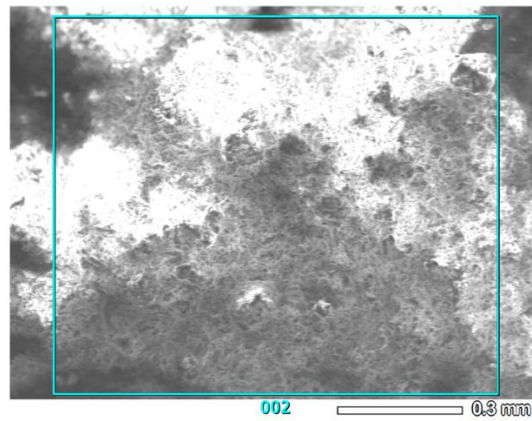
пробы грунта в растровом электронном микроскопе. Поле сканирования для накопления характеристического спектра составляло область размером 1,5 на 2 мм. Характеристический спектр приведен на Рисунке 3.2.в. В Таблице 3.1 приведены результаты определения элементного состава для углерода и кальция в % от общей массы. От исследования количественного содержания таких элементов как фосфор Р и ряда микроэлементов отказались в виду их малости и высокой ошибки аппроксимации модели по оценке их количественного содержания.

В диссертации использовалась лабораторная съемка образцов почв при искусственном освещении галогеновой лампой для получения пространственно-спектральных данных. В отличие от работы [99], предполагается, что такой метод съемки позволит проводить быстрый анализ образцов почв на содержание углерода без использования химических методов. Также такой метод съемки позволяет провести съемку всех образцов почвы одновременно, что минимизирует различия условий съемки, освещения и др.

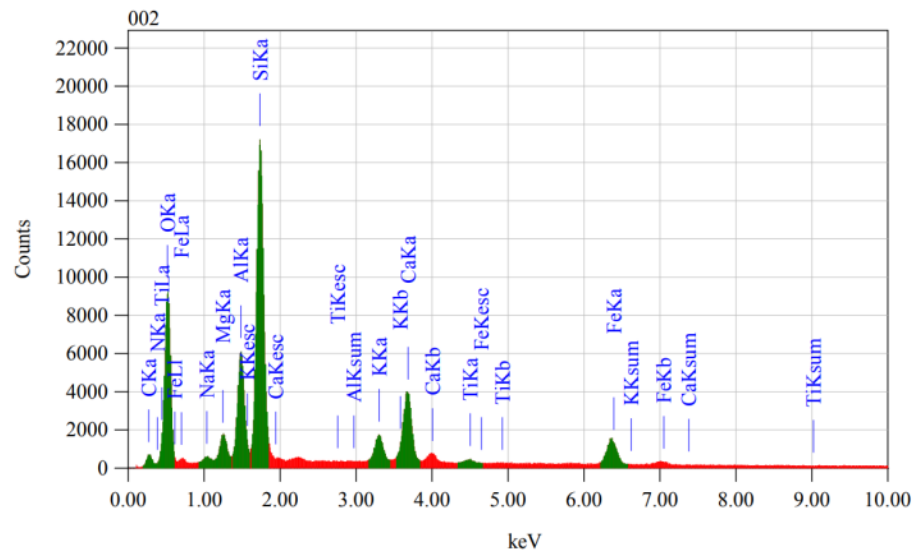
Получение гиперспектральных изображений образцов почв проводилось при помощи мало-массогабаритной щелевой сканирующей гиперспектральной камеры на основе схемы Оффнера (далее – гиперспектрометр), которая имеет рабочий диапазон 400-1000 нм и около 250 каналов. Для формирования гиперспектрального изображения образцов почвы съемка осуществлялась перемещением подвижной платформы при неподвижном расположении камеры. На рисунке 3.2а приведена фотография экспериментального стенда.



а)



б)



в)

Рисунок 3.2 – Фотография экспериментальной установки (а): 1 – гиперспектрометр, 2 – платформа с образцами, 3 – рельс системы перемещения платформы, изображение пробы грунта в растровом электронном микроскопе (б), характеристический спектр энергодисперсионного микроанализа образца почвы (в)

Таблица 3.1 – Содержание углерода и кальция в разных образцах почвы и нумерация образцов почвы

Тип почвы	C, %	Ca, %	№ пробы
IP2-4-6 N3 (0-10)	4,97	3,68	4
IP2-4-6 N3 (10-20)	5,04	3,18	1
G70-2 (10-20)	5,84	4,29	8
G70-2 (0-10)	3,85	14,28	3
IP 1-3-5 3(0-10)	5,13	6,10	6
IP 1-3-5 3(10-20)	5,61	6,64	2
2кфх (10-20)	4,85	12,65	7
3кфх 14(0-10)	5,58	8,13	5
3кфх 14 (10-20)	6,03	5,14	9

В первых экспериментах была сделана попытка найти индексную формулу для классификации разных типов почвы. Для этого проводилось построение всех возможных спектральных индексов разностно-нормализованного типа и индекса отношения для всех 250 спектральных каналов. Этот метод описан в работе [24]. Однако такой перебор не позволил выявить индекс, позволяющий однозначно разделить все образцы почв. На Рисунок 3.3 представлен фрагмент индексного изображения с 4 образцами почв, один из которых на индексном изображении существенно ярче других. Кроме того, следует отметить, что все почвы имеют крайне схожие спектральные сигнатуры (Рисунок 3.4).

Однако, подобрать такие индексные формулы для всех 9 образцов не удалось. Это вполне ожидаемый результат, поскольку почвы имеют близкие физико-химические свойства, отличающие по составу химических элементов на единицы процентов, также спектр отражения, регистрируемый в изображении, имеет малое количество уровней квантования практически для всех спектральных слоев.

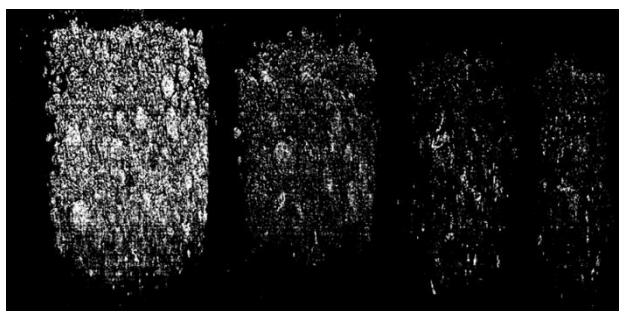


Рисунок 3.3 – Индексное изображение образцов почвы на основе разностно-нормализованной формулы с использованием каналов с длинами волн 660 и 750 нм

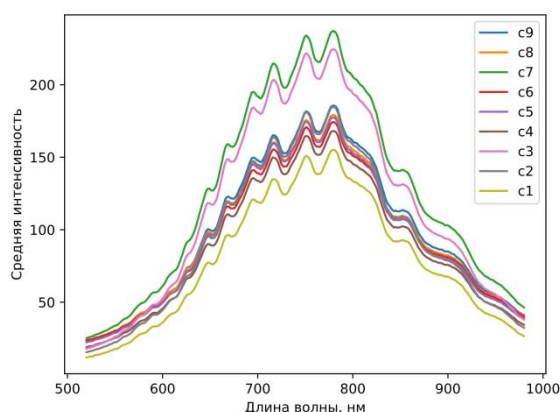


Рисунок 3.4 – Спектры 9 образцов почв

Для примера на рисунке 3.5 показано полное изображение всех 9 образцов почвы на 240-ом спектральном слое, что соответствует длине волны 956 нм.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Гиперспектральное изображение 9 образцов почв: (а) (240 слой гиперкуба длина волны 956 нм; (б) цветосинтезированное изображение на основе трех каналов, соответствующих цветам RGB (красный – 635 нм, зеленый – 534 нм, синий – 485 нм)

Как видно по спектральным характеристикам почв на Рисунке 3.4, их спектральные сигнатуры имеют очень похожий вид. В рамках диссертации решено было использовать нейросетевой подход для классификации типов почв по содержанию в них углерода и кальция. Точность классификации может снижаться по причине неоднородности освещенности сцены, из-за чего один класс почвы может ошибочно предсказываться одновременно как два или три класса, отличающихся по численному значению содержащегося в них углерода. Для компенсации неоднородности были получены калибровочные значения отраженной яркости источника освещения от белой бумаги и получена матрица коэффициентов нормировки каждого слоя гиперспектральных изображений для данного источника.

3.2. Гиперспектральные индексы для почвы

Рассмотрим основные методы получения параметров почвы на основе гиперспектральных индексов [104-105].

Метод: индекс растительности с коррекцией по почве (Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)) – это индекс растительности, который пытается минимизировать влияние яркости почвы с помощью коэффициента коррекции яркости почвы. Он часто используется в пустынных областях, где растительное покрытие незначительно, а результатами будут значения от -1.0 и 1.0.

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \cdot (1 + L)$$

Метод: модифицированный индекс растительности с коррекцией по почве (Modified Soil Adjusted Vegetation Index, MSAVI2) минимизирует влияние обнаженной почвы на индекс SAVI.

$$MSAVI2 = 0,5 \cdot \left[2 \cdot (NIR + 1) - \sqrt{(2 - NIR + 1)^2 - 8 \cdot (NIR - RED)} \right]$$

NIR = значения пикселей из ближнего инфракрасного канала

RED = значения пикселей из красного канала

Метод: преобразованный индекс растительности с коррекцией по почве (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI)) – это индекс растительности, который пытается минимизировать влияние яркости почвы путем предположения, что линия почвы имеет произвольный уклон и пересечение.

$$TSAVI = \frac{s \cdot (NIR - s \cdot RED - a)}{a \cdot NIR + RED - a \cdot s + X \cdot (1 + s^2)}$$

NIR = значения пикселей из ближнего инфракрасного канала

RED = значения пикселей из красного канала

s = уклон линии почвы

a = пересечение линии почвы

X = коэффициент коррекции, установленный для минимизации искажений из-за почвы

Оценка цветовых характеристик в видимом диапазоне. Особенности в поведении спектральных кривых наблюдаются начиная с желто-зеленой области спектра (от 555–575 нм) и далее ярко прослеживаются в диапазонах 580–600 нм, 640–660 нм, 670–700 нм, 705–740 нм, 745–795 нм. Таким образом, ярко выделяются полосы шириной от 20 до 50 нм, представляющие интерес для дальнейшей работы. Под эти полосы в настоящий момент подбираются соответствующие узкополосные фильтры. Особенности поведения спектральных кривых в перечисленных диапазонах с большой вероятностью указывают на степень содержания в пробах почвы определенного химического элемента. Исследования в этом направлении уже ведутся, все пробы почв будут подвергнуты подробному химическому анализу. На сегодняшний день уже установлено, что чем ниже на графике находится спектральная кривая, тем выше содержание гумуса в соответствующем образце (в пределах группы спектральных кривых с одинаковым временем экспозиции) [106].

3.3 Нейросетевая классификация

Рассмотрим двухэтапную процедуру классификации почв по содержанию углерода и кальция. На первом этапе осуществляется поиск наиболее эффективного многоклассового классификатора на основании метрики *F1-score*. На втором этапе с целью увеличения точности классификации почв формируется ансамбль из многоклассового и уточняющих бинарных классификаторов.

На первом шаге данной процедуры осуществлено сравнение метода ближайших соседей (в качестве базового алгоритма), спектральной глубокой сверточной нейронной сети 1D-CNN [25] и нормализованной пространственно-спектральной сверточной сети N3D-CNN, базовая версия которой описана в работе [26]. Данная сеть более подробно описана в работах по обнаружению сорных растений [27] и классификации сортов кофе [28]. Архитектура сети представлена на Рисунке 3.6.

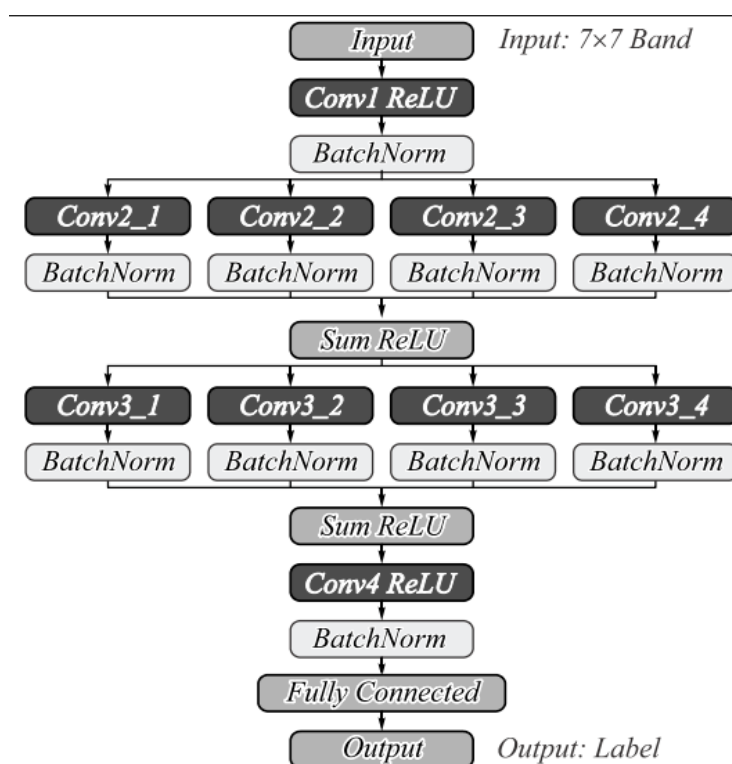


Рисунок 3.6 – Архитектура сверточной пространственно-спектральной сети

Гиперспектральное изображение почв, используемое в диссертации имело пространственное разрешение 3500x320 пикселей. Для эксперимента гиперспектральные данные были размечены по содержанию углерода и кальция (Рисунок 3.7 и Рисунок 3.8) в соответствии с результатами химического анализа (таблица 1), где: синий цвет - низкое содержание вещества (менее 4,9% для углерода и менее 5% для кальция); зеленый цвет - среднее содержание вещества (от 4,9% до 5,5% для углерода и от 5% до 8% для кальция); желтый цвет - высокое содержание вещества (более 5,5% для углерода и более 8% для кальция). Суммарное количество размеченных данных для всех четырех классов составило 1120000 гиперпикселей (со спектральным разрешением в 250 каналов).



