

На правах рукописи
УДК 681.78

Гурылева Анастасия Валентиновна

**МЕТОД И СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ НА
ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем

Научный руководитель: **Хорохоров Алексей Михайлович,**
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры лазерных и оптико-электронных
систем МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Мачихин Александр Сергеевич,**
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
акустооптической спектроскопии НТЦ УП РАН,
г. Москва
Чертов Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент инженерно-исследовательского
факультета Университета ИТМО, г. Санкт-
Петербург

Ведущая организация: АО «НПК «СПП», г. Москва

Защита состоится 29 сентября 2021 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.07 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана, расположенном по адресу 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___»______ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

М.С. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Диагностика состояния растения на всех этапах его развития используется как для расширения фундаментальных знаний об особенностях физиологии растений, так и в практическом земледелии при формировании оптимальных мер возделывания, обеспечивающих наибольшую урожайность при минимальных затратах. Наиболее востребованы в обоих направлениях методы, позволяющие проводить анализ одновременно бесконтактно, надежно, по широкому спектру параметров и с высокой производительностью. Оптические методы оказываются единственными, способными обеспечить перечисленные характеристики, в связи с чем представляют интерес разработка и совершенствование оптических методов и средств контроля спектральных характеристик сельскохозяйственных растений, служащих для диагностики состояния растений.

Степень разработанности темы исследования. Известен ряд научных трудов, посвященных вопросам разработки оптических методов для диагностики состояния растений. Данной проблемой занимались отечественные и зарубежные учёные: А. А. Гительсон, М. Н. Мерзляк, А. В. Будаговский, А. Е. Соловченко, М. Л. Белов, И. Ю. Савин, А.-К. Махлейн, Ю. Иноуэ, Г. А. Блэкберн, О. Кира и др.

Состояние растений в значительной степени определяется фазой их развития и влиянием стрессовых факторов, таких как недостаток или избыток элементов питания, нарушения светового, температурного и водного режима, наличие заболеваний и т.д. Целью оптических методов контроля спектральных характеристик растений является получение таких данных, по которым современными методами интерпретации спектрального отклика растительности возможно определение состояния растений наиболее точно и с высокой производительностью. Методы интерпретации спектральных данных, такие как метод вегетационных индексов или корреляционный метод, направленные на количественную оценку степени воздействия на растения стрессов различного характера, требуют определения характеристики с малым шагом спектральных отсчетов – порядка 1-2 нм. Кроме того, для идентификации и дифференциации различных стрессовых состояний растения необходимо обеспечить измерение не только интегральной спектральной характеристики некоторой части растения, но и ее пространственного распределения, т.е. использовать изображающие гиперспектрометры. Наиболее высокие требования к пространственному разрешению предъявляются к данным, необходимым для

диагностики состояния растений, подверженных стрессам, которые вызваны болезнями. С учетом таких требований пространственное разрешение измерительного оборудования должно составлять от 5 мм и более.

Большинство существующих методов и средств получения спектральных характеристик для диагностики состояния растений не гарантируют одновременно высокое спектральное и пространственное разрешение, и кроме того существуют значительные ограничения на условия применения, снижающие их производительность в практическом земледелии. Наиболее перспективными средствами измерения для оценки состояния растений на сегодняшний день являются изображающие спектрометры, основанные на многоканальных приемниках излучения (ПИ), однако спектральная разрешающая способность последних остается недостаточно высокой.

Принимая во внимание значительные требования к диапазону диагностируемых параметров в современном земледелии, для определения состояния растений необходимо применять методы регистрации спектральных характеристик растительности с высокой спектральной и пространственной разрешающей способностью, а также производительностью.

Таким образом тема диссертации, посвященная созданию оптического метода получения спектральных данных с высоким пространственным и спектральным разрешением для диагностики широкого диапазона состояний сельскохозяйственных растений и является актуальной.

Целью диссертационной работы является создание оптического метода получения спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ с требуемым для диагностики состояния сельскохозяйственных растений пространственным и спектральным разрешением.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

- проведен анализ современных оптических методов диагностики сельскохозяйственных растений, принятых в практическом земледелии;
- определены требования к средствам контроля спектральных характеристик сельскохозяйственных растений, в том числе к их пространственному и спектральному разрешению;
- разработан оптический метод обеспечения требуемых значений спектрального и пространственного разрешения приборов, построенных на основе многоканального ПИ;
- разработана методика определения основных параметров спектрального элемента гиперспектрометра на базе многоканального ПИ,

реализующего разработанный метод;

- проведены численные и натурные эксперименты для проверки основных теоретических положений диссертации.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- разработан оригинальный метод получения спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ, отличающийся введением в их оптическую схему дополнительных оптических фильтров и проведением последующей математической обработки, построенной на решении обратной задачи. Метод обеспечивает получение спектральной характеристики отражения растительности в видимой и ближней инфракрасной области с шагом спектральных отсчетов 1 нм прибором как на основе восьмиканального ПИ, так и на основе RGB матрицы, что увеличивает число спектральных отсчетов более чем в 35 раз;

• определены методы решения обратной задачи, поставленной в рамках разработанного метода, обеспечивающие наименьшую относительную погрешность при различных значениях отношения сигнал-шум. В частности, гиперспектрометр на основе восьмиканального ПИ при использовании метода разложения по вейвлет-базису Хаара и гиперспектрометр на основе RGB матрицы с применением метода регуляризации Тихонова обеспечивают относительную погрешность не более 15% при отношении сигнал-шум не менее 10;

• разработана новая методика определения основных параметров спектрального элемента гиперспектрометра на базе многоканального ПИ, включающая определение типа многоканального ПИ, количества и вида функций пропускания дополнительных оптических фильтров, параметров съемки и метода обработки данных, исходя из требований к производительности, а также к пространственному и спектральному разрешению;

• предложена математическая модель метода получения спектральных характеристик прибором на основе многоканального ПИ, обеспечивающая расхождение расчетных и экспериментальных данных в пределах 15 %.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что гиперспектральная аппаратура, реализующая разработанный метод получения спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ, позволит снизить трудоемкость и повысить эффективность сельскохозяйственных мероприятий возделывания и защиты растений, а также значительно расширит возможности применения стандартных RGB матриц в

области спектральных измерений.

Методология и методы исследования. В диссертации были использованы: теория физиологии растений, теория оптических систем, методы геометрической оптики, методы исследования функций, численные методы решения систем линейных уравнений, методы решения некорректных обратных задач.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанный метод регистрации спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ позволяет получать спектральную характеристику отражения растительности с шагом спектральных отсчетов 1 нм в диапазоне не менее 300 нм в пределах видимой и ближней инфракрасной области прибором как на основе восьмиканального ПИ, так и на основе RGB матрицы;
- разработанная методика определения основных параметров спектрального элемента гиперспектрометра на базе многоканального ПИ позволяет регистрировать спектральную характеристику отражения объекта с шагом 1 нм в диапазоне не менее 300 нм в пределах видимой и ближней инфракрасной области с относительной погрешностью не более 15% при отношении сигнал-шум не менее 10.

Достоверность результатов работы подтверждается использованием известных и подтвержденных практикой теорий, математических моделей и методов, а также согласованностью результатов численного моделирования и экспериментальных исследований.