Рисунок 3.7 – Маска разметки по содержанию углерода в почве



Рисунок 3.8 – Маска разметки по содержанию кальция в почве

Обучающая выборка сформирована из 20% случайных фрагментов гиперспектрального изображения для каждого класса. Валидационная выборка составила 5% от обучающей. Обучение проводилось при помощи оптимизатора Adagrad. Параметры обучения $\text{learning rate} = 0,01$, $\text{momentum} = 0,01$. Размеры мини-батчей у спектральной (1D-CNN) и пространственно-спектральной (N3D-CNN) сетей составил 100 и 40 образцов соответственно. В качестве функции потерь использовалась кросс-энтропия. Графики значений функции потерь на обучающих данных показаны на Рисунке 3.9а-б. Графики значений точности (метрика ассигасу) на валидационной выборке показаны на Рисунок 3.9в-г.

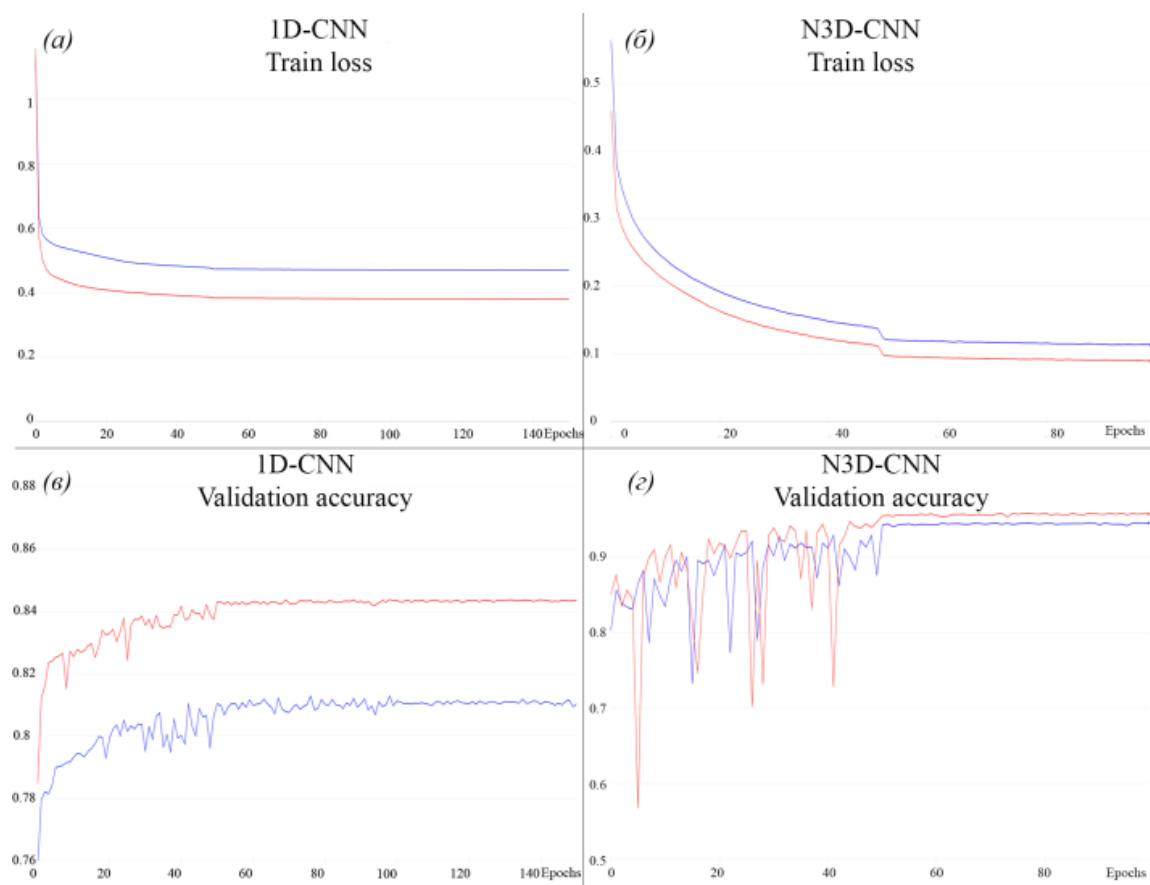


Рисунок 3.9 – Графики значений функции потерь на обучающей выборке: (а) 1D-CNN, (б) N3D-CNN; графики значений метрики ассигасы на валидационной выборке: (в) 1D-CNN, (г) N3D-CNN (синий – кальций, красный - углерод)

Тестовые данные формировались из 80% ГСИ, не вошедшего в обучающий набор, графическое представление результатов классификации проводилось на всем ГСИ для большей наглядности. В качестве метрик оценки качества классификации рассматривались *precision* (3.1), *recall* (3.2), *F1-score* (3.3) (для каждого класса и средний для всех классов).

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (3.1)$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3.2)$$

$$F1 = \frac{precision * recall}{(\beta^2 * precision) + recall}. \quad (3.3)$$

Precision показывает насколько точно классификатор отличает объекты своего класса от чужого. Более низкое значение метрики говорит о том, что классификатор определяет объекты чужого класса, как свои.

Recall показывает насколько полно классификатор может обнаружить объекты своего класса из всех объектов своего класса. Более низкое значение метрики говорит о том, что классификатор находит малую часть объектов своего класса.

F1-score является объединением метрик качества *recall* и *precision* в один агрегированный критерий качества.

Численные результаты классификации типов почв по содержанию углерода и кальция с помощью многоклассовых классификаторов приведены в Таблицах 3.2 и 3.3.

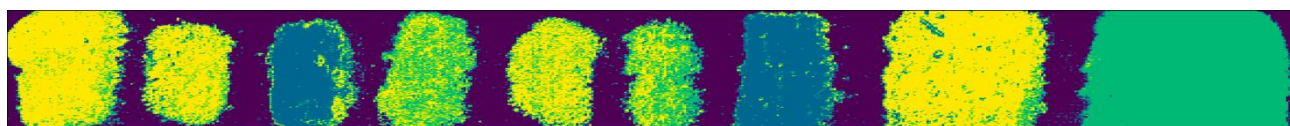
Таблица 3.2 – Результаты работы многоклассовых классификаторов почв по содержанию углерода на тестовых данных

Класс/ Метрика	KNN			1D-CNN			N3D-CNN		
	Precision, %	Recall, %	F1-score, %	Precision, %	Recall, %	F1-score, %	Precision, %	Recall, %	F1-score, %
Фон	90	97	93	91	97	94	96	94	95
Высокое содержание	80	83	81	78	83	80	94	95	95
Среднее содержание	85	77	81	85	73	79	96	92	94
Низкое содержание	92	86	89	92	88	90	98	97	97
Среднее	86	85	86	86	85	85	96	94	95

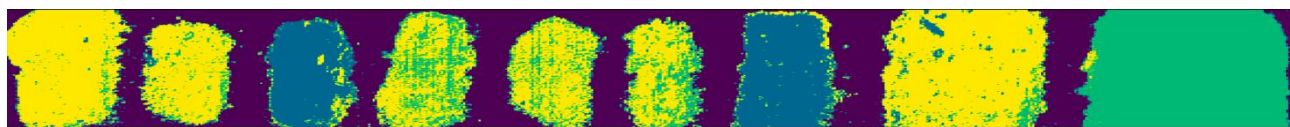
Исходя из полученных результатов можно говорить о значительном превосходстве N3D-CNN по всем трем метрикам. Значения метрик результатов классификации 1D-CNN и метода ближайших соседей очень близки, что показывает отсутствие преимуществ применения данной нейронной сети, за исключением времени обработки ГСИ (4 часа реального времени против 15 минут для ГСИ с разрешением 3500x320x250). Графические представления результатов многоклассовой классификации представлены на Рисунке 3.10 и Рисунке 3.11. При сравнении данных изображений с Рисунка 3.8 и Рисунка 3.9 видно, что классификация типов почв по содержанию углерода и кальция позволяет с высокой долей правдоподобности определить класс почв. Таким образом, для формирования ансамбля была выбрана сеть N3D-CNN.

Таблица 3.3 – Результаты работы многоклассовых классификаторов почв по содержанию кальция на тестовых данных

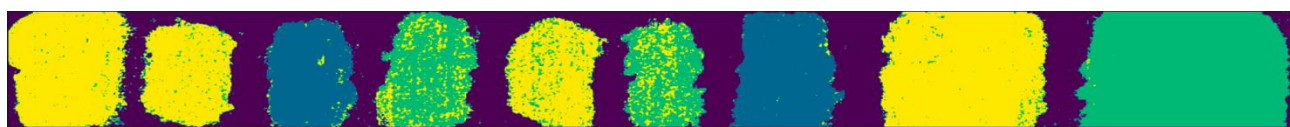
Класс/ Метрика	KNN			1D-CNN			N3D-CNN		
	Precision, %	Recall, %	F1-score, %	Precision, %	Recall, %	F1-score, %	Precision, %	Recall, %	F1-score, %
Фон	90	97	93	90	97	93	96	94	95
Высокое содержание	88	68	77	87	66	75	95	93	94
Среднее содержание	73	81	77	69	81	74	93	92	93
Низкое содержание	82	80	81	84	77	80	93	93	93
Среднее	83	81	82	82	80	80	95	93	94



(a)

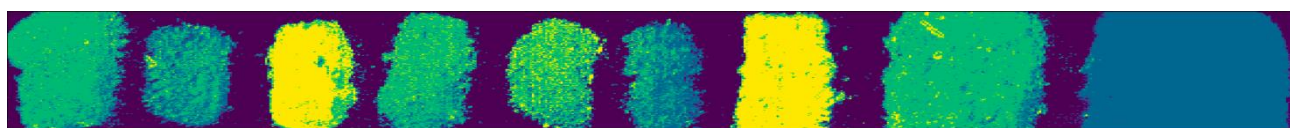


(б)

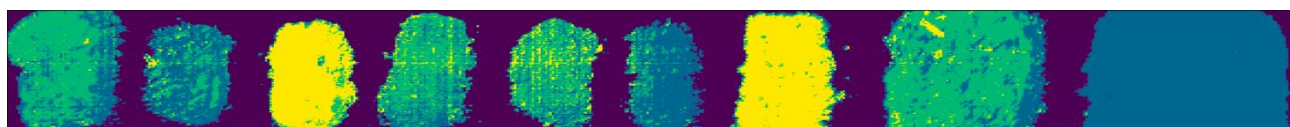


(в)

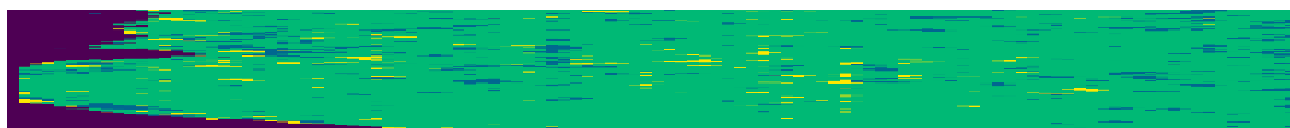
Рисунок 3.10 – Графическое представление результатов многоклассовой классификации почв по содержанию углерода методом ближайших соседей (а), спектральной сверточной сетью 1D-CNN (б), нормализованной сетью N3D-CNN (в)



(a)



(б)



(в)

Рисунок 3.11 – Графическое представление результатов многоклассовой классификации почв по содержанию кальция методом ближайших соседей (а), спектральной сверточной сетью 1D-CNN (б), нормализованной сетью N3D-CNN (в)

На втором этапе результаты многоклассовой классификации N3D-CNN уточнялись результатами n-бинарных классификаторов на основе этой же сети

для отдельно взятых классов. На этапе обучения помимо многоклассовой классификации на полном объеме данных датасет разбивался на N бинарных наборов, где в качестве целевого класса выступал отдельный класс почвы из изначальной разметки. Далее ансамбль сетей обучается на бинарных наборах данных. После получения результатов бинарной классификации модель оценивает метрики *F1-score*, *precision* и *recall* для каждого класса, а затем сравнивает результаты бинарной модели для одного отдельного класса и результаты для соответствующего класса в модели многоклассовой классификации. Далее осуществляется процесс настройки будущего ансамбля финального результата. Все результаты бинарных моделей сортируются от самой худшей модели (в качестве метрики выступает *F1-score*) до самой лучшей. Самые лучшие модели сравнивают свои результаты с соответствующими результатами классификации модели многоклассовой классификации. При соблюдении условия:

$$recall_{bin} - recall_{mul} > precision_{mul} - precision_{bin} + k, \quad (3.4)$$

где k - коэффициент отбора бинарных моделей в диапазоне от 0 до 1 (при увеличении этого коэффициента ансамбль будет требовать либо более высокий *recall* от бинарной классификации при том же уровне *precision*, либо более высокий *precision* при том же *recall*) модель встраивается в ансамбль финального результата. Сборка же финального результата выглядит как пошаговое наложение на результат многоклассовой классификации результатов бинарных моделей в полученном порядке.

Экспериментальные оценки значений метрик классификации типов почв по содержанию углерода и кальция с использованием сети N3D-CNN совместно с ансамблем сверточных пространственно-спектральных сетей представлены в Таблицах 3.4 и 3.5.

Таблица 3.4 – Результаты работы сети N3D-CNN с ансамблем сетей для многоклассовой классификации почв по содержанию углерода

Класс/ Метрика	N3D-CNN			Ансамбль N3D-CNN		
	Precisio n, %	Recall, %	F1- score, %	Precisio n, %	Recall, %	F1- score, %
Фон	96	94	95	94	99	97
Высокое содержание	94	95	95	97	94	96
Среднее содержание	96	92	94	96	95	96
Низкое содержание	98	97	97	99	97	98
Среднее	96	94	95	97	96	97

Таблица 3.5 – Результаты работы сети N3D-CNN с ансамблем сетей для многоклассовой классификации почв по содержанию кальция

Класс/ Метрика	N3D-CNN			Ансамбль N3D-CNN		
	Precisio n, %	Recall, %	F1- score, %	Precisio n, %	Recall, %	F1- score, %
Фон	96	94	95	93	99	96
Высокое содержание	95	93	94	96	97	97
Среднее содержание	93	92	93	97	93	95
Низкое содержание	93	93	93	98	97	96
Среднее	95	93	94	96	96	96

Визуальное представление результатов классификации проб почв сетью N3D-CNN совместно с ансамблем бинарных классификаторов показано на Рисунке 3.12 и Рисунке 3.13. Сравнение значений метрики точности (accuracy) всех классификаторов представлено в Таблице 3.6.

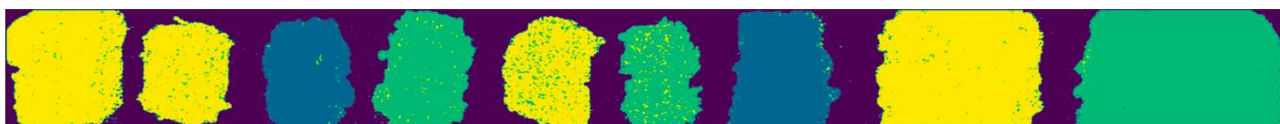


Рисунок 3.12 – Графическое представление результатов классификации почв нормализованной сетью N3D-CNN совместно с ансамблем бинарных классификаторов по содержанию углерода

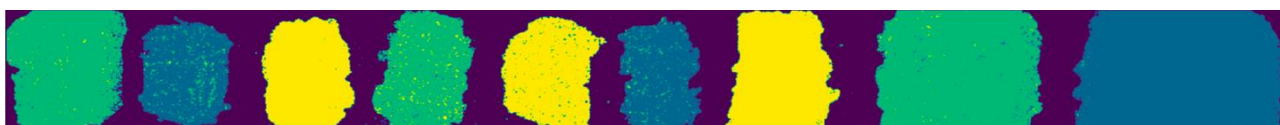


Рисунок 3.13 – Графическое представление результатов классификации почв нормализованной сетью N3D-CNN совместно с ансамблем бинарных классификаторов по содержанию кальция

Таблица 3.6 – Значения метрики точности (ассигасу, %) всех рассмотренных классификаторов для классификации почв по содержанию углерода и кальция

	KNN	1D-CNN	N3D-CNN	Ансамбль N3D-CNN
Углерод	86	85	94	96
Кальций	83	81	93	96
Среднее	84,5	83	93,5	96

По численному представлению результатов классификации можно сделать вывод, что использование ансамбля бинарных классификаторов для уточнения отдельных классов в дополнение к сети N3D-CNN позволяет увеличить значения всех рассматриваемых метрик классификации по содержанию углерода и кальция в почве на 1-2,5%.

3.4. Выводы к главе 3

1. Традиционная обработка результатов гиперспектральной съемки, в том числе, с использованием ближнего инфракрасного диапазона, демонстрирует погрешность измерения, не позволяющую проводить

непосредственную разделение образцов почв на основе использования известных почвенных индексов.

2. Полный перебор всех спектральных каналов с расчетом индексных изображений по формуле NDI не позволил уверенно разделить все 9 образцов почвы по содержанию углерода и кальция на три класса, очевидно, что для уверенного разделения почвы на три класса по содержанию углерода и кальция, нужны более сложные индексные формулы, основанные на использовании 3-4 длин волн. Однако полный перебор согласно таким формулам является задачей повышенной вычислительной сложности.

3. Сверточная нейронная сеть M3D-CNN, дополненная результатами n -бинарных классификаторов на основе M3D-CNN для отдельно взятых классов позволила на основании полученных ГСИ разделить все девять образцов на три класса по содержанию углерода и кальция (мало, норма, много).

Глава 4. Рефракционно-дифракционный объектив с минимизированным уровнем внеосевых геометрических аберраций

4.1 Анализ изображающих дифракционно-оптических систем для формирования изображений

Совместное использование дифракционных и рефракционных элементов в оптических изображающих системах впервые было предложено Ломаном в 1970г. [107]. В [107] было предложено использовать дифракционные оптические элементы для создания варифокального объектива. Но предложенное решение работало только для монохроматического света. В белом свете разработанный объектив обладал всеми недостатками дифракционной изображающей оптики, т.е. огромными хроматическими аберрациями. 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 [108]. Дальше количество публикаций по этой тематике существенно увеличивается. Дубик Б., Кот С. и др. в 1995г. в своей работе [109] показывают, что одновременно с хроматической аберрацией использование дифракционных линз позволяет компенсировать сферическую аберрацию. В [110] фирма Eastman Kodak Company представила промышленно производимые дифракционные гибридные ахроматы. 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. Гибридные рефракционно-дифракционные системы также предложено использовать в проекционных системах [111] В работах Грейсуха Г.И. [112-113] 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 практически редко реализуются, в отличие от классической технологии изготовления дифракционных линз, которая позволяет реализовать весьма широкий спектр направлений применения. Так в 2017г. [114] дифракционные линзы использовали для составной изображающей системы идентичной фасеточному глазу насекомых. В [115] рефракционно-дифракционные элементы использовались в качестве составной части искусственных хрусталиков глаза. В качестве дифракционной структуры предложено использовать бинарную линзу, которая являлась одновременно, линзой и с положительной и 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.

Особым классом рефракционно-дифракционных элементов являются гармонические линзы, анализу которых, также посвящено значительное количество публикаций [116-118]. В [119] рассматривается зеркальный объектив с отражением внутрь стекла и с кольцевой апертурой, в котором использование дифракционной линзы является единственным способом компенсации хроматической аберрации. В [120] предложили и реализовали расширение идеи, описанной в [107] на новом технологическом уровне, но со старыми недостатками.

В диссертации рассматривается развитие идеи, представленной в [109], в которой показано, что с использованием дифракционной линзы можно компенсировать сферическую аберрацию вместе с хроматической аберрацией. Если рассматривать такую дифракционную линзу, то видно, что такая компенсация дает отличную функцию рассеяния точки (ФРТ) в области

вблизи оптической оси, но внеосевая ФРТ при этом довольно быстро растет с ростом угла и уже при углах поля зрения в $6-8^\circ$ достигает совершенно неприемлемых величин. При этом с точки зрения площади покрытия светочувствительной матрицы именно внеосевые aberrации являются наиболее значимыми.

В связи с этим мной сделана попытка объединить компенсацию хроматических и внеосевых геометрических aberrаций в одной дифракционной линзе, за счет оптимизации дизайна дифракционной линзы. При этом возможно повышение коэффициента светорассеяния, с которым также предлагается бороться методами обработки изображений, как классическими, так и нейросетевыми.

В современных смартфонах используется все более сложная оптика для получения высокого качества изображения. Поскольку толщина корпуса уже не позволяет уместить такие объективы при нормальном расположении, в последних моделях смартфонов используется конфигурация с поворотной призмой. Минимизация размеров объектива является актуальной задачей, без решения которой невозможно дальнейшее сокращение размеров таких устройств. Минимизировать размеры объектива можно, используя дифракционную или гармоническую линзу [107–114]. За счет особой формы таких линз можно уменьшить хроматизм, но все же относительно высокая хроматическая aberrация этих оптических элементов должна устраняться дополнительной цифровой обработкой [115]. С одной стороны, дополнительная обработка вполне подходит для регистрирующих устройств в современных смартфонах, обладающих высокими вычислительными мощностями, с другой стороны, оптическое разрешение в современных смартфонах настолько высоко, что цифровой обработки недостаточно, и желательно использование объектива, сопоставимого по качеству изображения с объективами классического типа на основе большого количества рефракционных линз. Все чаще рассматриваются гибридные

системы, содержащие как рефракционные, так и дифракционные элементы [116–121].

]. Однако работы по гибридным системам не используют все возможности коррекции aberrаций на основе дифракционных линз. Дифракционные линзы в таких системах используются классическим образом как некий ахроматизирующий элемент в составе классического многолинзового объектива [116] либо в сочетании с рефракционным элементом свободной формы [118], который компенсирует геометрические aberrации в объективе. Также используются принципиально двухфокусные системы [120–121]. Ни в одной работе не попытались модифицировать рельеф дифракционной линзы для компенсации основных геометрических aberrаций. В диссертации рассматривается методика объединения компенсации хроматических и геометрических aberrаций в одной дифракционной линзе на основе оптимизации отдельных дифракционных зон [122*, 123*].

4.2. Расчет и моделирование дифракционной линзы для компенсации хроматической aberrации в составе рефракционно-дифракционной оптической системы

Основная идея использования дифракционной оптики в составе классических изображающих объективов основана на том, что материальная дисперсия рефракционных линз и дисперсия фокусирующих свойств дифракционной линзы имеют разные знаки. Так с увеличением длины волны фокусное расстояние рефракционной линзы увеличивается, для дифракционной же линзы наблюдается обратный эффект. Использование дублета (Рисунок 4.1) из рефракционной и дифракционной линзы позволяет при правильном подборе параметров полностью исключить хроматическую aberrацию на двух длинах волн и сильно уменьшить ее в интервале между этими длинами волн [108]. При этом наиболее правильно делать одну поверхность линзы рефракционной а вторую дифракционной (Рисунок 4.1а),

однако такая компоновка приводит к довольно трудно преодолимым технологическим трудностям. Поэтому в рамках данной работы все расчеты и моделирование проводились для схемы, представленной на рисунке 4.1б.

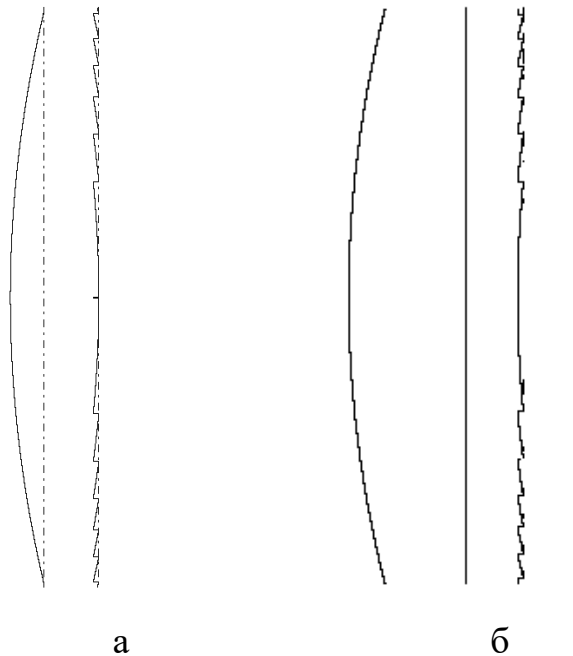


Рисунок 4.1 – Классическая компоновка системы из рефракционной и дифракционной линз, в которой компенсируется хроматическая абберация:

(а) – в виде одной линзы с рефракционной и дифракционной поверхностями, в виде системы из плоско выпуклой линзы; (б) – дифракционной линзы на поверхности плоской пластины

Обычно такая схема рассматривается в качестве принципиальной и не пригодной к практическому использованию, поскольку при использовании стандартной сферической рефракционной линзы и стандартной дифракционной линзы, аппроксимирующей так же сферическую линзу, получается система с существенными геометрическими абберациями. Поэтому дифракционная оптика рассматривается в составе достаточно сложных оптических систем [121,124] лишь как элемент компенсации хроматической абберации, или хроматической абберации и сферической абберации [116]. Однако, возможности дифракционной оптики намного шире. Особое внимание следует обратить на результаты работы [125] там для

компенсации геометрических aberrаций использовали сложнейший рефракционный элемент свободной формы, при этом в оптической системе находится и дифракционная линза. Эта статья хорошо иллюстрирует подход исследователей хорошо знакомых с расчетом рефракционных систем и не использующих все возможности дифракционной оптики. Дифракционная линзы может аппроксимировать любую асферическую поверхность, сколь угодно высокой сложности, что позволяет использовать ее одновременно и как компенсатор геометрических aberrаций, при этом дифракционный хроматизм от этой формы практически не зависит. По сути, можно рассматривать в качестве параметров оптимизации каждую дифракционную зону в отдельности.

К сожалению, популярные сегодня оптические программы для расчета и моделирования изображающих оптических систем, такие как ZEMAX и CODE 5 не предоставляют удобные инструменты для расчета систем с дифракционной оптикой и тем более для их полноценной оптимизации.

Поэтому для моделирования и оптимизации изображающих систем, содержащих произвольное количество дифракционных линз, было разработано программное обеспечение HARMONY, которое реализует базовый набор инструментов расчета и оптимизации изображающих систем, содержащих произвольное количество рефракционных и дифракционных поверхностей.

Рассмотрим основные расчетные формулы для формирования рефракционно-дифракционного ахроматического дублета [115]. Условие ахроматизации это равенство фокусных расстояний системы из двух линз при двух длинах волн. Для рефракционной линзы фокусное расстояние на длине волны λ_1 будет определяться формулой:

$$f(\lambda_1) = \frac{R_1 R_2 n(\lambda_1)}{[n(\lambda_1) - 1][n(\lambda_1)(R_1 + R_2) - d(n(\lambda_1) - 1)]} \quad (4.1)$$

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

$$f^d(\lambda_1) = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_1}, \quad (4.2)$$

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

$$f(\lambda_2) = \frac{R_1 R_2 n(\lambda_2)}{[n(\lambda_2) - 1][n(\lambda_2)(R_1 + R_2) - d(n(\lambda_2) - 1)]} \quad (4.3)$$

$$f^d(\lambda_2) = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_2} \quad (4.4)$$

Совокупное фокусное расстояние получившейся системы из дифракционной и рефракционной линз выражается формулой

$$F = \frac{ff^e}{f + f^d - D} \quad (4.5)$$

Условие равенства общего фокусного расстояния

$$\frac{f(\lambda_1)\lambda_0 f_0}{\lambda_1 \left[f(\lambda_1) + \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_1} - D \right]} = \frac{f(\lambda_2)\lambda_0 f_0}{\lambda_2 \left[f(\lambda_2) + \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_2} - D \right]} \quad (4.6)$$

После несложных преобразований получаем

$$\lambda_0 f_0 = \frac{f(\lambda_1)f(\lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_2) - d \cdot [f(\lambda_2)\lambda_2 - f(\lambda_1)\lambda_1]}{f(\lambda_1) - f(\lambda_2)} \quad (4.7)$$

Очевидно, что наилучший результат будет, если расчетная длина волны будет располагаться посередине между λ_1 и λ_2 $\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$, тогда формула (4.7) преобразуется к виду.

$$f_0 = \frac{2 \cdot \{f(\lambda_1)f(\lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_2) - d \cdot [f(\lambda_2)\lambda_2 - f(\lambda_1)\lambda_1]\}}{(\lambda_1 + \lambda_2)[f(\lambda_1) - f(\lambda_2)]} \quad (4.8)$$

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

Однако, при моделировании в программе HARMONY оптическая система, сконфигурированная по формулам (4.1-4.8) не дает оптимальный результат (Рисунок 4.2). На Рисунке 4.2 представлена зависимость сдвига фокальной плоскости от длины волны для рассчитанной системы с рефракционной и дифракционной линзами. Точная оптимизация хроматической aberrации в программе HARMONY дает отличное от формул (4.1-4.8) решение. Относительная разница значений параметров составляет 5-7%.