Апробация результатов. Материалы диссертационной работы докладывались на Международной научно-практической конференции «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования» (Лыткарино, 2019 г.), X и XI Международной научно-практической конференции «Иновации в сельском хозяйстве» (Москва, 2018, 2019 гг.), Всероссийской студенческой конференции «Студенческая весна-2019» (Москва, 2019 г.), XIII Международной конференции «Прикладная оптика-2018» (Санкт-Петербург, 2018 г.).

Внедрение результатов работы. Разработанный метод получения спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ был использован для определения состояния сельскохозяйственных культур перед внесением удобрений и пестицидов в крестьянском (фермерском) хозяйстве «АгроЭкология». Внедрение и использование результатов работы подтверждено соответствующим актом.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 печатных

работ, в том числе 1 патент РФ [1], 4 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus [2–5], 6 статей в других изданиях и тезисов докладов [6–11].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Во всех работах, выполненных в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, разработке методов их решения, проведении, обработке и анализе результатов экспериментальных исследований.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложения. Объем диссертации составляет 159 страниц, включая 49 рисунков и 25 таблиц. Библиография содержит 155 наименований на 19 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, описана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проведен обзор литературных источников в области методов и средств регистрации и интерпретации спектральных характеристик сельскохозяйственных растений.

Показано, что воздействие стрессовых факторов приводит к изменениям спектральной характеристики растений. Для преобразования таких изменений в числовые значения используют метод оценки параметров полос поглощения, метод производных, метод вегетационных индексов, а также корреляционные методы. Задача количественной оценки стрессового фактора решается на основании использования эмпирических зависимостей, связывающих числовой параметр, характеризующий вызванные стрессом изменения спектра, полученный одним из перечисленных методов, и количественное значение того или иного стрессового фактора.

Отмечено, что для диагностики состояния растений по широкому кругу стрессовых факторов требуется регистрация пространственного распределения спектральной отражательной способности растений, причем требования к средствам измерений спектральных характеристик растений, следующие: рабочий диапазон длин волн – $\delta_\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$, $\lambda_1 = 400$, $\lambda_2 = 1000$ нм, шаг между спектральными отсчетами – $\Delta\lambda \leq 2$ нм, пространственное разрешение – $a_0 \geq 5$ мм, производительность – $P \geq 25$ га/ч, частота съемки –

$$\nu_{\text{кд}} \geq 10 \text{ Гц.}$$

Показано, что существующие средства измерения спектральных данных для диагностики состояния растений не обеспечивают регулярные измерения с требуемыми параметрами. Указано, что наиболее подходящий тип устройства для решения задач диагностики состояния растений – изображающий гиперспектрометр для установки на дроны, наземные транспортные средства и использования оператором. Приведены ограничения распространённых гиперспектрометров на основе диспергирующей системы, интерференционных и многоканальных. Так устройства первой группы, отличаясь довольно высоким пространственным и спектральным разрешением, требуют организации сканирования по одной из координат куба данных, что затрудняет визуализацию регистрируемых данных оператору в режиме реального времени. Кроме того, диспергирующая система нередко оказывается технологически сложно реализуемым узлом. Интерференционные гиперспектрометры также имеют высокое спектральное и пространственное разрешение, но их недостатком является сложность конструкции и технической реализации видеоизображения.

Многоканальные изображающие спектрометры выгодны с точки зрения простоты конструкции, производительности и организации видеоизображения. Их наиболее современной конфигурацией являются приборы на основе многоканального ПИ. Многоканальный ПИ представляют собой площадку чувствительных элементов (микропикселов), покрытую матрицей, состоящей из различных узкополосных селективных фильтров. По характеру взаимного расположения узкополосных фильтров различают полосовые, плиточные и мозаичные многоканальные ПИ.

Для построения гиперспектрометра наиболее предпочтительны мозаичные многоканальные ПИ, так как, в отличии от первых двух групп, многоканальные ПИ не требуют организации сканирования для получения спектральной характеристики каждой точки кадра. В таких ПИ группа микропикселов с селективными фильтрами объединяются в один макропиксель, т.е. в них использован тот же принцип, что и в RGB матрицах, однако количество спектральных каналов увеличено с трех до четырех, девяти, шестнадцати и т.д. Такая конфигурация позволяет осуществлять получение данных за один кадр во всех каналах без осуществления сканирования по пространственной или спектральной координате при простоте и надежности конструкции. Кроме того, устройства рассматриваемой группы обеспечивают требуемую производительность и пространственное разрешение. Основным

недостатком отмеченных многоканальных ПИ является их низкое спектральное разрешение, при увеличении которого за счет повышения количества каналов макропикселя, происходит снижение пространственного разрешения.

Отмечено, что спектрометры на основе мозаичных многоканальных ПИ с увеличенным количеством спектральных отсчетов при сохраненном пространственном разрешении представляются предпочтительным типом аппаратуры для диагностики состояния растения ввиду их высокой производительности, простоты и надежности конструкции, универсальности установки и пр.

Показано, что разработка метода получения спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ, обеспечивающего гиперспектральное разрешение (количество отсчетов ≥ 100 , $\Delta\lambda \leq 10$ нм), требует дополнительного исследования, которое проведено во второй главе.

Во второй главе описан оригинальный метод получения спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ с требуемым для диагностики состояния растений пространственным и спектральным разрешением. Приведена разработанная методика расчета основных параметров спектрального элемента гиперспектрометра на базе многоканального ПИ, реализующего предложенный метод.

Регистрация спектральной плотности яркости (СПЯ) объекта произвольным чувствительным элементом ПИ описывается известным интегральным выражением:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(\lambda) \cdot \tau_{\text{ОС}}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda = C \cdot U, \quad (1)$$

где $L_\lambda(\lambda)$ – СПЯ излучения отраженного от растения, обладающего коэффициентом диффузного отражения $\rho(\lambda)$, и на поверхности которого источником излучения создана спектральная плотность освещенности $E_\lambda(\lambda)$, такая, что $L_\lambda(\lambda) = E_\lambda(\lambda) \cdot \rho(\lambda)/\pi$; $\tau_{\text{ОС}}(\lambda)$ – спектральное пропускание оптической системы регистрирующего прибора; $S(\lambda)$ – спектральная чувствительность отдельного элемента ПИ; U – значение сигнала отдельного чувствительного элемента; λ_1, λ_2 – границы рабочего спектрального диапазона; C – коэффициент, не зависящий от длины волны и определяемый параметрами аппаратуры и условиями съемки (диаметр входного зрачка объектива, расстояние до объекта, поле зрения и т.п.).

Выражение (1) рассматривается как уравнение относительно СПЯ $L_\lambda(\lambda)$. Интеграл (1) заменен конечной суммой и расписан по некоторой составной квадратурной формуле:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(\lambda) \cdot \tau_{OC}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda \approx \sum_{i=1}^n L_\lambda(\lambda_i) \cdot \tau_{OC}(\lambda_i) \cdot S(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda,$$

где $L_\lambda(\lambda_i)$ – значения СПЯ объекта в дискретных точках рабочего диапазона длин волн; $S(\lambda_i)$ – дискретные значения спектральной чувствительности ПИ; $\tau_{OC}(\lambda_i)$ – дискретные значения функции пропускания оптической системы регистрирующего прибора; i – номер шага разбиения спектрального диапазона при переходе к конечной сумме; $v(\lambda_i)$ – значения весовых коэффициентов шагов разбиения, определяющиеся используемым способом численного интегрирования.