Так для рефракционной выпукло–плоской линзы с фокусным расстоянием 75мм из стекла марки BK7, расчет по формулам (4.1-4.8) дал значение $f_0=647$ мм, оптимизация в программе HARMONY дала значение $f_0=626$ мм, на Рисунок 4.3 показана зависимость сдвига фокальной плоскости от длины волны для оптимизированной в программе HARMONY системы.



Рисунок 4.2 – Зависимость сдвига фокальной плоскости от длины волны для системы рефракционная и дифракционная линза, рассчитанная по (4.1-4.8)

Из Рисунка 4.2 видно, что не достигнуто условие равенства 0 величины сдвига для двух границ видимого диапазона.



Рисунок 4.3 – Зависимость сдвига фокальной плоскости от длины волны для системы рефракционная и дифракционная линза, оптимизированная в программе HARMONY.

Кроме этого в программе HARMONY осуществлялась оптимизация ширины внеосевой функции рассеяния точки. В качестве параметров оптимизации выступали высоты микрорельефа в каждой дифракционной зоне отдельно. Высота каждой дифракционной зоны рассматривалась как отдельная координата, и оптимизация велась методом покоординатного спуска.

На Рисунке 4.4аб приведены функции рассеяния точки для системы из рефракционной и дифракционной линз, которая описана выше, до и после оптимизации соответственно.

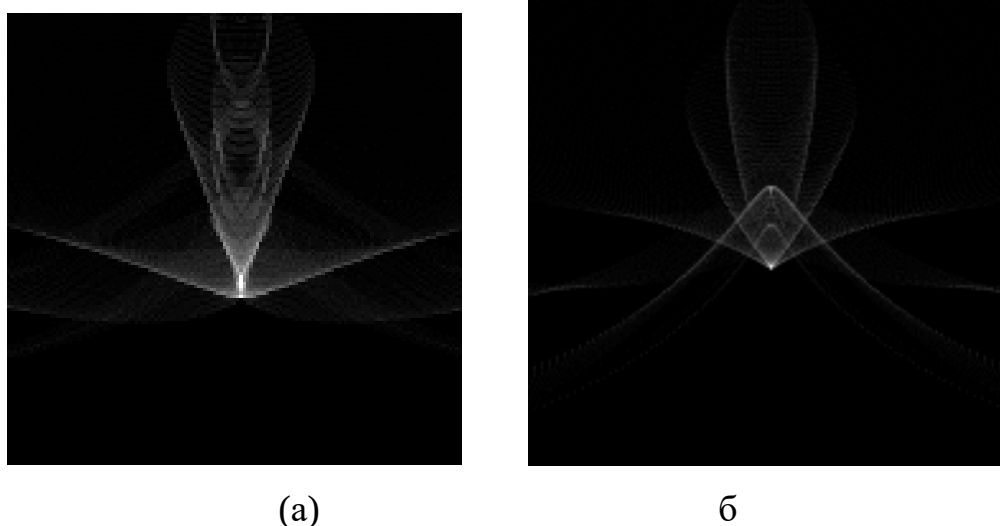


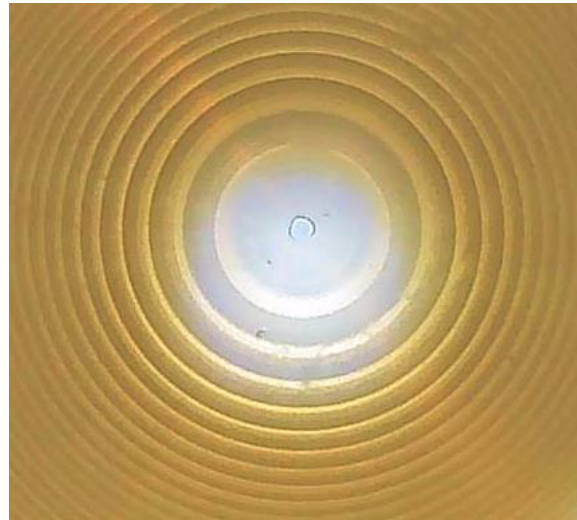
Рисунок 4.4 – Функция рассеяния точки 8° от оси до оптимизации (а) и после оптимизации (б) в квадрате $64*64\text{мкм}$

Как видно из рисунка 4.4 после оптимизации ширина функции рассеяния точки действительно снизилась. Точное измерение по распределению интенсивности дает ширину $11,2\text{мкм}$ для неоптимизированного распределения и $7,1\text{мкм}$ для оптимизированного распределения, т.е. наблюдается сужение более чем в 1,5раза.

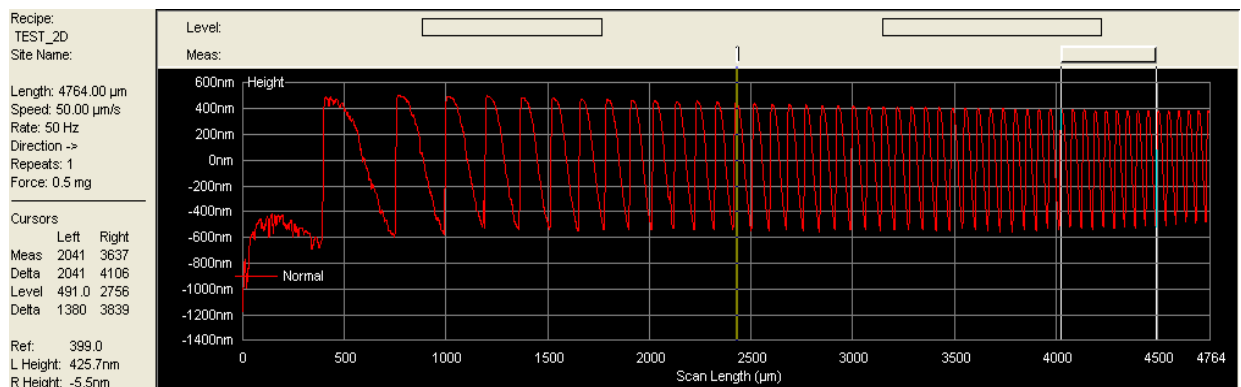
4.3 Экспериментальное исследование рефракционно-дифракционной изображающей системы

Для эксперимента по формированию изображений был изготовлен экспериментальный образец изображающей системы с рефракционной и дифракционной линзами. Исходной была взята выпукло–плоская линза с фокусным расстоянием 75мм из стекла марки ВК7. Дифракционная линзы была изготовлена методом прямой лазерной записи по фоторезисту на станции лазерной записи CLWS-2014. Фокусное расстояние дифракционной линзы составило 626мм , диаметр составил 10мм (как при расчете) Линза рассчитывалась для основной длины волны 550нм . Рассчитанная оптимальная высота микрорельефа для этой длины волны составляет 1020нм . На Рисунке

4.5а представлен внешний вид центральной части получившейся линзы, сечение профиля по радиусу (Рисунок 4.5,б).



(a)



(б)

Рисунок 4.5. – Внешний вид изготовленной отражающей кольцевой гармонической линзы, по краю видна кольцевая зона с микрорельефом (а), внешний вид системы формирования изображений с кольцевой апертурой со стороны второго зеркала (б), сечение профиля микрорельефа (б).

Как видно из Рисунка 4.5,б высота микрорельефа соответствует расчетной высоте (около 1000 нм). Для удобства экспериментирования система двух линз была помещена в пластиковый корпус. Внешний вид получившегося объектива представлена на Рисунке 4.6.

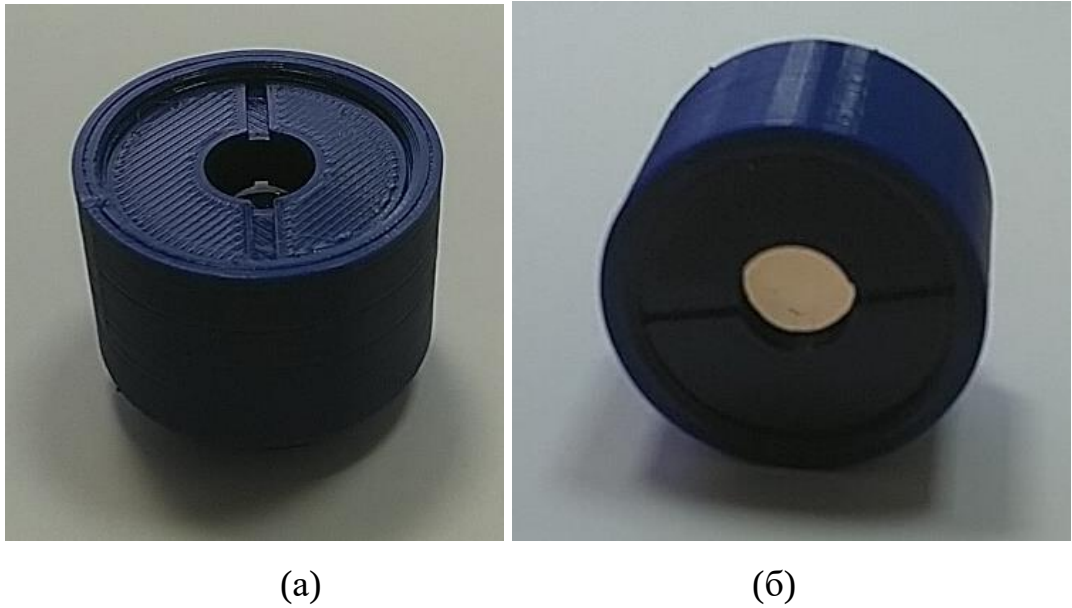


Рисунок 4.6. – Внешний вид рефракционно-дифракционного объектива в пластиковом корпусе: (а) вид сбоку; (б) вид сверху.

Созданный объектив позволяет достигать высокой детализации, однако возможны искажения цветового фона и светлости, а также неизопланатичность искажений. Поэтому на завершающей стадии формирования изображения предусмотрена его коррекция. Большое число методов коррекции изображений путем цифровой постобработки описано в [126, 127]. Обычно задача коррекции изображений решается с использованием КИХ-фильтров, в силу простоты реализации отсутствия проблем с устойчивостью [128, 129]. Наиболее простой способ построения цифрового фильтра – настройка его параметров по эталонам (non-blinddeblurring) [130]. Однако получение эталонного изображения в данном случае невозможно. Для преодоления этой проблемы мы применяем слепое восстановление (blinddeblurring) [131]. В рамках этого подхода одним из популярных методов оценки параметров алгоритма обработки является глубокое обучение [132]. В работе [133] предложен итерационный метод слепой идентификации параметризованного фильтра с использованием оценки степени изменения контраста восстановленного изображения по изменению текущей дисперсии изображения. При этом для улучшения качества изображения использовался

алгоритм линейной фильтрации, который ранее применялся авторами в рамках двухэтапной технологии обработки изображений, регистрируемых мобильными приборами [134].

В настоящей работе для коррекции изображений, формируемых рефракционно-дифракционным объективом строится алгоритм, состоящий из следующих этапов:

- цветовая коррекция;
- контрастирование;
- Выравнивание пространственных частот с помощью линейного фильтра;
- при необходимости на этапе предварительной обработки выполняются операции обрезки и масштабирования.

Цветовая коррекция сводится к простому изменению относительного веса цветовых компонентов. Как правило, веса подбираются с учетом субъективных предпочтений пользователя. Однако нетрудно организовать также автоматический подбор весовых коэффициентов, если имеются эталонные изображения или заданы эталонные значения вкладов цветовых компонент.

В Диссертации контрастирование выполнялось с использованием функции «*imadjust*» (контрастирование с гамма-коррекцией) программы MATLAB. Выбор параметров функции обычно определяется пользователем с учетом субъективных предпочтений контраста и светлости изображения. В рамках настоящей работы масштабирование изображений не выполнялось, т.к. эта операция связана с интерполяцией отсчетов, что делает некорректным сравнение результатов формирования изображений.

Алгоритм цифровой фильтрация изображения осуществляется с целью устранения неравномерности пространственных частот, возникающей вследствие неравномерности ширины внеосевой функции рассеяния точки. Применяется алгоритм линейной фильтрации, основанный на идее повышения

вклада средних пространственных частот. Нужный эффект достигается за счет того, что более заметное увеличение вклада средних частот происходит на участках с увеличенным размытием. Эта идея впервые реализована в работе [135]. В настоящей работе используется наиболее простой в вычислительном отношении вариант желаемого частотного отклика в виде отрезков параболы и экспоненты:

$$S(\omega) = \begin{cases} \omega^2, & 0 \leq \omega < \omega_1, \\ e^{-i\omega}, & \omega \geq \omega_1, \end{cases} \quad (4.9)$$

$$S(\omega_1) = \alpha \omega_1^2 = e^{-c\omega_1}, \quad 0 \leq \omega < \infty \quad (4.10)$$

В рассматриваемой схеме регистрации изображения искажения обладают радиальной симметрией. В силу этого двумерный импульсный отклик аппроксимируется одномерным обратным преобразованием Фурье модели (4.9), (4.10) и является функцией одного параметра r :

$$h(r) = \frac{e^{-c\omega_1}}{\pi} \left\{ \frac{\sin(\omega_1 r)}{r} + \frac{2\cos(\omega_1 r)}{\omega_1 r^2} - \frac{2\sin(\omega_1 r)}{\omega_1^2 r^3} + \frac{\sin(\omega_1 r) - \sin(\omega_1 r)}{r} + \frac{c\cos(\omega_1 r) - r\sin(\omega_1 r)}{c^2 + r^2} \right\} \quad (4.11)$$

$$h(0) = \lim_{r \rightarrow 0} h(r) = \frac{\omega_1 c + 3}{3c\pi} e^{-c\omega_1} \quad (4.12)$$

Полагая, что центральный отсчет $k_1 = k_2 = 0$ опорного окна D размером $N \times N$ находится в точке (n_1, n_2) изображения, отсчеты $y(n_1, n_2)$ выходного изображения можно представить в виде:

$$y(n_1, n_2) = \sum_{k_1 = -\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{k_2 = -\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} h[r(k_1, k_2)] x(n_1 - k_1, n_2 - k_2), \quad (4.13)$$

где $r(k_1, k_2) = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$, а $h[r(k_1, k_2)]$ – отсчеты импульсной характеристики (4.11), (4.12) при значениях параметра $r = r(k_1, k_2)$: $\sum h(k_1, k_2) = 1, \forall k_1, k_2 \in D$.

Параметр c характеризует степень подавления нормальных шумов. Для каждой оптической схемы формирования изображения он может задаваться фиксированным с учетом требований к допустимому уровню шумов. Таким образом, настройка фильтра сводится к определению одного параметра ω_1 . Поскольку эталонное изображение с совпадающими координатами пикселей отсутствует в данной технологии реализована слепая коррекция (blinddeblurring). Настройка фильтра осуществляется итерационно. Для получаемой на каждом (k -м) шаге оценки $\hat{\omega}_k$ параметра ω осуществляется обработка искаженного изображения, вычисляются СКО (standard deviation) - $SD(\hat{\omega}_k)$, показатель качества $PSNR(\hat{\omega}_k)$ (peak signal-to-noise ratio), и проверяются условия:

$$PSNR(\hat{\omega}_k) < PSNR(\hat{\omega}_{k-m}), \quad (4.14)$$

$$SD(\hat{\omega}_k) > SD(\hat{\omega}_{k-m}) \quad (4.15)$$

Если на данном шаге эти условия выполняются, оценка $\hat{\omega}_k$ принимается, иначе остается оценка, полученная на одном из предшествующих шагов. Процесс останавливается, если

$$PSNR(\hat{\omega}_k) > PSNR_{don}, \quad (4.16)$$

где $PSNR_{don}$ – допустимое значение $PSNR$. Заметим, что поощрение шагов, направленных на увеличение показателя $SD(\hat{\omega}_k)$ в соответствии с условием (4.15), может приводить к появлению шумов на фоновых участках изображений. Выбором допустимого значения $PSNR_{don}$ обеспечивается необходимый компромисс. Размеры $N \times N$ опорного окна для каждого класса оптических изображений задаются фиксированными. Для повышения резкости применяется также схема обработки в виде нескольких «проходов» с уменьшающимися размерами опорного окна.

4.4 Экспериментальное исследование рефракционно-дифракционных изображающих оптических систем

Для проведения эксперимента в лабораторных условиях необходим был объектив с существенно более коротким фокусным расстоянием, чем рассчитанный выше. Поэтому была рассчитана система из рефракционной линзы с фокусным расстоянием 30 мм и согласованной с ней дифракционной линзой. Затем была собрана оптическая схема, представленная на Рисунке 4.7. Проверка работы гибридного объектива предполагалась в широкоугольном режиме, поэтому Мира шириной 300 мм располагалась на расстоянии всего 800 мм от объектива (поле зрения около 20°). На Рисунок 4.8 представлено изображение одной из Мир, использованных в экспериментах. Использовано три полосатых Миров с разными положениями относительно оптической оси системы.

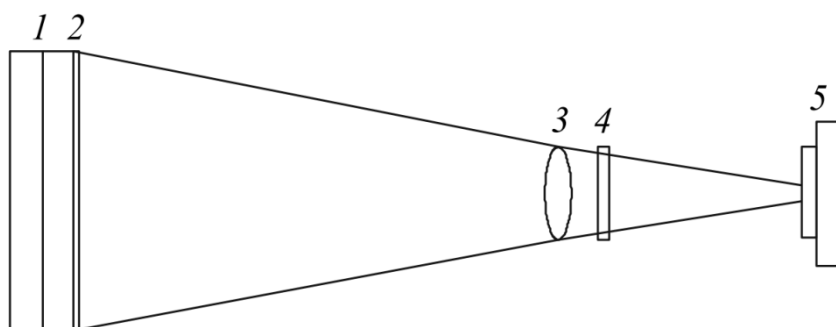


Рисунок 4.7 – Схема оптической установки: 1 — светодиодная панель с равномерной яркостью, 2 — пленка со светотехнической мирой, 3 — рефракционная линза $f = 30 \text{ mm}$, 4 — дифракционная линза $f = 1190 \text{ mm}$, 5 — светочувствительная матрица.

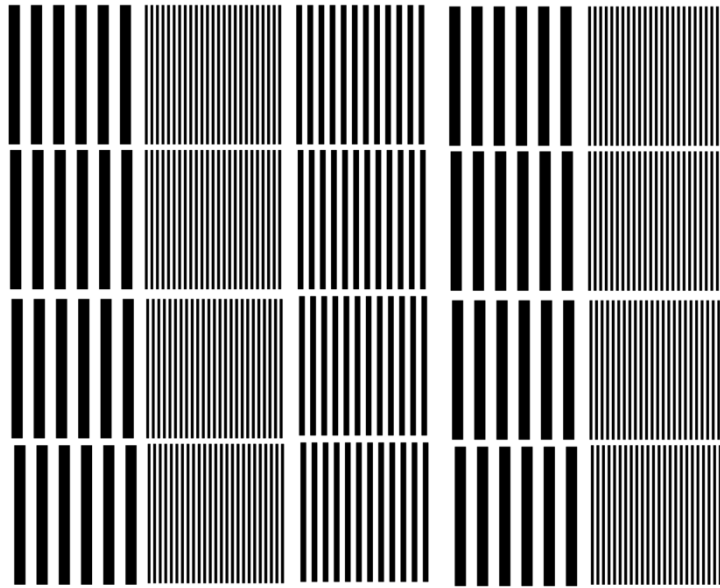


Рисунок 4.8 – Мира для эксперимента с гибридным объективом.

Для эксперимента разработано специальное программное обеспечение, которое на основе полученных изображений мир рассчитывало контраст изображения полос разной частоты.

На Рисунке 4.8 представлено изображение участка мира и его сечение в программном обеспечении, по которому и вычислялся контраст в зависимости от частоты линий (частотно-контрастная характеристика, ЧКХ). Контраст вычислялся по формуле:

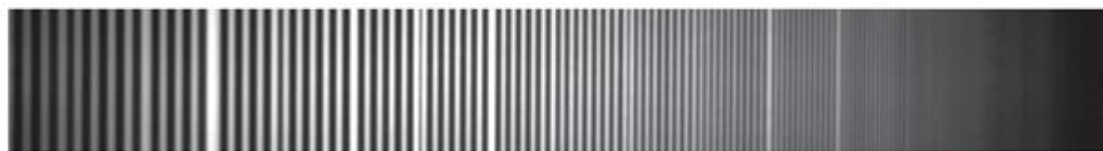
$$K_i = \frac{I_{i\max} - I_{i\min}}{I_{i\max} + I_{i\min}} \quad (4.17)$$

где $I_{i\max}$ – максимальное значение интенсивности в сечении с номером i и $I_{i\min}$ – минимальное значение интенсивности в сечении с номером i . Количество таких сечений соответствует количеству пикселей в измеряемой картинке. В качестве результата измерения выступало среднее значение контраста по всем сечениям.

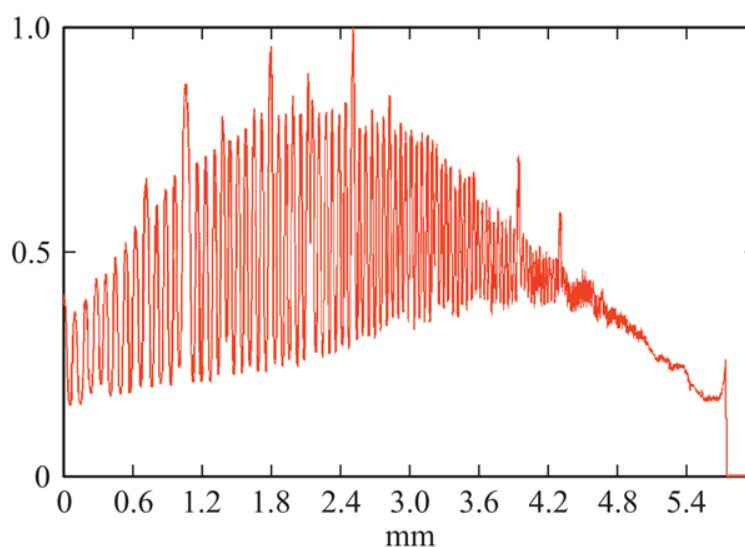
Из Рисунка 4.8 видно, что гибридная система наиболее хорошо работает в области вблизи оптической оси (более низкочастотные линии слева имеют меньший контраст, чем более высокочастотные в центре). На основе серии

экспериментов с разными мирами были получены ЧКХ для гибридной системы и для одиночной рефракционной линзы. На Рисунке 4.9 приведены экспериментальные ЧКХ для гибридной системы, частоты даны на растр светочувствительной матрицы (ширина 10 mm, размер пикселя 4.75 μm).

Среднее значение контраста по серии экспериментов составило 0.17. Для одиночной рефракционной линзы среднее значение контраста 0.14. При сужении поля зрения с 20° до 10° средние значения контраста составили 0.22 и 0.16 соответственно. Таким образом, при сужении поля зрения преимущество такой гибридной системы перед одиночной рефракционной линзой возрастает. Набор линий на Рисунке 4.10 на частоте около 90 образовался из-за неточного экспериментального определения частоты в изображении (± 1 -2 пиксела).



(a)



(б)

Рисунок 4.9 – Изображение участка мира: (а) и сечение (зависимость интенсивности от пространственной координаты от 0 до 0.95 mm) этого изображения (б)

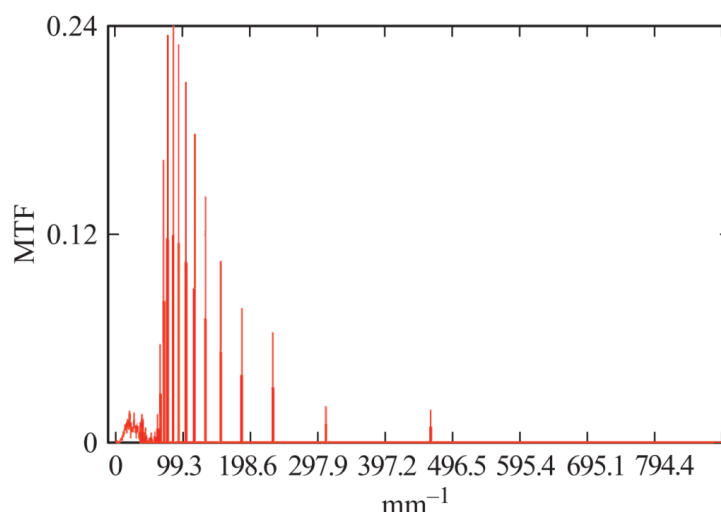


Рисунок 4.10 – Экспериментальная ЧКХ для гибридной системы (частоты даны в расчете на размер раstra светочувствительной матрицы).

Гибридная система в виде рефракционно-дифракционного дублета способна формировать ФРТ, сопоставимую по ширине дифракционному пределу в достаточно широком спектральном диапазоне, что подтверждается данными моделирования. Проведенный эксперимент доказывает существенное улучшение ЧКХ разработанной системы по сравнению с ЧКХ одиночной рефракционной линзы с тем же фокусным расстоянием, что позволяет подтвердить данные моделирования. Дальнейшее повышение качества изображения в такой оптической системе является чисто технической задачей по повышению точности формирования микрорельефа дифракционной линзы. максимум ЧКХ наблюдается в районе средних частот (90 мм^{-1})

Для проведения эксперимента в полевых условиях был изготовлен объектив с параметрами, указанными в разделе 4.1 с фокусным расстоянием около 75 мм. В качестве регистрирующего устройства был использован фотоаппарат Canon 1100D. Для исключения влияния расстояния на формирование изображения была проведена съемка здания, отстоящего от объектива на 60 м.

На Рисунках 4.11а,б приведены изображения одного объекта, полученные рефракционной линзой и рефракционно-дифракционного объектива.



(а)



(б)

Рисунок 4.11 – Изображения: (а) – рефракционное; (б) – рефракционно-дифракционное после обработки

На Рисунке 4.12, а представлена верхняя левая четверть кадра изображения, показанного на Рисунке 4.12, а, снятого через рефракционную линзу с фокусным расстоянием 75мм. На Рисунке 4.12б - та же верхняя левая четверть кадра изображения снятого через систему рефракционной и дифракционной линз. Фокусное расстояние системы немного короче (69мм), поэтому изображения искусственно приведены к одному масштабу.

Можно видеть, что цветопередача на фрагменте рефракционно-дифракционного изображения существенно отличается. Вместе с тем, из сопоставления Рисунков 4.12а и 4.12б хорошо видно, что дифракционная линза корректор выравнивает aberrации ближе к краю кадра (нижний правый угол – центр изначального изображения). Изображения мелких деталей, размытые на Рисунке 4.12а, становятся различимыми на Рисунке 4.12б. Общее же снижение контрастности и нарушенная цветопередача на Рисунке 4.12,б в значительной степени устраняется дополнительной цифровой обработкой.



(а)



(б)

Рисунок 4.12– Верхняя левая четверть кадра изображения (Рисунок 8, а) снятого через рефракционную линзу с фокусным расстоянием 75мм (а), верхняя левая четверть кадра изображения снятого через систему рефракционной и дифракционной линз (б).

4.5. Выводы к главе 4

1. Расчет параметров дифракционно-рефракционного объектива, состоящего из плоско-выпуклой собирающей линзы, дающего основную оптическую силу и дифракционной собирающей линзы, уменьшающей хроматизм, по формулам параксиальной оптики дает неоптимальный результат, заключающийся в неполной компенсации хроматизма на длинноволновой границе спектрального интервала.