Модельное описание регистрации изображения спектрометром на основе многоканального ПИ для одного макропикселя с учетом формирования сигнала отдельно в каждом канале преобразовывается в систему m линейных алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n L_\lambda(\lambda_i) \cdot S_1(\lambda_i) = C \cdot U_1 \\ \sum_{i=1}^n L_\lambda(\lambda_i) \cdot S_2(\lambda_i) = C \cdot U_2 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n L_\lambda(\lambda_i) \cdot S_m(\lambda_i) = C \cdot U_m \end{array} \right. , \quad (2)$$

где $S_1(\lambda_i), S_2(\lambda_i), \dots, S_m(\lambda_i)$ – дискретные значения функции, учитывающей, пропускание оптической системы, шаг разбиения и его весовые коэффициенты при численном интегрировании, а также чувствительности микропикселов, относящихся к 1, 2 и m -тому каналу ПИ, соответственно; U_1, U_2, \dots, U_m – величины сигналов микропикселов, относящихся к 1, 2 и m -тому каналу ПИ, соответственно.

Отмечено, что уравнение (2), решаемое относительно $L_\lambda(\lambda_i)$, представляет собой интегральное уравнение Фредгольма I рода, сведенное к системе линейных алгебраических уравнений. Указано, что как интегральное уравнение Фредгольма I рода, так и системы линейных алгебраических уравнений, образованные на его основе, относятся к некорректно поставленным задачам по Адамару, т.е. нарушают условия существования, единственности и устойчивости решения. Указано, что в настоящее время разработано множество методов их решения, однако качество решения в значительной степени зависит от полноты и подготовленности исходных данных.

Показано, что количество неизвестных системы (2) n , определяющееся шагом разбиения или шагом между спектральными отсчетами $\Delta\lambda$, при стремлении к гиперспектральному разрешению значительно превышает количество уравнений m , такая система может иметь бесконечно много решений и называется недоопределенной. Очевидным шагом при подготовке исходных данных, является снижение неопределенности задачи за счет увеличения количества уравнений системы (2). Прямым подходом к такой задаче является повышение количества каналов многоканального ПИ за счет добавления дополнительных чувствительных элементов в макропикセル многоканального ПИ. Последнее, в свою очередь, приводит к увеличению размеров макрописела и, следовательно, к ухудшению пространственного разрешения.

Во второй главе предложено увеличить количество каналов регистрации характеристики отражения объекта за счет введения во время съемки в ход лучей p дополнительных оптических фильтров с известными спектральными функциями пропускания $\tau_k(\lambda_i)$, ($k = 1 \dots p$). Таким образом, помимо каналов с исходной чувствительностью отдельных элементов микропикселя, добавляются каналы, созданные комбинациями функций чувствительности элементов многоканального ПИ и функций пропускания дополнительных оптических фильтров. Отмечено, что на устройство, реализующее предложенный метод получен патент.

В диссертационной работе указано, что последующая математическая обработка результатов съемки с дополнительными фильтрами специальными методами обеспечивает определение спектральной характеристики каждой точки полученного изображения со значительно превышающим исходное числом спектральных отсчетов с сохранением пространственного разрешения.

Математическое описание реализации предлагаемого метода с применением p дополнительных оптических фильтров имеет вид системы $m \cdot (p + 1)$ линейных алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n L_\lambda(\lambda_i) \cdot S_1(\lambda_i) \cdot \tau_k(\lambda_i) = C \cdot U_{1\tau k} \\ \sum_{i=1}^n L_\lambda(\lambda_i) \cdot S_2(\lambda_i) \cdot \tau_k(\lambda_i) = C \cdot U_{2\tau k} , \quad k = \overline{0, p}, \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n L_\lambda(\lambda_i) \cdot S_m(\lambda_i) \cdot \tau_k(\lambda_i) = C \cdot U_{m\tau k} \end{array} \right. \quad (3)$$

где $U_{1\tau k}$, $U_{2\tau k}$, $U_{m\tau k}$ – значения сигналов пикселов, относящихся к 1, 2 и m -тому каналу ПИ, соответственно, полученные при съемке с дополнительными оптическими фильтрами, обладающими спектральным коэффициентом пропускания $\tau_k(\lambda_i)$. Указано, что значение параметра $k = 0$ означает проведение съемки без оптического фильтра, т.е. $\tau_0(\lambda_i) = 1$.

Матричную форму системы уравнений (3) можно представить в следующем виде:

$$S \cdot l = u, \quad (4)$$

где S – оператор выражения, представленный матрицей размера $(m \cdot (p + 1)) \times n$, учитывающей значения чувствительности каналов ПИ и пропускания оптических фильтров; l – вектор, состоящий из n элементов и определяющий дискретные значения СПЯ объекта; u – вектор из $(m \cdot (p + 1))$ элементов, сформированный значениями сигналов микропикселов, зарегистрированными в ходе съемки объекта непосредственно многоканальным ПИ и с использованием дополнительных оптических фильтров.

В главе приведены методы решения некорректных задач, позволяющие произвести решение системы (4) относительно l , или осуществить реконструкцию СПЯ. Приведено математическое описание метода наименьших квадратов, метода Фурье-преобразования, метода разложения по вейвлет-базису, итерационных методов и метода регуляризации Тихонова, также отмечена необходимость исследования эффективности реконструкции СПЯ каждым методом для выявления предпочтительного.

Проведена разработка методики определения основных параметров спектрального элемента гиперспектрометра на основе многоканального ПИ, реализующего разработанный метод. Методика позволяет определять тип многоканального ПИ, количество и вид функций пропускания дополнительных оптических фильтров, параметры съемки и метод реконструкции спектральной характеристики, исходя из требований к производительности, а также к пространственному и спектральному разрешению.

Первый этап методики предусматривает определение требуемых значений производительности, спектрального и пространственного разрешения и требуемой частоты съемки, т.е. частоты кубов данных. Далее подбираются тестовые объекты, при этом следует обеспечить для спектральных характеристик тестовых и целевых объектов близость максимальных значений их первых, а также вторых производных по λ – M_1 и M_2 , соответственно. Кроме того, выбирается многоканальный ПИ, после чего по каталогу оптического стекла подбираются конкретные фильтры так, чтобы их функции пропускания

покрывали весь рабочий спектральный диапазон и максимально различались между собой. Далее из выбранного набора определяется количество и конкретное сочетание фильтров, обеспечивающие выполнение условия Пикара, минимизацию числа обусловленности матрицы S и выполнение требования к частоте съемки. По известным значениям функций пропускания оптических фильтров, чувствительностей микропикселов многоканального ПИ и СПЯ тестовых объектов рассчитываются значения сигнала ПИ. Моделируются помехи ПИ введением случайной величины погрешности в полученные значения. Определяется СПЯ описанными методами решения некорректных задач. Результаты реконструкции оцениваются по величине относительной погрешности восстановления СПЯ, значениям коэффициентов вариации и корреляции, а также по соответствуанию исходным требованиям. Параметры спектрального элемента гиперспектрометра на основе многоканального ПИ и соответствующий им метод реконструкции, обладающие наилучшими перечисленными параметрами, фиксируются как предпочтительные.

В третьей главе показаны результаты численного моделирования метода получения спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ с точки зрения устойчивости к погрешностям в выходном сигнале ПИ и повторяемости получаемых данных методами численного моделирования. Описана методика численного моделирования гиперспектрометра на основе многоканального ПИ. Определены основные параметры спектрального элемента гиперспектрометра, метод математической обработки и условия съемки, удовлетворяющие требованиям, установленным в первой главе.

Численное моделирование проведено с учетом разработанной методики определения основных параметров спектрального элемента гиперспектрометра. Приближение численного моделирования к практической реализации обеспечено учетом аддитивного шума ПИ, для чего внесены искажения в расчетные значения сигнала ПИ. Искаженное значение определялось с помощью выражения:

$$u_{\delta} = u_q + u_{max} \cdot \left(x_{\delta} \cdot \frac{\delta_{\text{отн}}}{100\%} \right),$$

где u_q – рассчитанное неискаженное значения сигнала с ПИ для q -го канала, соответствующее одному объекту; u_{max} – максимальное значение сигнала среди всех каналов для одного объекта; x_{δ} – параметр, задаваемый случайнм образом, и определяющий величину искажения в пределах $\delta_{\text{отн}}$ и подчиняющийся закону нормального распределения с математическим ожиданием $\mu_{x_{\delta}} = 0$ и дисперсией $\sigma_{x_{\delta}}^2 = 0,15$; $\delta_{\text{отн}}$ – величина вносимой

погрешности, выраженная в процентах.

Параметр $\delta_{\text{отн}}$ связан со значением отношения сигнала-шума $\mu_{\text{осш}}$ следующим соотношением:

$$\mu_{\text{осш}} = \frac{100\%}{\delta_{\text{отн}}}.$$

Восстановление СПЯ объекта решением обратной задачи (4) поискаженным значениям сигналов \mathbf{u}_δ проведено следующими семью методами: метод наименьших квадратов, метод Фурье-преобразования, методы разложения по вейвлет-базису на основе функции интеграла ошибки и по вейвлет-базису Хаара, метод сопряженных градиентов и стабилизированный метод сопряженных градиентов, а также метод регуляризации Тихонова. В третьей главе осуществлено исследование приведенных методов решения некорректной задачи (4), на основании которого был определен наиболее предпочтительный из перечисленных методов.

Результаты реконструкции оценены по значениям относительной погрешности $\vartheta_{\text{отн}}(\lambda_i)$ реконструированной СПЯ, среднеквадратическому отклонению относительной погрешности или коэффициенту вариации $\sigma_{\text{кв}}$, показывающему степень однородности и повторяемости результатов, а также по величине коэффициента корреляции $\sigma_{\text{кк}}$ восстановленной СПЯ и измеренной сертифицированным спектральным прибором. Метод, показавший наилучшие значения указанных параметров, признавался предпочтительным.

Проведена калибровка по эталонному объекту согласно выражению:

$$L_{\lambda \text{ к}}(\lambda_i) = L_\lambda(\lambda_i) \cdot \frac{L_{\lambda \text{ эт исх}}(\lambda_i)}{L_{\text{эт}}(\lambda_i)},$$

где $L_{\lambda \text{ к}}(\lambda_i)$ – реконструированная СПЯ, прошедшая калибровку; $L_{\lambda \text{ эт исх}}(\lambda_i)$ – измеренная СПЯ эталона; $L_{\text{эт}}(\lambda_i)$ – реконструированная СПЯ эталона.

Численное моделирование проведено для двух вариантов гиперспектрометра. В первом варианте (далее вариант 1) рассмотрен гиперспектрометр на основе мультиспектрального ПИ с макропикселом, состоящим из девяти пикселей, один из которых отвечает за черно-белое изображение, поэтому спектральных каналов в таком ПИ восемь (Рисунок 1). Во втором варианте (далее вариант 2) рассмотрен гиперспектрометр на основе RGB матрицы с макропикселом, состоящим из четырех элементов и имеющим три канала.

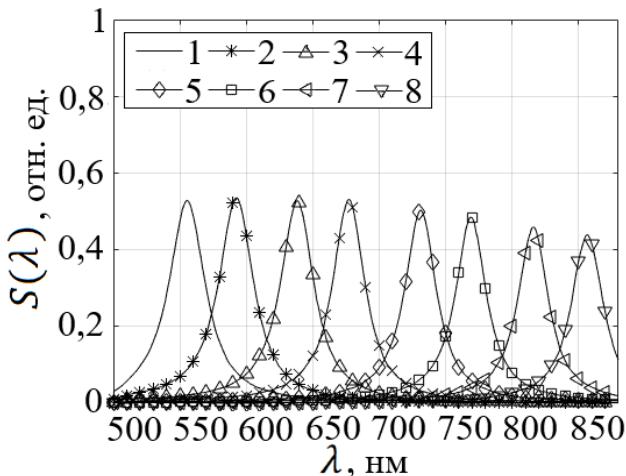


Рисунок 1. Кривые спектральной чувствительности каналов $S_j(\lambda_i)$ ПИ варианта 1.

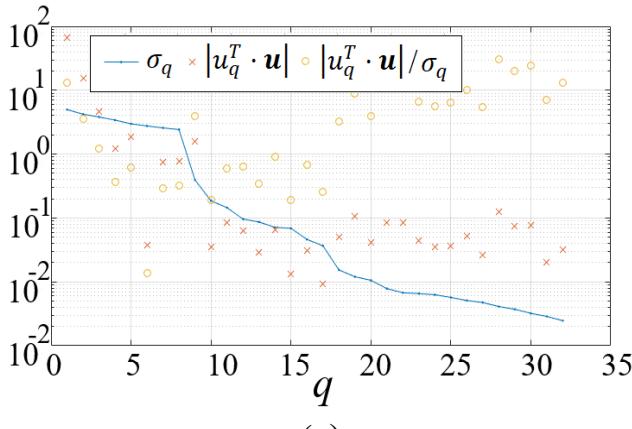
В качестве объектов, спектральные характеристики которых определялись гиперспектрометром в ходе численного моделирования, использованы 12 диффузно отражающих элементов цветовой шкалы X-Rite ColorChecker (Рисунок 2), спектральные характеристики которых измерены дифракционным спектрометром Avesta ASP-150 с разрешением 0,42 нм. Кроме того усредненные по значениям для 12 объектов величины M_1 и M_2 тестовых объектов оказались близкими и даже превышающими значения M_1 и M_2 характерных для растений кривых, определенных в диапазоне 0,35-0,88 мкм, что, как отмечено в работе, позволяет считать, выбор спектральных характеристик тестовых объектов удовлетворительным.

Оптические фильтры выбраны из каталога оптического стекла в соответствии с методикой, для варианта 1 выбраны ПС-8, СЗС-7 и ЖЗС-18, для варианта 2 – СС-15, СЗС-7, СЗС-16, ОС-5, ОС-11, ОС-14.

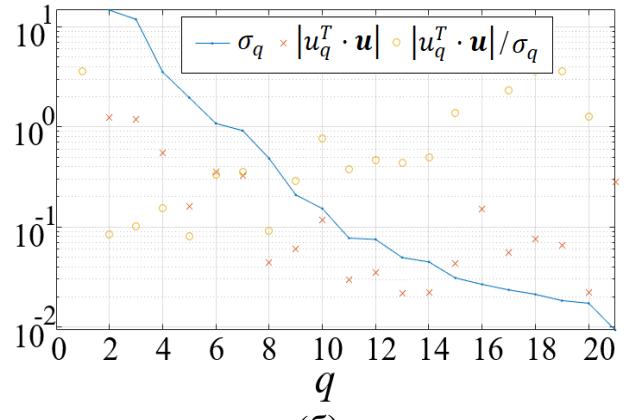
Определение оптимального количества фильтров проведено на основе анализа диаграммы Пикара. Для восемьканального ПИ матрица оператора выражения (4) сформирована с применением трех фильтров ($m = 8, p = 3, q = 32$), для трехканального ПИ – с 6 фильтрами ($m = 3, p = 6, q = 21$). По диаграммам Пикара (Рисунок 3) определено количество каналов q_{max} , при котором еще соблюдается условие Пикара, так для варианта 1 $q_{max} = 16$, что соответствует съемке с одним дополнительным оптическим фильтром, для варианта 2 – $q_{max} = 14$, что соответствует использованию четырех дополнительных оптических фильтров.