2. Моделирование и оптимизация параметров рефракционно-дифракционного объектива по критерию ширины ФРТ позволяет получить полную компенсацию хроматических aberrаций по обеим границам заданного спектрального диапазона от 400 до 700 нм. Рассчитанный таким образом объектив дает максимальный уровень контраста на средних пространственных частотах (90 мм^{-1}), который несколько снижается и к низким и к высоким частотам.

3. Эксперимент с изготовленным на основе проведенного расчета объективом, показал, что этот объектив помимо уменьшенной хроматической aberrации имеет существенно меньший уровень внеосевых геометрических aberrаций.

Заключение

В диссертации предложены, теоретически и экспериментально обоснованы изображающий гиперспектрометр наземного базирования и методики его применения для бесконтактного контроля содержания влажности, углерода и кальция в почвах сельскохозяйственного назначения.

Основными результатами работы являются:

1. Определены особенности наземного использования ГСА связанные с существенным расширением поле зрения по сравнению с ГСА космического или авиационного базирования ($10-20^\circ$ по сравнению с $1-5^\circ$). Это приводит к 2-3 кратному снижению спектрального разрешения вследствие увеличения внеосевых абберационных искажений в оптической системе, однако этого 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 aberrацию по границам заданного спектрального диапазона от 400 до 700 нм и снижает в 2-3 раза уровень внеосевых aberrаций по сравнению с aberrациями, 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 900 нм и 970 нм, 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 1240 нм, 1630 нм, 2130 нм.

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 1120000 гиперпикселей, элементный состав которого валидирован методом энергодисперсионного микроанализа.

Созданная упрощенная маломассогабаритная ГСА наземного применения и методики контроля состояния почв и растений с рефракционно-дифракционным объективом позволяет существенно оперативнее получать информацию о влагосодержании в почвах, оценивать типы почв, состояние растений, что пригодно для применения в сельском хозяйстве и позволяет развивать технологии точного земледелия, экологического мониторинга и распознавания различных объектов.

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». Результаты получили внедрения в научно-исследовательской деятельности в СамГАУ, РОСНИИ ПМ, ООО «Локус», ООО «Медэкс». 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.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

БИК- ближний инфракрасный диапазон

БВС – беспилотное воздушное средство

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

КА – космический аппарат

КИК – коротковолновый инфракрасный диапазон

ГСА – гиперспектральная аппаратура

ГСИ – гиперспектральные изображения

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ДОЭ – дифракционный оптический элемент

ПЗС – прибор с зарядовой связью

РСА – Радиолокатор (радар) с Синтезированной Апертурой

СДЛ – спектральная дифракционная линза

ТВМ – термостатно-весовой метод

ФПМ – функция передачи модуляции

ФРТ – функция рассеяния точки

ЧКХ – частотно-контрастная характеристика

FWHM (Full Width at Half Maximum) — полная ширина на половине максимума

LWIR – Дальний инфракрасный диапазон света

MWIR – Средний инфракрасный диапазон света

NIR – Ближний инфракрасный диапазон света

PSNR – соотношение сигнал/шум

SWIR – коротковолновый инфракрасный диапазон света

VIS – видимый диапазон света (доступный видению человека)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arcybashev, E.S. The Reflectance of Tree Species [orig. russ.], / E. S. Arcybashev, S. V. Belov // Russian Data on Spectral Reflectance of Vegetation, Soil, and Rock Types. – 1958. – P. 232.
2. Lyon, J.P. Evaluation of infrared spectroscopy for compositional analysis of lunar and planetary oils / J.P. Lyon // Stanford. Res. Inst. Final Rep. Contract NASA. – 1962. – Vol. 49(04).
3. Орлов, Д. С. Использование спектральных химических характеристик почв и растительности в целях почвенно-экологического мониторинга. / Д. С. Орлов, Н. И. Суханова // Сб. Почвенноэкологический мониторинг и охрана почв (под ред. Орлова ДС, Васильевской ВД), М., МГУ, 1994. – С. 127-147.
4. Goetz, F.H. Mineral Identification From Orbit - Initial Results From The Shuttle Multispectral Infrared Radiometer / F. H. Goetz, L. C. Rowan, and M. J. Kingston // Science. – 1982. – Vol. 218. – p. 1020-1024.
5. Collins, W. Mineralogical Mapping of Sites Near Death Valley, California and Crossman Peak, Arizona, using Airborne Near-Infrared Spectral Measurements / W. Collins, S. H. Chang, and G. L. Raines // Proc. Intl. Symp. on Remote Sens. of Environ., 2nd Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Fort Worth, TX. – 1982.
6. Vane, G. Introduction Airborne Imaging Spectrometer (AIS-1, AIS-2) / G. Vane // Proc. Second Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, Pasadena, CA. – 1986.
7. Goetz, F.H. Imaging spectrometry for earth remote sensing / A. F. H. Goetz, G. Vane, J. E. Solomon, and B. N. Rock // Science. – 1985. – Vol. 228. – P. 1147.
8. Gower, F.R. Fluorescence Line Imager: First Results from Passive Imaging of Chlorophyll Fluorescence / F. R. Gower, G. A. Borstad, and H. R. Edel // presented at International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Michigan. – 1987.

9. Kruse, F.A. Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63-channel imaging spectrometer / F. A. Kruse, K. S. Kierein-Young, and J. W. Boardman // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 1990. – Vol. 56. – P. 83.
10. Rowlands, N. Short-wave infrared (SWIR) imaging spectrometer for remote sensing / N. Rowlands, R. A. Neville, and I. P. Powell // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 1994. – Vol. 2269. – P. 237.
11. Green, R.O. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) / R. O. Green, M. L. Eastwood, C. M. Sarture, T. G. Chrien, M. Aronsson, B. J. Chippendale, J. A. Faust, B. E. Pavri, C. J. Chovit, M. Solis, M. R. Olah, and O. Williams // Remote Sensing of Environment. – 1998. – Vol. 65. – P. 227.
12. 11. Robles-Kelly, A. Imaging spectroscopy for scene analysis: Challenges and opportunities / A. Robles-Kelly, B. Simpson-Young // IET Computer Vision. – 2013. – Vol. 7(6). – P. 467-477.
13. Boissard, P., Martin, V., Moisan, S. (2008). A cognitive vision approach to early pest detection in greenhouse crops. computers and electronics in agriculture, 62(2), 81-93.
14. Cai, F. Pencil-like imaging spectrometer for biosamples sensing / F. Cai, D. Wang, M. Zhu, S. He // Biomedical optics express. – 2017. – Vol. 8(12). – P. 5427-5436.
15. Zhang, H. Development of a Portable Field Imaging Spectrometer: Application for the Identification of Sun-Dried and Sulfur-Fumigated Chinese Herbals / H. Zhang, T. Wu, L. Zhang, P. Zhang // Applied Spectroscopy. – 2017. – Vol. 70(5). – P. 879-887.
16. Wu, T. Shortwave Infrared Imaging Spectroscopy for Analysis of Ancient Paintings / T. Wu, G. Li, Z. Yang, H. Zhang, Y. Lei, N. Wang, L. Zhang // Applied Spectroscopy. – 2016. – Vol 71(5). – P. 977-987.

17. Еремеев, В. А., Мордвинцев, И. Н., & Платонов, Н. Г. (2003). Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных. Исследование Земли из космоса, (6), 80-91.

18. Mouroulis, P. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy / P. Mouroulis, R.G. Sellar, D.W. Wilson // Optical Engineering. – 2007. – V. 46, №6. – P. 063001-1-9.

19. Reininger, F. M. Imaging spectrometer/camera having convex grating // Patent US №. 6100974. 8.08.2000

20. De Clercq, C., Moreau, V., Jamoye, J. F., Marchi, A. Z., & Gloesener, P. (2015, September). ELOIS: an innovative spectrometer design using a free-form grating. In Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI (Vol. 9626, pp. 407-415). SPIE.

21. Патент на полезную модель 155382 Российская Федерация. Узкоугольный авиационный гиперспектрометр с узлом сканирования./ Родионов, И. Д., Виноградов, А. Н., Калинин, А. П., Родионов, А. И., Родионова, И. П. заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество "Научно-производственный центр "Реагент" № 2015114647/28; заявл. 20.04.2015. опубл. 10.10.2015 (2015).

22. Виноградов, А. Н., Егоров, В. В., Калинин, А. П., Мельникова, Е. М., Родионов, А. И., Родионов, И. Д., & Сысоева, Е. Я. (2013). Многокурсовый гиперспектрометр для аэрокосмического дистанционного зондирования Земли. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 10(2), 316-326.

23. Achata, E. A Study on the Application of Near Infrared Hyperspectral Chemical Imaging for Monitoring Moisture Content and Water Activity in Low Moisture Systems / E. Achata, C. Esquerre, C. O'Donnell, A. Gowen // Molecules. – 2015. – T. 20. – P. 2611-2621.

24. Донец, В.В. Создание полевого спектрального аппаратурно-программного комплекса для подспутниковой валидации дистанционного исследования растительности / В.В. Донец, С.М. Кочубей, В.А. Яценко, Т.А. Казанцев, В.В. Бровченко // Системи обробки інформації. – 2013. – Т. 8, № 115. – С. 36-42.
25. Черепанов, А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – №3. – С. 28-32.
26. Антонов, В.Н. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ / В.Н. Антонов, Л.А. Сладких // Геоматика. – 2009. – № 4. – С. 50-53.
27. Майорова, В. И. Контроль состояния сельскохозяйственных полей на основе прогнозирования динамики индекса NDVI по данным космической мультиспектральной и гиперспектральной съёмки / В. И. Майорова, А. М. Банников, Д. А. Гришко, И.С. Жаренов, В. В. Леонов, А. Г. Топорков, А.А. Харлан // Наука и образование. – 2013. – № 7. – С. 199-228.
28. Genc, H. Vegetation indices as indicators of damage by the sunnpest (Hemiptera: Scutelleridae) to field grown wheat / H. Genc, L. Genc, H. Turhan. // African Journal of Biotechnology. – 2008.– Vol. 7 (2).– P. 173-180.
29. Пушкин, А.А. Использование материалов космической съёмки для оценки пожарной опасности в лесах / А.А. Пушкин, Н.Я. Сидельник, С.В. Ковалевский // Труды БГТУ. – 2015. – № 1 (174). – С. 36–40.
30. Пушкин, А. А. Спектральные индексы для оценки пожарной опасности лесов по материалам космической съёмки с использованием ГИС-технологий в условиях рационального природопользования / А.А. Пушкин, Н.Я. Сидельник, С.В. Ковалевский, М.А. Ильючик, П.Г. Мельник // Биоэкономика и экобиополитика. — 2016. — №1. — С. 163-170.

31. Митрофанов, Е.В. О применении узкоспектральных вегетационных индексов для оценки состояния лесной растительности / Митрофанов Е.В. Шашнев И.В. Бубненко Д.И. // Вестник МГОУ. – 2012. – № 4. – С. 118-122.

32. Виноградов, А.Н. Бортовой гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением / А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, А.И. Родионов, И.Д. Родионов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. - № 3. – С. 101-107.

33. Виноградов, А.Н. Разработка и исследование гиперспектрометра ближнего инфракрасного диапазона БИК1 / А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, А.И. Родионов, А.И. Родионов, И.П. Родионова – М: ИКИ РАН, 2017. - 20 с.

34. Jinru X, Su B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. Journal of Sensors; 2017; 1; 1–17. DOI: 10.1155/2017/1353691.

35. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений : учеб. пособие / Шовенгердт Р.А. – Москва : Техносфера, 2013. - 592 с.

36. Чандра, А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. Пер. с англ. А.В. Кирюшина. – Москва : Техносфера, 2008. - 312 с

37. Townshend, J. R. G. Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales / J. R. G. Townshend, T. E. Goff, C. J. Tucker, //IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing. – 1985. – №. 6. – С. 888-895.

38*. Ivliev, N.A/ A compact imaging hyperspectrometer. / N.A/ Ivliev, **V.V. Podlipnov**, R.V. Skidanov // J Phys Conf Ser 2019; 1368(2): 022053. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022053.

39*. Kazanskiy, N. An airborne offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements. / N. Kazanskiy, , N. Ivliev, R. Skidanov, **V. Podlipnov** // Sensors. 2020. T. 20. № 12. С. 1-10.

40. Montero-Orille, C/ Design of Dyson imaging spectrometers based on the Rowland circle concept. / C/ Montero-Orille, X. Prieto-Blanco, H. Gonzalez-Nunez, R. de la Fuente // Applied Optics, 2011; 50(35): 6487-6494.

41. Gat, N. Imaging Spectroscopy Using Tunable Filters: A Review. / N. Gat // Proceeding of SPIE, 2000; 4056: 50-64.

42. Kerekes, J. Imaging spectrometers go commercial. / J. Kerekes, // Laser Focus World, 2006; 42: 63–68.

43. Xue, Q. Modified Dyson imaging spectrometer with an aspheric grating surface. / Q. Xue // Optics Communications, 2013; 308: 260-264.

44. Болсуновский, М. А. Современные подходы к организации оперативного космического мониторинга / М. А. Болсуновский, //Геоматика. – 2010. – №. 3. – С. 13-18.

45. Mohammadi M. Road classification and condition determination using hyperspectral imagery //The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2012. – Т. 39. – С. 141-146

46. Brando, V. E. The potential of autonomous ship-borne hyperspectral radiometers for the validation of ocean color radiometry data / V. E. Brando, J. L. Lovell, E. A. King, D. Boadle, R. Scott, T Schroeder //Remote Sensing. – 2016. – Т. 8. – №. 2. – С. 150.

47. Foglini, F., Application of hyperspectral imaging to underwater habitat mapping,/ F. Foglini, V. Grande, F. Marchese, V. A. Bracchi, M. Prampolini, L. Angeletti,... M. Taviani, // Southern Adriatic Sea //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 10. – С. 2261.

48.* 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.