Рисунок 2. Элементы цветовой шкалы X-Rite ColorChecker (1-12) и эталонный объект 13.



(a)



(b)

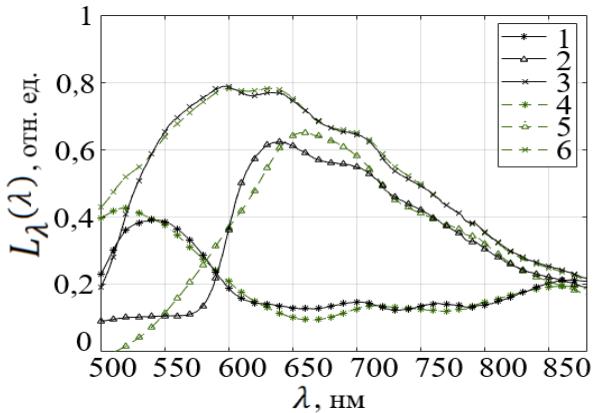
Рисунок 3. Диаграмма Пикара матрицы оператора выражения (4): (а) вариант 1, (б) вариант 2.

Исходя из минимизации числа обусловленности μ матрицы оператора выражения (4), обеспечивающей наибольшую устойчивость решаемой системы, предпочтительным для варианта 1 выбран фильтр СЗС-7 ($\mu = 225$), указано, что для варианта 2 съемку следует проводить с дополнительными фильтрами СС-15, СЗС-7, СЗС-16, ОС-14 ($\mu = 1171$).

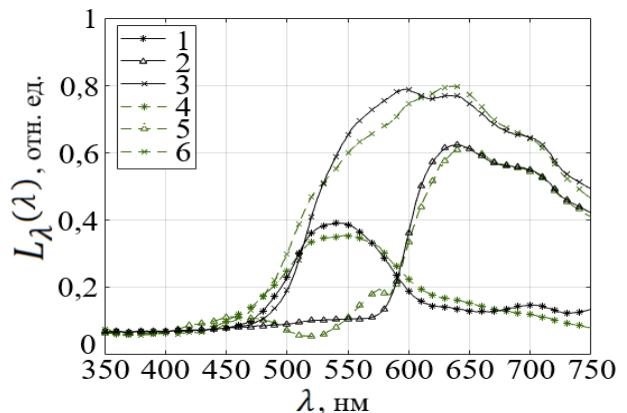
Для проверки устойчивости методов реконструкции к погрешностям правой части уравнения (4) в диссертационной работе численное моделирование проведено с различными значениями $\delta_{\text{отн}} = 0\%, 1,5\%, 7\%, 10\%$ для обоих вариантов. Отличные от нуля указанные величины $\delta_{\text{отн}}$ соответствуют значениям отношения сигнал-шум $\mu_{\text{осш}} = 66, 14, 10$.

В третьей главе представлены количественные оценки и графические материалы результатов численного моделирования с применением семи методов решения некорректных задач для двух вариантов гиперспектрометров при четырех различных значениях случайной погрешности в сигнале ПИ.

Численное моделирование для гиперспектрометра на основе восьмиканального ПИ показало, что наилучшим для такого варианта методом обработки результатов съемки является метод разложения по вейвлет-базису Хаара. Результаты реконструкции СПЯ указанным методом при искажении расчетного сигнала с ПИ $\delta_{\text{отн}} = 10\%$ приведены на Рисунке 4.а.



(а)



(б)

Рисунок 4. Результаты восстановления СПЯ при $\delta_{\text{отн}} = 10\%$: (а) методом разложения по вейвлет-базису Хаара, вариант 1; (б) методом регуляризации Тихонова, вариант 2. 1, 2, 3 – измеренная СПЯ, 4, 5, 6 – СПЯ, полученная математическим методом, объектов 5, 4, 3, соответственно.

Численное моделирование для гиперспектрометра на основе трехканального ПИ показало, что наилучшим для такого варианта методом обработки результатов съемки является метод регуляризации Тихонова. Результаты реконструкции СПЯ для варианта 2 указанным методом при искажении сигнала с ПИ $\delta_{\text{отн}} = 10\%$ приведены на Рисунке 4.б, а соответствующие количественные оценки имеют следующие значения: $\vartheta_{\text{отн}}(\lambda_i) = 13,97\%$, $\sigma_{\text{КВ}} = 18,60\%$, $\sigma_{\text{КК}} = 0,955$.

Основные параметры гиперспектрометра для углового поля зрения $2\omega = 30^\circ$ и при скорости движения носителя 50 км/ч, рассчитанные по разработанной методике и на основании полученных в численном моделировании результатов, приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметры гиперспектрометра на основе многоканального ПИ

Параметр	Значение при пространственном разрешении			
	Вариант 1		Вариант 2	
	5 мм	10 мм	5 мм	10 мм
Производительность, га/ч	25	75	60	120
Рабочий диапазон, нм	550-850	550-850	380-720	380-720
Количество спектральных отсчетов, ед.	300	300	340	340
Время формирования куба данных, с	0,1	0,1	0,1	0,1
Дальность съемки, м	15,5	31,4	23,5	47
Угловое пространственное разрешение, "	65	65	43	43

Параметры удовлетворяют требованиям по производительности, пространственному и спектральному разрешению, а также частоте съемки.

В четвертой главе показаны результаты экспериментальных исследований метода получения спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ на неорганических и органических объектах. Описана съемка органических и неорганических объектов различными вариантами гиперспектрометра, проведен анализ результатов съемки, выданы рекомендации по применению гиперспектрометра для диагностики состояния растений.

Экспериментальное исследование разработанного метода реализовано на основе гиперспектрометров с теми же параметрами, что были определены в численном моделировании. Так съемка объектов согласно разработанному методу осуществлена двумя устройствами – мультиспектральной камерой Silios Technologies CMS-V с восьмиканальным ПИ (вариант 1) и фотоаппаратом Canon 1200D с трехканальным ПИ (вариант 2). Значениями пикселов изображений, полученных в каждом канале ПИ при съемке с дополнительными фильтрами и при их отсутствии, сформирована правая часть \mathbf{u} выражения (4). Обработка полученных в ходе съемки материалов проведена в среде Matlab. Используемый алгоритм может быть оформлен в виде отдельного приложения и использоваться как автоматизированное программное обеспечение.

В экспериментальном исследовании рассмотрены органические и неорганические объекты. В качестве последних использовались те же элементы цветовой шкалы, что и в численном моделировании.

Метод разложения по вейвлет-базису Хаара оказался наилучшим методом решения некорректной задачи реконструкции СПЯ для варианта 1, что согласуется с результатами численного моделирования. Кривые СПЯ всех образцов, рассмотренных в экспериментальном исследовании, восстановленные указанным методом, приведены на Рисунке 5. В экспериментальном исследования для варианта 1 и метода разложения по вейвлет-базису получены следующие количественные оценки результатов реконструкции: $\vartheta_{\text{отн}}(\lambda_i) = 14,37\%$, $\sigma_{\text{КВ}} = 14,55\%$, $\sigma_{\text{KK}} = 0,967$. Различия между значениями относительной погрешности в численном моделировании при отсутствии искажений правой части и в экспериментальном исследовании для указанного метода лежат в пределах 15%.

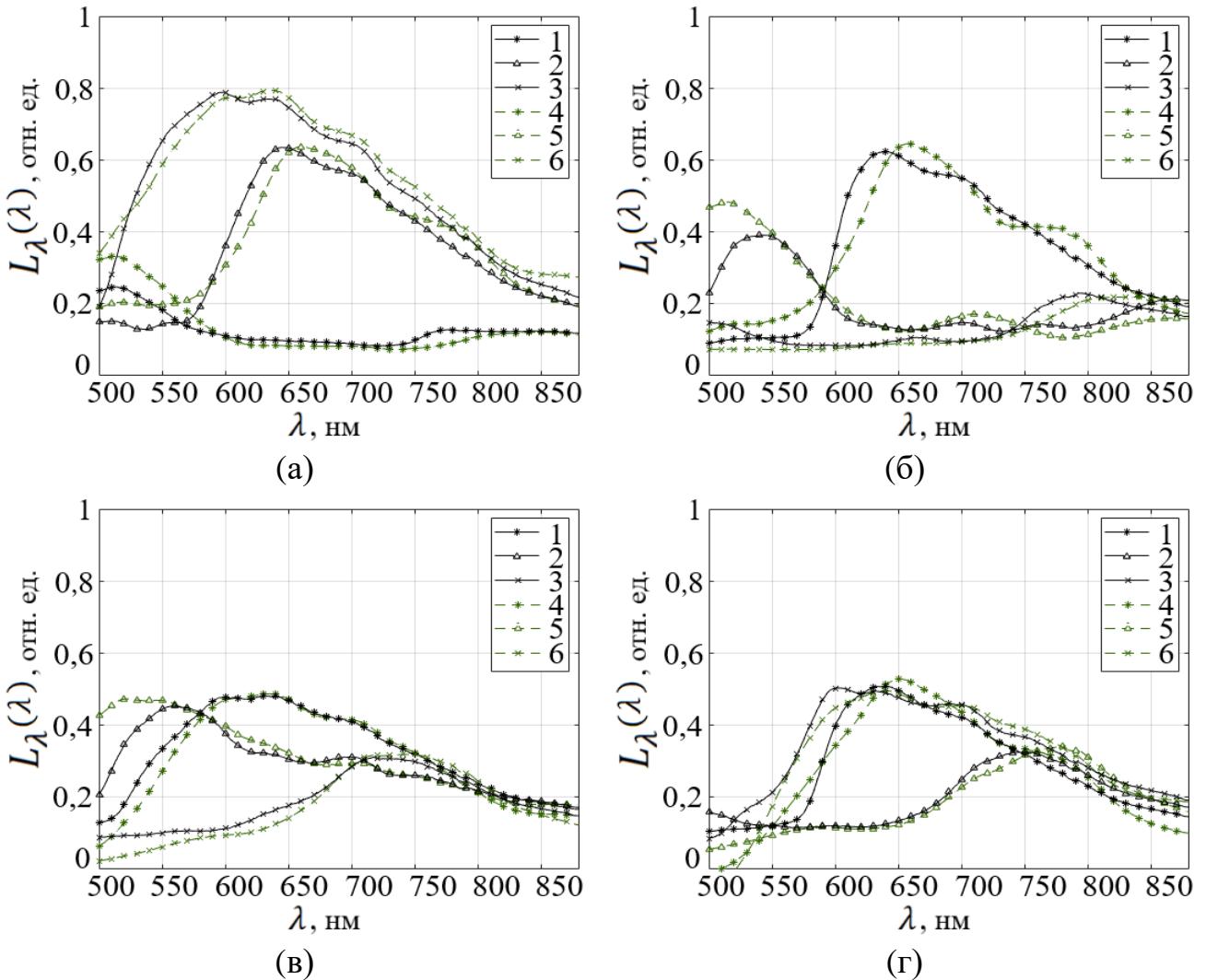
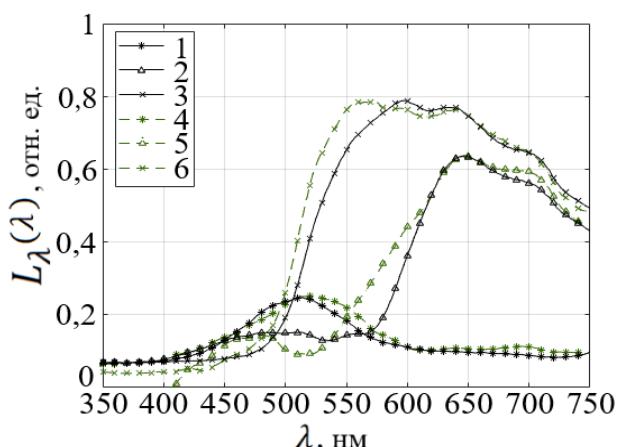
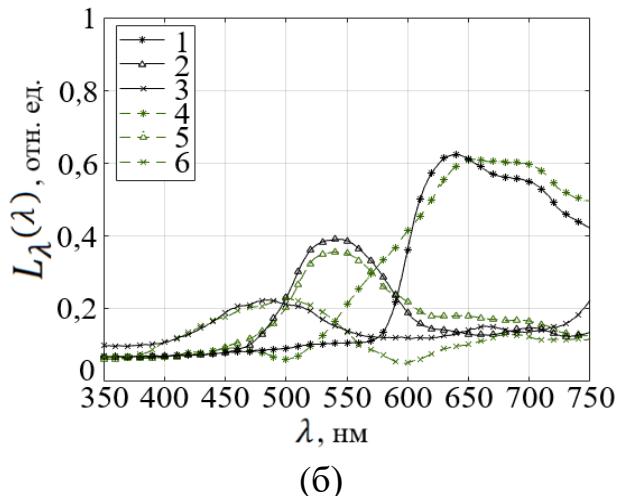


Рисунок 5. Результаты восстановления методом разложения по вейвлет-базису Хаара СПЯ объектов для варианта 1: (а) 1,2,3, (б) 4,5,6, (в) 7,8,9, (г) 10,11,12; 1, 2, 3 – измеренная СПЯ, 4, 5, 6 – СПЯ, полученная математическим методом.

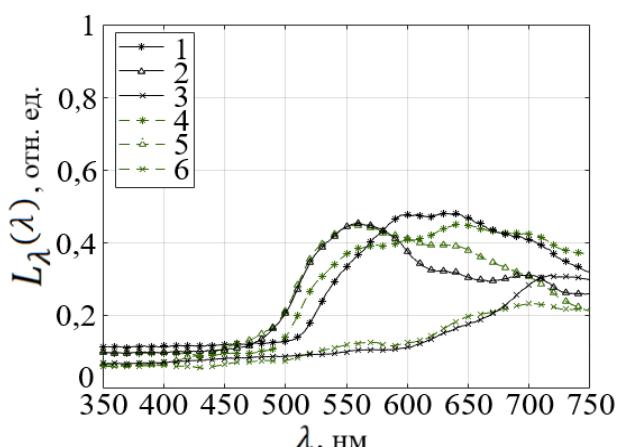
Метод регуляризации Тихонова, как и в численном моделировании, оказался наилучшим методом решения некорректной задачи реконструкции СПЯ для варианта 2. Кривые СПЯ всех образцов, рассмотренных в экспериментальном исследовании, восстановленные указанным методом, приведены на Рисунке 6. В экспериментальном исследовании для метода регуляризации Тихонова и варианта 2 получены следующие количественные оценки результатов реконструкции: $\vartheta_{\text{отн}}(\lambda_i) = 18,34\%$, $\sigma_{\text{KB}} = 25,02\%$, $\sigma_{\text{KK}} = 0,953$. Различия между значениями относительной погрешности в численном моделировании при отсутствии искажений правой части и в экспериментальном исследовании для указанного метода, также как для варианта 1, лежат в пределах 15%.



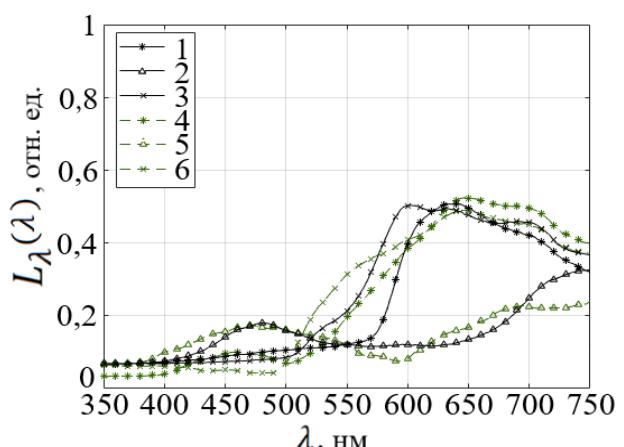
(а)



(б)



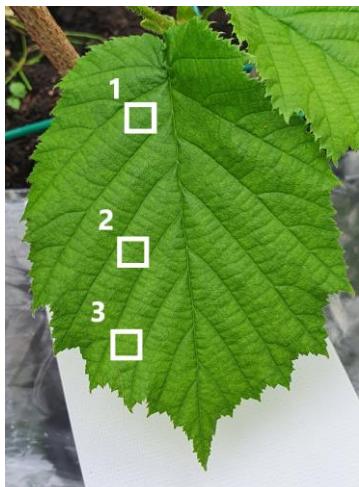
(в)



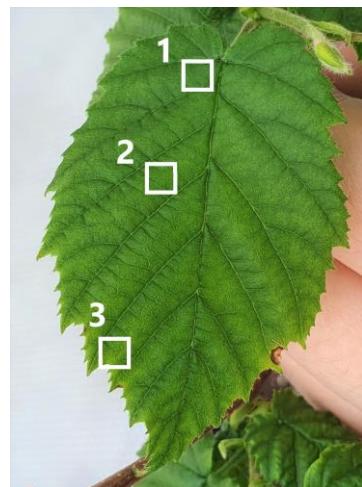
(г)

Рисунок 6. Результаты восстановления методом регуляризации Тихонова СПЯ объектов для варианта 2: (а) 1,2,3, (б) 4,5,6, (в) 7,8,9, (г) 10,11,12; 1, 2, 3 – измеренная СПЯ, 4, 5, 6 – СПЯ, полученная математическим методом.

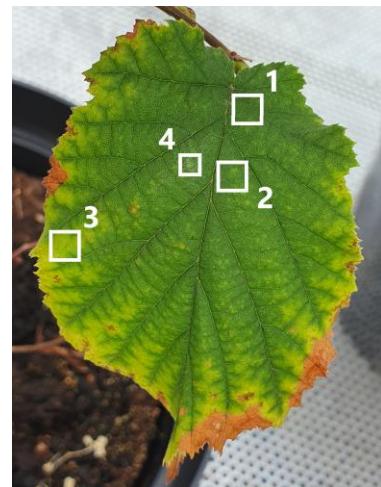
Помимо результатов экспериментального исследования разработанного метода на неорганических объектах, в четвертой главе приведены данные экспериментов на органических образцах, в качестве которых использовались здоровые и зараженные вирусным патогеном растения фундука. Фотографии листов рассматриваемых растений с отметками номеров областей исследования, для которых приведены СПЯ, показаны на Рисунке 7. Области исследований 1-3 листа 2, изображенного на Рисунке 7.б, не имеют заметных изменений тканей относительно областей 1-3 листа здорового растения (Рисунок 7.а). Область исследования 1 листа 3, изображенного на Рисунке 7.в, обладает тем же свойством, область 2 имеет слабо выраженное изменение окраски, область 3 – значительное изменение окраски, в области 4 располагаются продукты жизнедеятельности паутинного клеща.



(а)



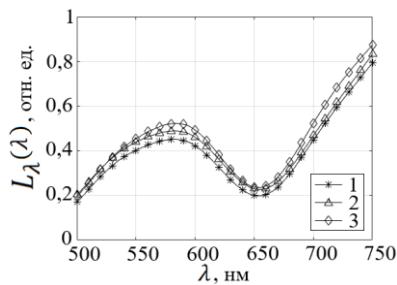
(б)



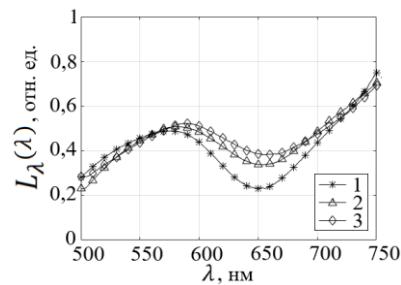
(в)

Рисунок 7. Лист фундука: (а) здорового, (б), (в) больного растения, (а) лист 1, (б) лист 2, (в) лист 3; 1-4 – номер области исследования.

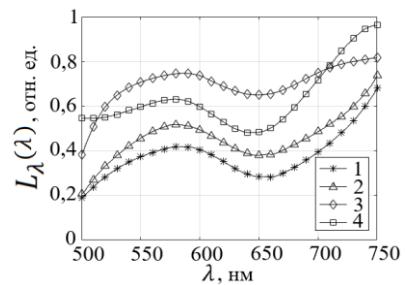
В четвертой главе приведены кривые СПЯ отмеченных на Рисунке 7 областей, определенные с помощью вариантов 1 и 2 (Рисунок 8).



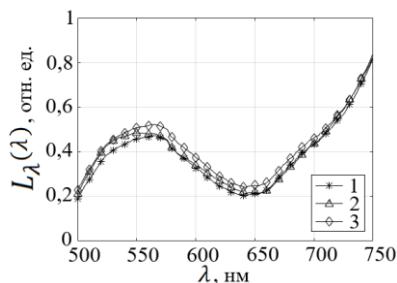
(а)



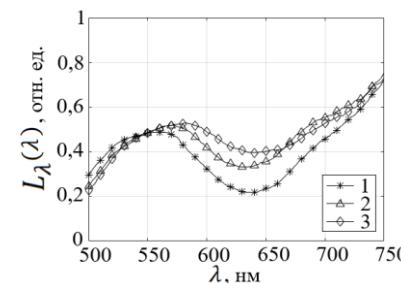
(б)



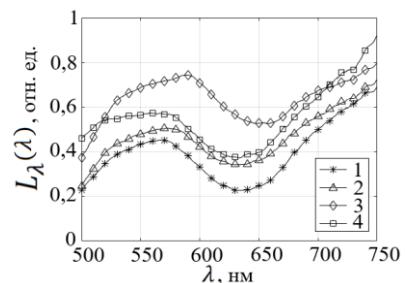
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 8. Результаты измерения СПЯ листов фундука: (а), (г) лист 1, (б), (д) лист 2, (в), (е) лист 3, полученные: (а), (б), (в) вариантом 1, (г), (д), (е) вариантом 2; 1-4 – номер кривой соответствующей ОИ.

Коэффициенты корреляции СПЯ областей исследований 1-3 листа 1 между собой и участками других листьев здорового растения оказались выше 0,993. Коэффициенты корреляции СПЯ областей исследования здорового и больных растений, тем меньше, чем выражение изменение тканей, при этом даже для внешне незаметных искажений, коэффициент корреляции не выше 0,945. На основании этого сделан вывод о применимости

гиперспектрометра на основе многоканального ПИ, реализующего разработанный метод, не только для автоматизации диагностики состояния, но и для фиксации стрессов, проявления которых незаметны невооруженным глазом. При этом измерительная аппаратура может быть построена на основе как мультиспектральных ПИ, так и трехканальных RGB-матриц.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведённых исследований в диссертационной работе решена актуальная научно-техническая проблема разработки спектрального метода и средства контроля спектральных характеристик сельскохозяйственных растений.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан оригинальный метод получения спектральных данных прибором на основе многоканального ПИ, предусматривающий введение в ход лучей во время съемки объекта дополнительных оптических фильтров, регистрацию соответствующих кадров и последующую специализированную математическую обработку, основанную на решении обратной задачи. Метод обеспечивает определение спектральной характеристики в видимой и ближней ИК-области с шагом спектральных отсчетов 1 нм прибором как на основе восьмиканального ПИ, так и на основе RGB матрицы, что увеличивает число спектральных отсчетов более чем в 35 раз.

2. Впервые предложено осуществление регистрации спектральных данных для диагностики состояния растений ГС на основе многоканального ПИ. Удовлетворение требований к выходным данным ГС, обусловленных способами интерпретации спектральных данных, принятых в практическом земледелии, а именно шаг спектральных отсчетов не более 2 нм, частота съемки не менее 10 Гц, пространственное разрешение от 5 мм и производительность не менее 25 га/ч, обеспечивается определенным сочетанием количества каналов ПИ, дополнительных фильтров, их спектральных характеристик, а также применением рационального математического метода обработки результатов.

3. Впервые разработана методика определения основных параметров спектрального элемента ГС на базе многоканального ПИ. Методика предусматривает установление типа ПИ, количества и функций пропускания дополнительных оптических фильтров, параметров съемки и метода обработки ее результатов, реализация которых гарантирует распределение спектральных

отсчетов ГС с шагом 1 нм в диапазоне не менее 300 нм в пределах видимой и ближней ИК-области и относительную погрешность определения спектральной характеристики ГС не более 15% при ОСШ не менее 10. Сочетание количества дополнительных фильтров и каналов ПИ определяется, исходя из требований ко времени формирования куба данных, выполнения условия Пикара и минимизации числа обусловленности.

4. Рассчитаны и практически реализованы два варианта гиперспектрометра. Спектральный элемент первого варианта гиперспектрометра предполагает использование восьмиканального ПИ с введением в ход лучей одного оптического фильтра и применением для математической обработки метода разложения по вейвлет-базису Хаара. Спектральный элемент второго варианта гиперспектрометра включает трехканальный ПИ, в ход лучей вводится четыре оптических фильтра, обработка результатов осуществляется методом регуляризации Тихонова. Отметим, что во втором варианте рассмотрен доступный и распространенный ПИ.

5. Проведено численное моделирование и экспериментальные исследования обоих вариантов ГС. Расхождение между значениями реконструированной СПЯ образцов, полученными в результате численного моделирования и экспериментов, находится в пределах 15%. Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования позволяют сделать вывод о правильности основных теоретических положений диссертации.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Патент № 2716454 Российская Федерация, МПК G01J 3/0235 (2019.08) G01J 3/2823 (2019.08) G01J 3/51 (2019.08). Гиперспектрометр с повышенной спектральной разрешающей способностью : № 2019110363 : заявл. 08.04.19 : опубл. 11.03.20 / А. В. Гурылева , А. М. Хорохоров , А. Ф. Ширанков , В. В. Введенский ; заявитель А. В. Гурылева 2 с. (0,23 п.л./0,15 п.л.)

2. Гурылева, А. В. Методы повышения спектрального разрешения изображающих спектрометров, построенных на основе многоканальных приёмников излучения / А. В. Гурылева, А. М. Хорохоров, В. С. Кобозев // Светотехника. 2020. № 3. С. 78–85. (0,86 п.л./0,5 п.л.)

3. Гурылева, А. В. Сравнительный анализ методов решения некорректных обратных задач для многоканальной гиперспектрометрии / А. В.

Гурылева, А. М. Хорохоров, В. И. Латышев // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127, вып. 10. С. 551–557. (0,75 п.л./0,45 п.л.)

4. Оптико-электронная система мониторинга состояния сельскохозяйственных растений / А. В. Введенская, А. М. Хорохоров, В. В. Введенский, М. С. Гинс // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2017. № 4. С. 54–73. (0,66 п.л./0,4 п.л.)

5. Недеструктивный метод диагностики азотообеспеченности растений оптико-электронной системой мониторинга / А. В. Введенская, А. М. Хорохоров, В. В. Введенский, М. С. Гинс // Вестник Российской университета дружбы народов. Сер. Агрономия и животноводство. 2017. Т. 12, вып. 1. С. 7–16. (0,6 п.л./0,4 п.л.)

6. **Гурылева, А. В.** Математическое моделирование многоканальных гиперспектрометров / А. В. Гурылева, А. М. Хорохоров, В. И. Латышев // Контенант. 2020. Т. 19, вып. 2. С. 20–24. (0,5 п.л./0,3 п.л.)

7. Increased temperatures impact estimation on the work of the nitrogen security hyperspectral monitoring system in field conditions / A. V. Guryleva, A. M. Khorokhorov, V. V. Vvedenskiy, A. Sh. Gadzhikurbanov // XI international scientific and practical conference «Innovative in Agriculture» : collection of conference proceedings. Moscow, 2019. P. 36–39. (0,36 п.л./ 0,25 п.л.)

8. **Гурылева, А. В.** Исследование возможностей многоканальных гиперспектрометров / А. В. Гурылева, А. М. Хорохоров, А. Ф. Ширанков // Контенант. 2019. Т. 18, вып. 3. С. 8–17. (1,13 п.л./0,7 п.л.)

9. **Гурылева, А. В.** Гиперспектрометр на основе мультиспектральной камеры / А. В. Гурылева, В. И. Латышев, А. М. Хорохоров // Всероссийская студенческая конференция «Студенческая научная весна», посвященная 85-летию Ю.А. Гагарина : сборник тезисов докладов. Москва, 2019. С. 199–201. (0,36 п.л./0,2 п.л.)

10. The predictive model for the nitrogen supply estimation of agricultural plants / A. V. Vvedenskaya, M.S. Gins, A. M. Khorokhorov [et al.] // X International scientific and practical conference «Innovative in Agriculture» : collection of conference proceedings. Moscow, 2018. P. 15–18. (0,36 п.л./0,2 п.л.)

11. Use of amazone precision sprayers in rapeseed cultivation technology / A. V. Vvedenskaya, A. F. Peliy, A. Diop [et al.] // X international scientific and practical conference «Innovative in Agriculture» : collection of conference proceedings. Moscow, 2018. P. 18–21. (0,3 п.л./0,15 п.л.)