49. СОЙФЕР В. А. СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ВИДИМОМ, ИНФРАКРАСНОМ И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОМ РЕЖИМАХ СЪЕМКИ //Информационные процессы. – 2020. – Т. 20. – №. 1. – С. 41-54.

50. Кулинцев В. В., Кравцов В. В., Чумакова В. В. Сорта и гибриды сельскохозяйственных культур селекции ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ». Каталог. Ставрополь: Агрус, 2018. 176 с

51. <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/360011389334-RedEdge-MX-Integration-Guide>

52. <https://www.parrot.com/en/support/documentation/sequoia>

53. Шинкаренко, С. С. Анализ влияния видового состава, проективного покрытия и фитомассы растительности аридных пастбищных ландшафтов на их спектрально-отражательные свойства по данным наземных измерений . С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – №. 3. – С. 176-192.

54. Беляев М. Ю. Кросс-калибровка данных" Фотоспектральной системы" с борта МКС в космическом эксперименте" Ураган". / М.Ю. Беляев, Б.И. Беляев, Л.В. Катковский, А.А. Ломако, А.О. Мартинов, В.В. Рязанцев, Э.Э. Сармин, О.О. Силук // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 45–55.

55. Саворский В. П.. Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства «Созвездие-Вега» / В. П. Саворский, В. Кашницкий, А. М. Константинова, И. В. Балашов, Ю. С. Крашенинникова, В. А. Толпин, Е. В. Савченко, //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – №. 3. – С. 28-45.

56. Катаев, М. Ю. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям / М. Ю. Катаев, А. А. Бекеров // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20. – №. 4. – С. 105-108.

57. Козодеров, В. В. Аэрокосмическое зондирование почвенно-растительного покрова: модели, алгоритмическое и программное обеспечение, наземная валидация / В. В. Козодеров, Е. В. Дмитриев. // Исследование Земли из космоса. – 2010. – №. 1. – С. 69-86.

58. Смагин А. В. Новые инструментальные методы и портативные электронные средства контроля экологического состояния почв и сопредельных сред / Смагин, А. В., Садовникова, Н. Б., Глаголев, М. В., & Кириченко, А. В. // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2006. – Т. 2. – №. 1. – С. 5-16.

59. РФ. Росстандарт. ГОСТ 28268-89 «Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений»: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27.09.89 № 2924 № М., 1971. 6с.

60. Верба В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов., В. Э. Турук // М.: Радиотехника, 2010, 655 с.

61. Балдина Е. А. Радиолокационное зондирование для решения задач сельского хозяйства / Балдина, Е. А., Денисов, П. В., Мартьянов, А. С., & Трошко, К. А. // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. – 2016. – С. 162-172.

62. Бирюк, А. А. Радиолокационная система для мониторинга состояния почвы и вегетации / А. А. Бирюк, К. С. Лялин // Микроэлектроника и информатика - 2018 : Материалы научно-технической конференции. Сборник статей, Москва, 18–19 апреля 2018 года. – Москва: Национальный

исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 2018. – С. 26-33. – EDN XZRCOT.

63. Горячкин О. В. Пути развития радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли. / Горячкин О. В. //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета). – 2010. – №. 2. – С. 92-104.

64. Wang J. R. Effect of vegetation on soil moisture sensing observed from orbiting microwave radiometers. Rev. Sens. Environ., 17, 1981. P. 141–151.

65. Чухланцев А.А. Особенности определения влажности почвы СВЧ-радиометрическим методом в лесных районах / А.А. Чухланцев, А.М. Шутко // Исследование Земли из космоса.-2012. – №2. – С. 3-10.

66. Чухланцев, А. А. Возможности совместной обработки СВЧ радиометрических и оптических данных при глобальном картировании влажности почв / А. А. Чухланцев, В. Ф. Крапивин // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2018. – № 12. – С. 41-49.

67. Шаронов, В. В. Отражательная способность некоторых природных образований / В. В. Шаронов //Сборник статей по аэрофотометрии. – 1934. – №. 2.

68. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. – М. – Л., 1947. – 270 с.

69. Бекбаева А. М. Классификация содержания фосфора методами машинного обучения по данным дистанционного зондирования Земли / А. М. Бекбаева, Ш. К.Мажренова, Ф. К. Ермаков, И. Т. Токбергенов, А. К. Куришбаев //The Scientific Heritage. – 2020. – №. 56-3. – С. 29-36.

70. Lingli, W. Remote sensing techniques for soil moisture and agricultural drought monitoring / W. Lingli. – USA : George Mason University, 2000. – 164 p.

71. Achata, E. A Study on the Application of Near Infrared Hyperspectral Chemical Imaging for Monitoring Moisture Content and Water Activity in Low

Moisture Systems / E. Achata, C. Esquerre, C. O'Donnell, A. Gowen // *Molecules*. – 2015. – Т. 20. – Р. 2611-2621.

72. Карпеев, С.В. Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217.

73. Карпеев, С.В. Юстировка и исследование макетного образца гиперспектрометра по схеме Оффнера / Карпеев С.В., Хонина С.Н., Мурдагулов А. Р., Петров М. В. // *Вестник СГАУ*. – 2016. - Т. 15, №1. – С. 197-206.

74. Балакай, Г. Т. Концепция дождевальнoй машины нового поколения для технологии прецизионного орошения / Г.Т. Балакай, С.М. Васильев, А.Н. Бабичев // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. – 2017. – № 2(26). – С. 1–18. – URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=476&id=477> (дата обращения 05.03.2018).

75. Бабичев, А. Н. Оперативное управление режимом орошения при программировании урожайности сельскохозяйственных культур / А. Н. Бабичев, Г. Т. Балакай, В. А. Монастырский // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. – 2017. – № 3(27). – С. 83–96. – URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=491&id=498> (дата обращения 05.03.2018).

76. Балакай, Г. Т. Методика расчета и корректировки сроков полива сельскохозяйственных культур / Г. Т. Балакай, Н. И. Балакай // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. – 2017. – № 1(25). – С. 32–49. – URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=458&id=461> (дата обращения 05.03.2018).

77. Щедрин, В. Н. О направлениях развития мелиорации и ее роли в обеспечении продовольственной безопасности России / В. Н. Щедрин, Г. А. Сенчуков, В. Д. Гостищев // *Научный журнал Российского НИИ проблем*

мелиорации [Электронный ресурс]. – 2013. – № 4(12). – С. 1–14. – URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=205&id=206> (дата обращения 06.03.2018).

78. Кравцов Л. С. Оценка влажности земной поверхности с использованием изображений дистанционного зондирования Земли / Л. С. Кравцов // Информатика. – 2018. – №. 4 (28). – С. 27-35.

79*. Подлипов, В.В. Экспериментальное определение влажности почвы по гиперспектральным изображениям / В.В. Подлипов, В.Н. Щедрин, А.Н. Бабичев, С.М. Васильев, В.А. Бланк // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 5. С. 877-884.

80. Борзов С. М., Потатуркин О. И. Классификация типов растительного покрова по гиперспектральным данным дистанционного зондирования земли / С. М. Борзов, О. И. Потатуркин // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2014. – Т. 12. – №. 4. – С. 13-22.

81. Hui, Li Mapping Urban Bare Land Automatically from Landsat Imagery with a Simple Index. / Li Hui, C. Wang, C. Zhong, A. Su, C. Xiong, J. Wang, J. Liu // Remote Sensing; 2017; 9; 249.

82. Adamu, B. Applying Built-Up and Bare-Soil Indices from Landsat 8 to Cities in Dry Climates./ B. Adamu, Rasul A. // Land; 2018; 7(3).

83. Deng, C, A biophysical composition index for remote sensing of urban environments./ C Deng, C. A. Wu // Remote Sensing of Environment. Remote Sensing of Environment; 2012; 127; 247–259.

84. Zhao, H. Use of normalized difference bareness index in quickly mapping bare areas from TM/ETM+./ H. Zhao, X. Chen // IEEE Xplore; 2005; 3; 1666–1668.

85. Schneider, A. Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on ‘urban ecoregions’./ A. Schneider, M. Friedl, D. Potere // Remote Sensing of Environment; 2010; 114; 1733–1746.

86. Hestir, E, Classification Trees for Aquatic Vegetation Community Prediction From Imaging Spectroscopy./ E. Hestir, S. Ustin, J. Greenberg // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing; 2012; 5; 1572–1584.
87. Hu, X. Estimating impervious surfaces from medium spatial resolution imagery using the self-organizing map and multi-layer perceptron neural networks. / X. Hu, Q. Weng // Remote Sensing of Environment; 2009; 113;2089–2102.
88. Zhang, F, Improving land cover classification in an urbanized coastal area by random forests: The role of variable selection. / F. Zhang, X. Yang // Remote Sensing of Environment; 2020; 251; 112105.
89. Li, W. Mapping Urban Impervious Surfaces by Using Spectral Mixture Analysis and Spectral Indices. / W. Li //Remote Sensing; 2019; 12; 94.
90. Somers, B. Endmember variability in Spectral Mixture Analysis: A review. / B. Somers, G. Asner, L. Tits, P. Coppin //Remote Sensing of Environment; 2011; 115; 1603–1616.
91. Estoque, R. Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices. / R. Estoque, Y. Murayama // Ecological Indicators; 2015; 56.
92. Becker F. Relative sensitivity of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Microwave Polarization Difference Index (MPDI) for vegetation and desertification monitoring. / F. Becker, BJ. Choudhury // Remote Sensing of Environment; 1988; 24. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90031-4.
93. McFeeters, SK. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. / SK. McFeeters // International Journal of Remote Sensing; 1996; 17; 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
94. Xu HQ. Analysis of Impervious Surface and its Impact on Urban Heat Environment using the Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI). /

HQ. Xu // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing; 2010; 76 (5): 557-565.

95. Deng, YB. RND SI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments International. / Y.B. Deng, C.S. Wu, M. Li, R.R. Chen. // Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation; 2015; 39: 40-48.

96. Palacios-Orueta, A. Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains I Spectral analysis./ A. Palacios-Orueta, S.L.Ustin // Remote Sensing of Environment; 1998; 65 (2): 170-183.

97. Rikimaru A, Roy PS, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping. / A. Rikimaru, P.S. Roy, S. Miyatake //Tropical Ecology; 2002; 43: 39-47.

98. Liu Y, NDBSI: A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas. / Y. Liu, Q. Meng, L. Zhang, C. Wu. // Catena; 2022; 214: 106265.

99. Zhu, Y, Soil organic carbon content retrieved by UAV-borne high resolution spectrometer. / Y. Zhu, D. Wang, H. Zhang, P. Shi. // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering; 2021; 37(6): 66-72.

100. Zhou, Q. . Inversion of soil organic matter content in oasis typical of arid area and its influencing factors. / Q. Zhou, J. Ding, M. Tang, B. Yang // Acta Pedologica Sinica; 2018; 55(2): 313-324.

101. Шаяхметов, М. Р Изучение особенностей дешифрирования почвенного покрова степной зоны Западной Сибири на основе материалов дистанционного зондирования Земли/ М. Р. Шаяхметов, О. Д .Шойкин, Е. Ю. Федяева //Омский научный вестник. – 2015. – №. 1 (138). – С. 191-194.

102. Добротворская Н. И., Дубровский А. В., Елизаров Н. В. Сравнительный анализ качества картографирования почвенного покрова наземным методом и с использованием ДЗЗ // Региональные системы комплексного дистанционного зондирования агроландшафтов : Материалы III Всероссийского научно-практического семинара, Красноярск, 25 февраля

2021 года / Под общей редакцией А.А. Шпедта [и др.]. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», 2021. – С. 156.

103*. Фирсов, Н.А. Ансамбли спектрально-пространственных сверточных нейросетевых моделей для задачи классификации типов почв на гиперспектральных изображениях / Н.А. Фирсов, **В.В. Подлипов**, Н.А. Ивлиев, Д.Д. Рыськова, А.В. Пирогов, А.А. Музыка, А.Р. Макаров, В.Е. Лобанов, В.И. Платонов, А.Н. Бабичев, В.А. Монастырский, В.И. Ольгаренко, П.П. Николаев, Р.В. Скиданов, А.В. Никоноров, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 5. – С. 795-805

104. Кулик, Е. Н., ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ ПОЧВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ . Е. Н. Кулик, А. Т. Байшуаков // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. – 2021. – С. 195-198.

105. Сартин, С. А., Перспективы применения узкополосных фильтров для исследования почв по материалам ДЗЗ / С. А. Сартин, А. С. Пономаренко, В. Н. Щукина // Геоматика. – 2013. – №. 4. – С. 54-58.

106. Якушев В. П. Новый метод количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам посевов для точного земледелия / В. П. Якушев, А. Ф.Петрушин, Д. А. Матвеев, С. Ю. Блохина, Е. В. Канаш, В. В. .Якушев, // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2020. – №. 2. – С. 4-10.

107. Lohman, A.W. A New Class of Varifocal Lenses / A.W. Lohman // Applied Optics 1970. – 9(7), с. 1669-1671

108. T. Stone, Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / Stone, T., George, N.// Applied Optics. – 1988. – 27(14), с. 2960-2971

109. Dubik, B. Hybrid lens with corrected sphero-chromatic aberration / B. Dubik, S. Koth, J. Nowak, M. Zajac, //Optics and Laser Technology. – 1995.– 27(5), с. 315-319
110. Meyers, Mark M. Diffractive optics at Eastman Kodak Co. / Mark M. Meyers, // – 1996. – Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2689, с. 228-254
111. Hong, Y.G. Novel optics for high performance digital projection systems and monitors (current & future) / Hong, Y.G., Bowron, J.W. //Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2003. – 5002, с. 111-122
112. Greisukh G.I., DESIGN OF THE DOUBLE-TELECENTRIC HIGH-APERTURE DIFFRACTIVE-REFRACTIVE OBJECTIVES / G.I. Greisukh, Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Applied Optics. 2011. Т. 50. № 19. С. 3254-3258.
113. Грейсукх, Г.И., ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОБОЧНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОРЯДКОВ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ / Г.И. Грейсукх, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, З.А. Сидякина, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38. № 3. С. 418-424.
114. Zhang, S. Design and simulation of a superposition compound eye system based on hybrid diffractive-refractive lenses / S. Zhang, L. Zhou, C. Xue, L. Wang //Applied Optics. 2017.–56(26), с. 7442-7449.
115. Lenkova, G.A. Diffractive-Refractive Intraocular Lenses with Binary Structures / G.A. Lenkova// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 2018. – 54(5), с. 469-476.
116. Sweeney, D.W. Harmonic diffractive lenses/ D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // Applied Optics. 1995. V.34. №. 14. P.2469-2475.
117. Хонина, С.Н. Анализ фокусировки гармонической дифракционной линзой с учётом дисперсии показателя преломления / С.Н. Хонина, С.Г.

Волотовский, А.В. Устинов, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 338-347. –

118. Yang, J. Chromatic analysis of harmonic Fresnel lenses by FDTD and angular spectrum methods / J. Yang, , P. Twardowski, P. Gérard, W. Yu, J. Fontaine, // Applied Optics. – 2018.– 57(19), с. 5281-5287].

119. Zhang, B. Achromatic annular folded lens with reflective-diffractive optics / B. Zhang, M. Piao, Q. Cui // Optics Express. – 2019.– 27(22), с. 32337-32348.

120. Bregenzer, N., Zoom system by rotation of toroidal lenses / N. Bregenzer, M. Bawart, S. Bernet // Optics Express. – 2020 28(3), с. 3258-3269

121. Mao, S. Design and analysis of a hybrid optical system containing a multilayer diffractive optical element with improved diffraction efficiency / S. Mao, J. Zhao // Applied optics. – 2020. – Т. 59. – №. 20. – С. 5888-5895.

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

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

124. Piao, M. Design of achromatic annular folded lens with multilayer diffractive optics for the visible and near-IR wavebands / M. Piao, B. Zhang, K. Dong // Optics Express. – 2020. – Т. 28. – №. 20. – С. 29076-29085.

125. Choi H. Design of hybrid lens for compact camera module considering diffraction effect / H. Choi, Y.Yoon, B. Kim, S. H. Lee, W. C. Kim, N. Ch. Park, Y. P. Park, S. Kang //Japanese journal of applied physics. – 2008. – Т. 47. – №. 8S1. – С. 6678.

126. William K. Pratt. Digital Image Processing. Wilay and Sun, 1982. Pratt, W.K. Digital image processing / W.K. Pratt. – Moscow: “Mir” Publisher, 1982. – B.2. – 480 p. – (in Russian).
127. Soifer V.A. Computer Image Processing, Part I: Basic concepts and theory / V.A. Soifer, editor. – VDM Verlag Dr. Mullere.K, 2009. – 283 p
128. Moreno, C. Constructing FIR Digital Filters with valarray. // Software/AudioSystems. <https://www.mochima.com/articles/FIR/FIR.html>. 2016.
129. Ye, Wenbin. Greedy algorithm for the design of linear-phase FIR filters with sparse coefficients / Wenbin Ye, Ya Jun Yu. //Circuits, Systems, and Signal Processing. – 2016. – T. 35. – №. 4. – C. 1427-1436.
130. Almeida, M. S. C. Blind and semi-blind deblurring of natural images. / M. S. C. Almeida, L. B. Almeida //IEEE Transactions on image processing – 2009. – T. 19. – №. 1. – C. 36-52.
- 131., Ren, W. Image deblurring via enhanced low-rank prior /Wenqi Ren, Xiaochun Cao, Jinshan Pan, XiaojieGuo, WangmengZuo, Ming-Hsuan Yang //IEEE Transactions on Image Processing. – 2016. – T. 25. – №. 7. – C. 3426-3437.
132. Yan, R. Blind image blur estimation via deep learning /Ruomei Yan, Ling Shao//IEEE Transactions on Image Processing. – 2016. – T. 25. – №. 4. – C. 1910-1921.
133. V.A. Fursov. Identification of square-exponential FIR-filter parameters in the absence of a test image. Procedia Engineering 201 (2017) 206–212.
134. Fursov, V. Two-step technology for improving details of images captured with mobile devices/ V. Fursov, Y. Goshin //Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019). – SPIE, 2020. – T. 11433. – C. 795-802.
135. Фурсов, В.А. Построение КИХ-фильтров в заданном параметрическом классе частотных характеристик для коррекции дефокусировки / В.А. Фурсов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 878-886. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-878-886.

Приложение А. Акт о внедрении результатов диссертации в опытно-конструкторской работе



**МИНИСТЕРСТВО
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ДЕПАРТАМЕНТ МЕЛИОРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Российский научно-
исследовательский институт проблем
мелиорации»

(ФГБНУ «РосНИИПМ»)

пр. Баклановский, д. 190, г. Новочеркасск,
Ростовская область, 346421
телефон/факс 8(8635)26-65-00
email: info@rosniipm.mcx.gov.ru
<http://www.rosniipm.ru>
ОКПО 01031356; ОГРН 1026102230692
ИНН/КПП 6150005087/615001001

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. директора ФГБНУ «РосНИИПМ»

Коробейникова Е. К.

2024 г.



АКТ о внедрении результатов научно-исследовательских работ

Настоящим актом подтверждается, что научно-технические результаты, полученные в рамках выполнения диссертационной работы «Изображающий гиперспектрометр и методы для бесконтактной оценки состояния ряда компонентов природной среды» Подлипнова Владимира Владимировича использовались в 2019 г. в процессе выполнения работ по договору №196 Р-П от 30 октября 2019 г. на «проведение опытно-конструкторской работы и разработки приборного и программного оборудования, сопряженных с системой управления дождевальной машины, позволяющих определить в режиме он-лайн необходимые параметры», а также в 2020 г. в рамках договора №221 Р-П от 26 декабря 2019 г. на «разработку программного обеспечения для прецизионного орошения, сопряженного с системой управления дождевальной машины» для получения гиперспектральных изображений и последующей оценки состояния растительности и почвы для решения одной из важнейшей задачи «умного» сельского хозяйства, а

именно создания отечественных систем управления и программного обеспечения для дифференцированного орошения дождевальными машинами.

Использованная гиперспектральная аппаратура (ГСА), а также полученные пространственно-спектральные данные с применением ГСА позволили реализовать метод косвенного определения влажности почвы на основе вегетационного индекса влагосодержания WBI на основе отношения узкополосных каналов соответствующих длинам волн ближнего инфракрасного диапазона 900 нм и 970 нм. Данный метод показал уверенную качественную дифференциацию участков орошаемого поля с точностью до 90% в сравнении с термостатно-весовым методом. Метод контроля влагосодержания в растениях для автоматической косвенной оценки влажности почвы позволяет дифференцированно дозировать уровень внесения влаги в почвы, что в конечном итоге существенным образом сокращает непроизводительные потери воды при орошении, сокращает смыв плодородного слоя почвы, промывание удобрений и микроэлементов, минимизирует потери урожая сельскохозяйственных культур.

Зам. директора по науке
канд. с.-х. наук



Т. П. Андреева

Приложение Б Акты о внедрении результатов диссертации в научно-исследовательской работе



443051, Самарская область, г. Самара, Кировский район,
ул. Республиканская, дом 65, кв. 38
ИНН 7731315489 КПП 631201001 ОГРН 1167746437990
ОКПО 2337363 ОКВЭД 72.19.2, 72.19.3
Тел./факс: +7 (846) 2702385
artniko@gmail.com

АКТ о внедрении результатов научно-исследовательских работ

Настоящим актом подтверждается, что в 2023-2024 г. в процессе выполнения работ инновационного проекта «Разработка открытой платформы сбора и анализа гиперспектральных изображений для решения прикладных задач цифровой экономики», (Проект № 81633, заявка № КодЦТ-231563 в рамках реализации проекта «Разработка открытой платформы сбора и анализа гиперспектральных изображений для решения прикладных задач цифровой экономики») на основании Протокола заседания дирекции Фонда содействия инновациям № 12 от 11.11.2022 г. использована компактная гиперспектральная аппаратура (ГСА) с угловым полем зрения до 20° для наземной съемки, разработанная в рамках выполнения диссертационной работы Подпиновым Владимиром Владимировичем для получения пространственно-спектральных данных с целью решения прикладных таких задач в различных отраслях цифровой экономике, в частности, умном сельском хозяйстве, экологическом мониторинге, персональной медицине.

Использованная ГСА, а также полученные пространственно-спектральные данные с применением ГСА позволили реализовать метод классификации растительности, основанный на методах машинного обучения сверточной нейронной сети с архитектурой M3D-CNN, позволяющий с высокой долей вероятности определять такие классы объектов как культурные растения, сорные растения и фон. Метод контроля засоренности участков поля, позволяет автоматизировать процесс мониторинга и принятия решений об осуществлении процессов обработки засоренных участков, что позволяет существенным образом сократить материальные и временные издержки, возникающие в процессе мониторинга. Открытая цифровая платформа сбора и анализа гиперспектральных изображений позволяет конечному потребителю также ее расширение и на решение нестандартных прикладных задач, в том числе анализ содержания питательных микроэлементов, влаги, загрязнений и др.

Генеральный директор, д.т.н.



9.07.24 Никоноров А.В.

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор - проректор по научно-исследовательской работе
Самарского Университета

Мишанин А.Л.

07 2024 г.

Самарского Университета

Прокофьев А.Б.

« 08 » 2024 г.

AKT

Мы, нижеподписавшиеся представители ФГБОУ ВО Самарский ГАУ *Машков С.В., Ишкин П.А.* составили настоящий акт в том, что в 2022 г. в процессе проведения НИР «Разработка интеллектуальных методов контроля качества продукции растениеводства на основе данных гиперспектрального дистанционного зондирования» использована гиперспектральная аппаратура (ГСА) для наземной съемки с использованием поворотной платформы на основе оптической схемы Оффнера для получения пространственно-спектральных данных с целью оценки возможностей дистанционного контроля качества плодовоовощной продукции растениеводства, разработанная в рамках выполнения диссертационной работы Подлипновым Владимиром Владимировичем под научным руководством профессора кафедры технической кибернетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва" (Самарский университет) Скиданова Романа Васильевича.

Использованная ГСА, а также полученные пространственно-спектральные данные и метод контроля качества продукции растениеводства на основе данных гиперспектрального дистанционного зондирования позволили определить спектральные сигнатуры клубней картофеля с повреждениями и без них и предложить адаптивный индекс жизнеспособности клубней ANDVI (Adaptive Normalized Difference Viability Index), позволяющий с высокой долей вероятности обнаруживать здоровый и пораженный клубень картофеля. В качестве длин волн для получения индексного изображения на основе ANDVI были выбраны спектры, соответствующие длинам волн 862 нм и 638 нм. Метод контроля, основанный на учете данных на выбранных длинах волн, позволяет автоматизировать и ускорить процесс сортировки и отбраковки клубней картофеля, существенным образом сократить издержки, возникающие в процессе ручной сортировки клубней.

Акт составлен в 3 экземплярах.

Представители
Самарского Университета:

Машков С.В. Машков

Скиданов Р.В.

Ишкин П.А. 

Подлиннов В.В.

Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

/Гаврилов А.В.

« 10 » 10 2024 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов научно-исследовательской работы
(диссертационного исследования) в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме «Изображающий гиперспектрометр для оценки вегетационных индексов и состояния почвы»,

выполненной(ого) на кафедре (в научно-исследовательском подразделении) технической кибернетики,

внедрены (использованы) в учебный(ом) процесс(е) на кафедре (в научно-исследовательском подразделении) институте дополнительного образования Самарского Университета на основании решения кафедры (протокол № 8 от « 4 » июня 2024 г.).

Указанные результаты включены в курс «Системы ДЗЗ в сельском хозяйстве» дополнительной общеобразовательной программы повышения квалификации «Цифровые технологии в сельхозпроизводстве и точном земледелии».

Директор ИИК

_____/Куприянов А.В.
« 6 » 06 2024 г.

Начальник методического отдела
учебно-методического управления
к.т.н., доцент

_____/Вдовин Р.А.
« 7 » 06 2024 г.

Руководитель проекта
(Соискатель ученой степени)

_____/Подлипов В.В.
« 4 » июня 2024 г.

Начальник отдела сопровождения
научных исследований
к.т.н., доцент

_____/Родионов Л.В.
« 7 » 06 2024 г.

Приложение Г. Свидетельства о государственной регистрации
программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024610356

Программный модуль «Гипер»

Правообладатели: *Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (RU), Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») (RU)*

Авторы: *Скиданов Роман Васильевич (RU), Ивлиев Николай Александрович (RU), Подлипов Владимир Владимирович (RU)*

Заявка № **2023688609**
Дата поступления **19 декабря 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **10 января 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023689099

**«Программа определения относительной влажности
почв по гиперспектральным изображениям
сельскохозяйственных культур сверхвысокого
разрешения»**

Правообладатель: *Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр «Информатика и
управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН) (RU)*

Авторы: *Петров Максим Витальевич (RU), Фирсов Никита
Александрович (RU), Макаров Андрей Романович (RU), Ивлиев
Николай Александрович (RU), Подлипов Владимир
Владимирович (RU), Никоноров Артем Владимирович (RU)*



Заявка № 2023688291

Дата поступления 15 декабря 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 декабря 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение Д. Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2825084

**Простейший изображающий гиперспектрометр для
съемки близкорасположенных объектов**

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" (Самарский университет) (RU)*

Авторы: *Скиданов Роман Васильевич (RU), Ивлиев Николай Александрович (RU), Подлипов Владимир Владимирович (RU), Маркушин Максим Анатольевич (RU), Ханенко Юрий Владимирович (RU), Пронин Алексей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023130286

Приоритет изобретения 20 ноября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 19 августа 2024 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 20 ноября 2043 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение Е. Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 229845**Гиперспектральная камера на основе схемы Оффнера
для беспилотных летательных аппаратов**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" (Самарский университет) (RU)*

Авторы: *Никонов Артем Владимирович (RU), Фирсов Никита Александрович (RU), Скиданов Роман Васильевич (RU), Казанский Николай Львович (RU), Ивлиев Николай Александрович (RU), Подлипов Владимир Владимирович (RU), Маркушин Максим Анатольевич (RU), Ханенко Юрий Владимирович (RU)*

Заявка № 2024123613

Приоритет полезной модели 15 августа 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 30 октября 2024 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 15 августа 2034 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов