

*На правах рукописи*

СМОЛИН ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ



**СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ  
ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В ДИАПАЗОНЕ 1,5-2 МКМ**

Специальность 05.11.07 — Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Смоленск — 2020

Работа выполнена на кафедре «Электроника и микропроцессорная техника» филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске

Научный руководитель: **Якименко Игорь Владимирович**,  
доктор технических наук, доцент,  
филиал ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске,  
заведующий кафедрой «Электроника и микропроцессорная техника»

Официальные оппоненты: **Локтев Алексей Алексеевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Транспортное строительство»  
ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»

**Корнилов Андрей Борисович**  
кандидат технических наук, руководитель реализации программ ОПК  
ГНЦ ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

Ведущая организация: АО «НПК «СПП», 111024  
г. Москва, Авиамоторная, 53

Защита состоится «25» февраля 2021 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета МЭИ.012 в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» по адресу: 111250 Москва, Красноказарменная, 14, ауд. Е-513.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» г. Москва.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент

Скорнякова Н.М.

## 1. Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Все чаще беспилотные воздушные суда (БВС) применяются для решения различных задач как организациями и физическими лицами, имеющими лицензии на подобную деятельность и руководствующимися правилами организации воздушного движения, так и субъектами, не соблюдающими требования руководящих документов. Вследствие этого, в ряде случаев, возникает необходимость в организации противодействия БВС, создающим угрозу безопасности полетов пилотируемых летательных аппаратов в воздушном пространстве аэропортов и угрозу эксплуатации различных техногенных объектов. Наиболее ярким примером являются неоднократные атаки при помощи БВС на российскую базу Хмеймим.

Для обеспечения противодействия БВС, так и другим малоразмерным объектам (МО), необходимо повышать эффективность работы средств их поиска и нейтрализации. Поскольку малые размеры эффективной поверхности рассеяния ( $\text{ЭПР} \approx 0,001 \text{ м}^2$ ) МО значительно снижают возможности радиолокационных средств, интерес вызывает применение пассивных оптико-электронных систем (ПОЭС).

Поиск МО при помощи ПОЭС подразделяется на три задачи:

- обнаружение — выделение на фоне атмосферы объекта (артефакта), предположительно являющегося МО;
- опознавание — определение обнаруженного объекта как МО и распознавание его формы;
- идентификация — различение отдельных мелких деталей МО для отнесения его к определенному классу.

Первая задача поиска (обнаружение) является наиболее сложной, так как излучение атмосферы из-за термодинамических и турбулентных процессов, происходящих в ней, носит нестационарный характер и в некоторых случаях может превышать излучение МО.

Результаты экспериментальных исследований в диапазоне 3-5 мкм показали, что излучение МО имеет низкий уровень так как в их составе отсутствуют мощные источники излучения. В настоящее время все чаще МО оснащают электрическими двигателями, излучение которых в диапазоне 3-5 мкм меньше, чем у бензиновых. В диапазоне 8-13 мкм излучение облаков в значительной мере превышает излучение МО, что затрудняет применение этого диапазона в дневных условиях.

Анализ информативности основных рабочих спектральных диапазонов современных ПОЭС [1] показал, что в последнее время широкое распространение

получили средства наблюдения со спектральным диапазоном SWIR. Основными его преимуществами по сравнению с видимым диапазоном являются:

- прозрачность атмосферы в этом диапазоне в 1,3 раза лучше;
- контраст объекта наблюдения в SWIR диапазоне более стабилен и в 1,5 раза выше, чем в видимом диапазоне.

По мнению автора, для обнаружения МО вместо среднего ИК диапазона можно применять диапазон 1,5-2 мкм, который может повысить эффективность применения диапазона 8-13 мкм в дневных условиях.

Повышение эффективности применения в ПОЭС диапазона 1,5-2 мкм может быть реализовано при помощи совершенствования алгоритмов обработки изображений фона (ИФ). Усовершенствование алгоритмов обработки ИФ предлагается проводить на основе фонового принципа извлечения информации, который является обратным традиционному. В фоновом принципе полезным сигналом считается не излучение МО (цели), а излучение атмосферы (фона). Выявленные изменения известных свойств пространственной структуры излучения атмосферы позволят сделать вывод о возможном присутствии излучения МО в этой области пространства.

Изучение статистических моделей излучения атмосферы по Scopus и Web of Science показало, что большинство существующих моделей разработаны при помощи космического зондирования. Статистические модели атмосферы в диапазоне SWIR, полученные при наблюдении с земли, практически отсутствуют. Для их построения необходимо провести экспериментальные исследования пространственной структуры излучения атмосферы с целью выявления их свойств и составления базы моделей.

Исходя из этого, актуальной научной задачей, имеющей значение для развития оптико-электронных приборов и комплексов, является построение статистических моделей энергетической яркости неба в диапазоне 1,5-2 мкм и алгоритмов, основанных на фоновом принципе извлечения информации, применение которых повысит эффективность обнаружения МО на фоне атмосферы при помощи ПОЭС.

### **Степень разработанности темы исследования**

Исторически обработка ИФ направлена на обеспечение улучшения визуализации изображений, полученных при фотосъемке, в интересах обнаружения искомых объектов на фоне атмосферы. Методы обработки таких ИФ отражены в работах Гонсалеса, Яне, Претта, Дуда, Харта и других ученых, при этом вопросы оборонного назначения у этих иностранных авторов (в открытой литературе) не отражены.

В России теоретические вопросы обработки изображений отражены в работах В.А. Сойфера, П.А. Бакута, Г.С. Колмогорова, Б.А. Алпатова,

П.В. Бабаяна и других ученых.

На основе разработанных методов создан широкий спектр алгоритмов обработки (фильтрации) изображений, которые используют линейные или нелинейные операции в пределах скользящего «окна» (маски) различной величины, однако большинство подобных алгоритмов либо получены для простейших моделей объекта и фона, либо имеют эвристические начала (т. е. научно не обоснованы).

Работоспособность алгоритмов обработки ИФ в условиях нестационарности процесса излучения неоднородностей атмосферы не исследовалась. Между тем подобные условия обработки ИФ являются типичными при обнаружении МО при помощи ПОЭС на фоне атмосферы. Реальное излучение атмосферы характеризуется пространственной неоднородностью в силу термодинамических и турбулентных процессов в атмосфере и временной нестационарностью. Поэтому существует необходимость в каждом конкретном случае проверять и анализировать результаты обработки изображений с целью убедиться в эффективности используемого алгоритма.

### **Цель работы**

Проведение исследований в интересах разработки статистических моделей пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм, необходимых для выработки рекомендаций по совершенствованию алгоритмов обработки изображений фона, повышающих эффективность обнаружения малоразмерных объектов при помощи пассивных оптико-электронных систем, работающих в диапазоне 1,5-2 мкм.

### **Научные задачи исследования**

1. Разработка методики для проведения экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы и измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) в соответствии с методикой.

2. Разработка статистических моделей, описывающих закономерности пространственной структуры флуктуаций энергетической яркости излучения неоднородностей атмосферы.

3. Разработка методики проведения экспериментальных исследований и получение статистических моделей, описывающих пространственные характеристики излучения МО (индикатрисы излучения).

4. Разработка метода и алгоритма обработки ИФ, позволяющего выделить МО на фоне атмосферы, в основе которого лежит фоновый принцип извлечения информации.

5. Проведение имитационного математического моделирования процесса обнаружения, направленного на оценку показателей эффективности

обнаружения МО на фоне атмосферы при помощи ПОЭС в диапазоне 1,5-2 мкм.

6. Выработка рекомендаций по совершенствованию существующих и разработке новых алгоритмов обработки ИФ, повышающих эффективность обнаружения при помощи ПОЭС, работающих в диапазоне 1,5-2 мкм.

### **Научная новизна**

Статистические модели пространственной структуры флуктуаций энергетической яркости излучения неоднородностей атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм, разработанная по результатам статистической обработки экспериментальных натуральных измерений при помощи ИВК, отличающаяся от подобных тем, что они имеют двумерное представление информации.

Метод обнаружения БВС при помощи ПОЭС ближнего ИК-диапазона, отличающийся от известных тем, что для этого предварительно производится сегментация всего изображения, полученного с ПОЭС с учетом отличий размеров излучающих неоднородностей атмосферного фона и БВС в соответствии с выявленной в процессе экспериментальных исследований пространственной структурой излучения неоднородностей атмосферного фона.

Алгоритм сегментации изображения фона в составе метода обнаружения БВС при помощи ПОЭС ближнего ИК-диапазона, отличающийся тем, что размеры сегментов ИФ определяются выявлением первого значения вектора корреляции, образованного усреднением диагоналей корреляционных матриц ИФ по строкам и по столбцам, ниже порогового, в целом позволяющий формировать сегменты ИФ, в пределах которых пространственное распределение энергетической яркости, согласно выявленным в результате экспериментальных исследований закономерностей атмосферного фона, можно считать однородным, и производить пространственную фильтрацию излучающих неоднородностей, создаваемых БВС и атмосферным фоном.

Контрастный метод обработки сформированных сегментов ИФ, в целом обеспечивающий увеличение отношения «сигнал шум» в условиях облачного атмосферного фона для повышения вероятности обнаружения БВС, отличающийся тем, что основан на фоновом принципе извлечения информации.

### **Теоретическая значимость работы**

Разработаны и доказана работоспособность метода и алгоритма обработки ИФ, позволяющего выделить МО на фоне атмосферы, в основе которого лежит фоновый принцип извлечения информации.

### **Практическая значимость работы**

Разработан измерительно-вычислительный комплекс для проведения экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы в соответствии с разработанной методикой.

Выработаны рекомендации по совершенствованию существующих и раз-

работке новых ПОЭС, работающих в диапазоне 1,5-2 мкм и предназначенных для обнаружения МО на фоне атмосферы.

### **Методология и методы исследования**

В процессе решения поставленных задач в диссертационной работе широко использовались экспериментальные и математические методы исследований, информационные компьютерные технологии, а также программные пакеты Scilab-6.0, Microsoft Excel 2007 и др.

### **Положения, выносимые на защиту**

Статистические модели, описывающие закономерности пространственной структуры флуктуаций энергетической яркости излучения неоднородностей атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм.

Алгоритм сегментации изображения фона в составе метода обнаружения МО при помощи ПОЭС ближнего ИК-диапазона.

Контрастный метод обработки сформированных сегментов ИФ, применяемый для обнаружения МО при помощи ПОЭС ближнего ИК-диапазона.

**Степень достоверности полученных результатов** обеспечена достаточным объемом экспериментальных и статистических данных, корректным использованием апробированных научных методов исследований и современным математическим аппаратом обработки результатов.

Достоверность полученных в работе алгоритмов подтвердилась в процессе проводимых исследований и испытаний на базе АО «НИИ СТТ» в рамках НИОКР: «ИВК-А», «Индикатриса-А» и др.

### **Апробация работы**

Основные положения докладывались на международных конференциях филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске и ВА ВПВО ВС РФ в г. Смоленске и на международном симпозиуме «МСАРД-2019» (8 докладов).

Реализация результатов, полученных в работе, проведена при внедрении теоретических результатов в учебные процессы филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. Практические результаты — алгоритмы применены для оценки заметности БВС, разработанных АО «НИИ СТТ» г. Смоленск и ООО СНИЦ РЭС «Завант».

По результатам диссертационной работы опубликовано 14 научно-технических статей, из них 4 в журнале, включенном в перечень ВАК РФ, 1 в журнале, включенном в перечень SCOPUS, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Работа содержит 106 страниц текста, 62 рисунков. Список литературы включает 125 наименований.

## 2. Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования; степень ее разработанности; цели и задачи; научная новизна; теоретическая и практическая значимость работы; методология и методы исследования; положения, выносимые на защиту; степень достоверности и апробация результатов; объем и структура работы.

**В первой главе** рассмотрены алгоритмы обнаружения малоразмерных объектов. В настоящее время создан широкий спектр алгоритмов обработки (фильтрации) изображений, однако большинство из них построены на «целевом» принципе — т.е. воспринимают фон как помеху.

Усовершенствование алгоритмов обработки ИФ предлагается проводить на основе фонового принципа извлечения информации. В фоновом принципе полезным сигналом считается излучение атмосферы. Выявленные изменения известных свойств пространственной структуры излучения атмосферы, позволит сделать вывод о присутствии излучения МО в этой области пространства.

Проведенный анализ моделей пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы в инфракрасном диапазоне волн, полученных ранее, позволил сделать вывод, что в основном исследования проводились в диапазонах 3-5 и 8-13 мкм. Изучение статистических моделей излучения атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм показало, что большинство существующих моделей разработаны при помощи космического зондирования. Статистические модели атмосферы в диапазоне, полученные при наблюдении с земли, практически отсутствуют.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать методику и измерительно-вычислительный комплекс для проведения экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм и получения статистических математических моделей пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы.

Таким образом, в первой главе была подтверждена актуальность цели и сформулированы научные задачи исследования, в результате решения которых будут разработаны статистические модели пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм.

**Во второй главе** решены две обозначенные научные задачи.

Во-первых, разработана методика проведения экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы.

В основе методики лежит получение двумерной картины распределения энергетической яркости атмосферы, при помощи одноэлементного приемника, путем растрового сканирования осью радиометра с угловым шагом

дискретизации  $\delta\epsilon$  и  $\delta\beta$  (рисунок 1), многократно, через равные промежутки времени, равные периоду сканирования раstra ИФ. Таким образом, формировались совокупности (пачки) ИФ (1, 2, ..., k), полученные для различных типов и баллов облачности.

На основе методики разработан измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) для проведения экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы. Основным элементом ИВК является радиометр на 1,5-2 мкм, состоящий из:

- объектива (телескоп Кассегрена);
- вращающегося обтюратора, приводимо в движение при помощи шагового двигателя;
- интерференционного фильтра, имеющего полосу пропускания 1,5-2 мкм;
- приёмника излучения (фоторезистор на основе (PbS));
- электронной части (предусилитель, масштабный усилитель, фильтр нижних частот, АЦП, микроконтроллер, флеш-память).

Для оценки параметров ИВК были проведены калибровочные работы для радиометра, итогом которых стали следующие характеристики ИВК:

- ширина поля зрения радиометра:  $20 \times 20'$ ;
- коэффициент передачи канала радиометра —  $5,324 \cdot 10^7 \frac{B \cdot \text{см}^2 \cdot \text{ср}}{Bm}$ ;
- пороговая чувствительность —  $6,411 \cdot 10^{-10} \frac{Bm}{\text{см}^2 \cdot \text{ср}}$ ;
- погрешность измерения энергетической яркости 10%;

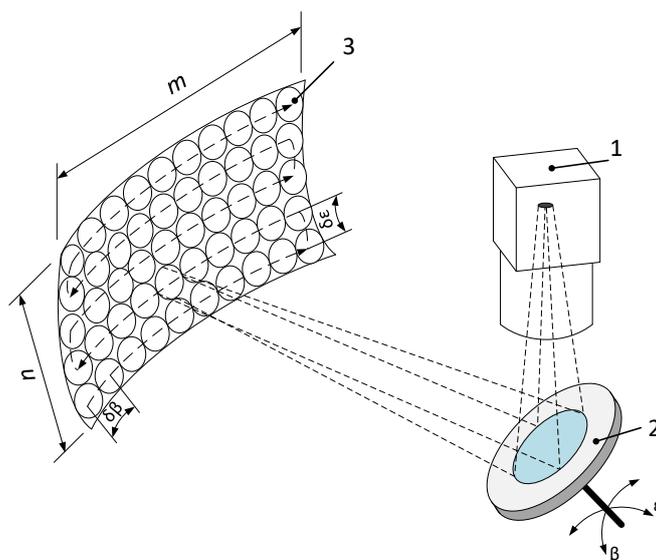


Рисунок 1 — Измерительно-вычислительный комплекс для экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы: 1 — радиометр; 2 — сканирующее зеркало; 3 — область сканирования

Сектор сканирования выбранного фрагмента атмосферы (растра) обеспечивался в пределах: по азимуту до  $40^\circ$ ; по углу места от  $10^\circ$  до  $50^\circ$ . Сканирующее зеркало обеспечивает проход одной строки кадра в выбранном фрагменте атмосферы за время 5 с. За это время регистрируется 80 значений энергетической яркости атмосферы через каждые  $30'$ . После завершения сканирования строки кадра подается сигнал на шаговый двигатель — зеркало меняет угол наклона на  $1^\circ$ , и сканирование повторяется в обратном направлении. Через заданное количество шагов (строк) шаговые двигатели возвращают сканирующее зеркало в исходное начальное положение, происходит запись отснятого кадра на съемный флэш-носитель, цикл повторяется и записывается следующий кадр.

Во-вторых, получены статистические модели, описывающие закономерности пространственной структуры флуктуаций энергетической яркости излучения неоднородностей атмосферы.

Для получения статистических моделей, обработка результатов измерений флуктуаций энергетической яркости атмосферы проводилась после окончания серии измерений, состоящей из создания пачки кадров (растров) примерно по 30 шт. Всего было исследовано 10 типов облачности в дневных и 3 типа — в ночных условиях (таблица 1).

Каждый кадр представляет собой ИФ в виде двумерного массива, каждый элемент которого содержит информацию об уровне энергетической яркости излучения атмосферы в выбранном направлении.

Массивы ИФ можно представить в виде матрицы, изображения в оттенках серого или в виде потенциального рельефа (рисунок 2), отражающих пространственную структуру излучения неоднородностей атмосферы.

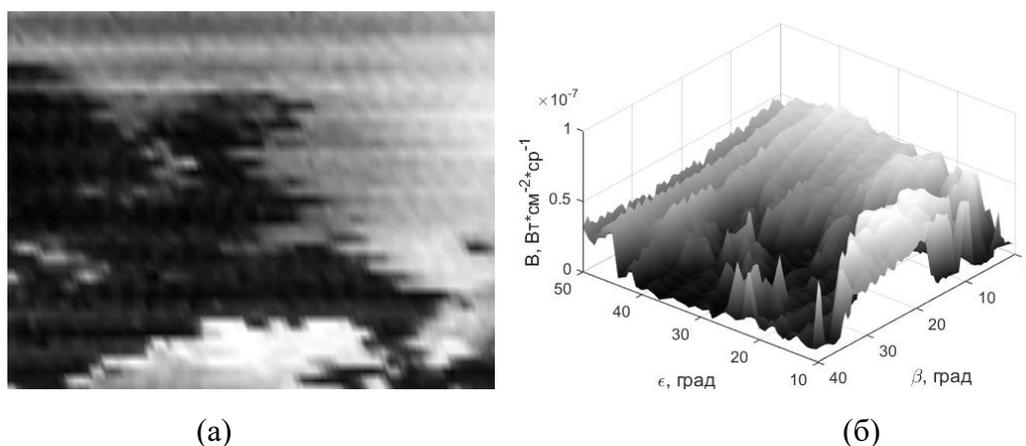


Рисунок 2— Виды представления ИФ— кучевая облачность (Cu): а) в оттенках серого; б) как потенциальный рельеф

Результаты обработки пачек кадров представлялись в виде матриц или потенциального рельефа распределения средних значений и дисперсий



крупномасштабные неоднородности более  $30^\circ$  (рисунок 3).

Анализ пространственных корреляционных связей для кучевой облачности (Cu) показал (рисунок 4), что размеры неоднородностей по углу места примерно одинаковы для всех баллов облачности и равны  $7-18^\circ$ . В азимутальной плоскости размеры неоднородностей также имеют схожие размеры и расположены в диапазоне  $5-15^\circ$ .

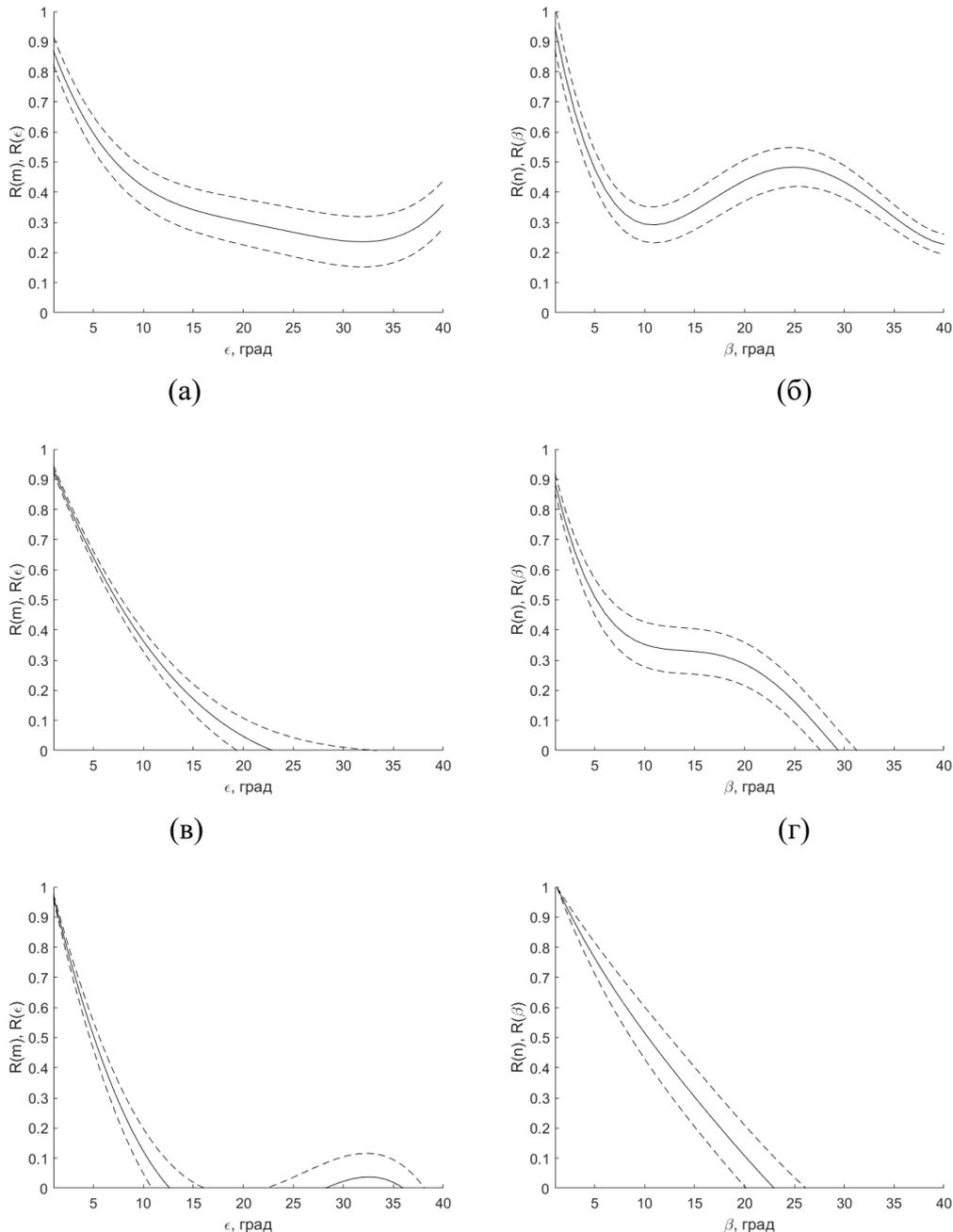


Рисунок 4 — Зависимости коэффициента пространственной корреляции ИФ от углового сдвига по строкам и по столбцам для кучевой облачности (Cu)  
а-б) 1 3 балла, в г) 4 6 балла, д е) 7 9 балла

Обобщенный анализ всех типов статистических моделей позволил выявить ряд свойств энергетической яркости атмосферы в спектральном диапазоне  $1,5-2$  мкм:

1. В статистических моделях, представленных в виде распределения средних значений и среднеквадратических отклонений флуктуаций энергетической яркости, имеют тенденцию увеличения интенсивности излучения с ростом угла места наблюдения и зависят от высоты образования, состава облаков (кристаллы льда или капли воды) и концентрации частиц (кристаллов льда или капель воды). Кроме этого, они позволяют разделить типы облачности по их яркости на два типа, имеющие мелкомасштабную структуру и крупномасштабные неоднородности.

2. Угловые размеры неоднородностей некоторых видов облачности ограничены величинами радиусов корреляции по строкам и столбцам (рисунок 4).

3. В пределах сегментов ИФ, ограниченных угловыми величинами, равными радиусам корреляции (рисунок 5), пространственная структура неоднородностей атмосферы по строкам и столбцам не подвержена резким изменениям, т.е. ее можно считать равномерной.

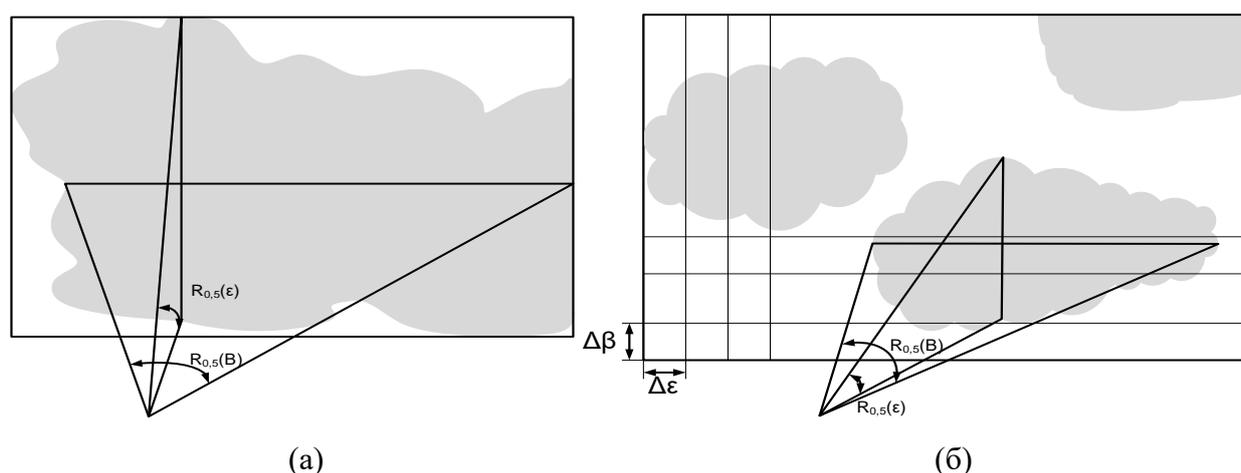


Рисунок 5 — Пространственная структура излучения атмосферного фона:

а) с крупномасштабными неоднородностями, б) с мелкомасштабными неоднородностями

Таким образом, получив статистические модели, отражающие закономерности пространственной структуры (угловые размеры неоднородностей) флуктуаций энергетической яркости излучения атмосферы в интервале 1,5-2 мкм, можно перейти ко второму этапу исследования — измерению пространственных энергетических характеристик излучения МО.

Таким образом, во второй главе решены первые две обозначенные научные задачи:

- разработана новая методика проведения экспериментальных исследований и новый измерительно-вычислительный комплекс для проведения экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм, — тем самым решена вторая научная

задача. ИВК обладает научной новизной и формируют **первое** положение, выносимое на защиту;

- получены новые статистические модели, описывающие закономерности пространственной структуры флуктуаций энергетической яркости излучения неоднородностей атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм, — тем самым решена третья научная задача. Полученные модели являются новыми знаниями и формируют **второе** положение, выносимое на защиту.

**В третьей главе** решены четыре обозначенных научных задач.

Во-первых, разработана методика проведения экспериментальных исследований пространственных характеристик излучения МО. Для снятия индикатрисы МО закрепляют в разработанное вращающееся устройство с двумя степенями свободы (рисунок 6). В качестве МО в работе использовался БВС мини-класса с размахом крыльев 2 м.

На основе снятых данных построены статистические модели, описывающие пространственные характеристики излучения БВС (индикатрисы излучения). Сила излучения БВС  $J_{\text{ц}}(\varepsilon, \beta)$  по результатам наблюдаемой энергетической яркости рассчитана по формуле

$$J_{\text{ц}}(\varepsilon, \beta) = \frac{B_{\text{ц}}(\varepsilon, \beta) \cdot S_{\text{пр}}(\varepsilon, \beta) \cdot R^2}{\tau_a \cdot S_{\text{об}}}, \quad (4)$$

где  $B_{\text{ц}}(\varepsilon, \beta)$  — энергетическая яркость БВС;

$S_{\text{пр}}(\varepsilon, \beta)$  — площадь проекции БВС на картинную плоскость, перпендикулярную направлению визирования цели, при различных ракурсах наблюдения;

$R$  — расстояние до БВС;

$\tau_a$  — коэффициент пропускания атмосферы для метеоситуации, соответствующей условиям измерения;

$S_{\text{об}}$  — площадь входной апертуры радиометра.

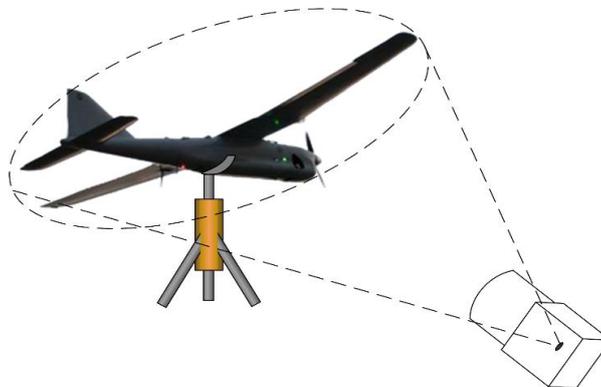


Рисунок 6 — Вращающееся устройство с двумя степенями свободы

Для реализации процедуры вычислений определены коэффициенты

перекрытия фона и площади проекции на картинную плоскость МО как функций угловых координат  $\varepsilon$  и  $\beta$ . Поскольку каждая модель МО имеет свою конфигурацию, эту задачу следует решать для каждого случая отдельно.

В результате проведенных измерений при помощи разработанного ИВК были построены индикатрисы излучения для БВС мини-класса с размахом крыльев 2 м (рисунок 7).

Во-вторых, разработан метод и алгоритм обработки ИФ, позволяющий выделить изображение МО на фоне атмосферы, в основе которого лежит фоновый принцип получения информации.

При реализации фонового принципа, систему обнаружения согласовывают со свойствами закономерностей пространственной структуры излучения атмосферы, что значительно проще, так как фон является объектом, медленно изменяющимся в пространстве и во времени.

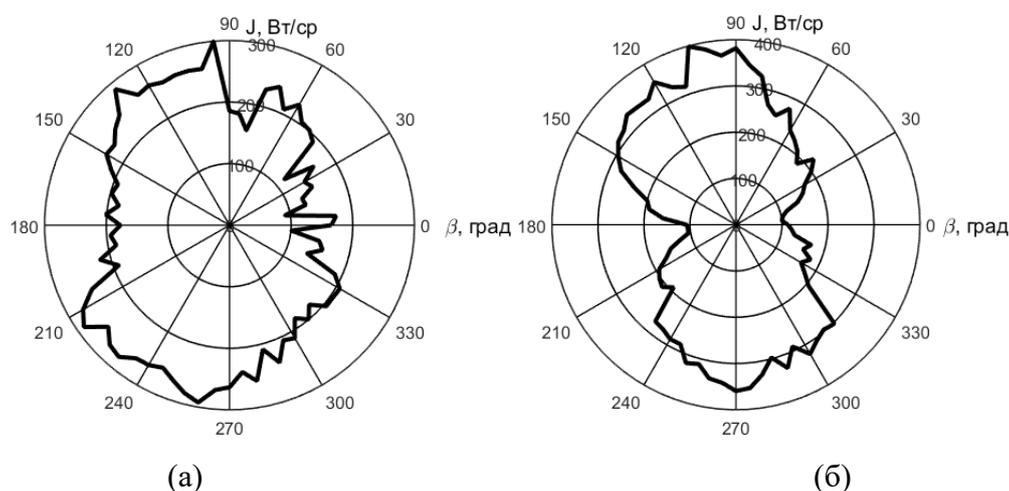


Рисунок 7 — Семейство индикатрис БВС, при различных углах визирования:  
а)  $\varepsilon = 5^\circ$ , б)  $\varepsilon = 25^\circ$

Исходя из этого, был разработан контрастный метод, позволяющий выделить изображение МО на небольших участках кадра ИФ. Для этого кадр ИФ разбивался на сегменты, равные угловым размерам неоднородностей, соответствующему типу облачности. Для каждого сегмента вычисляется математическое ожидание  $\mu$ . Далее для каждого элемента выбранного сегмента матрицы ИФ вычисляется новое значение яркости по формуле

$$Q_{n,m} = \left( \frac{B_{n,m}}{\mu^2} \right) \cdot B_{n,m},$$

где  $B_{n,m}$  — значение яркости элемента кадра.

После проведения нескольких итераций, величины элементов сегмента не содержащих изображение МО стремятся к нулю, выделяя те элементы, в которых предположительно может находиться искомое изображение МО

(рисунок 8).

В-третьих, проведено имитационное математическое моделирование процесса обнаружения, направленное на оценку показателей эффективности обнаружения МО на фоне атмосферы при помощи ПОЭС в диапазоне 1,5-2 мкм.

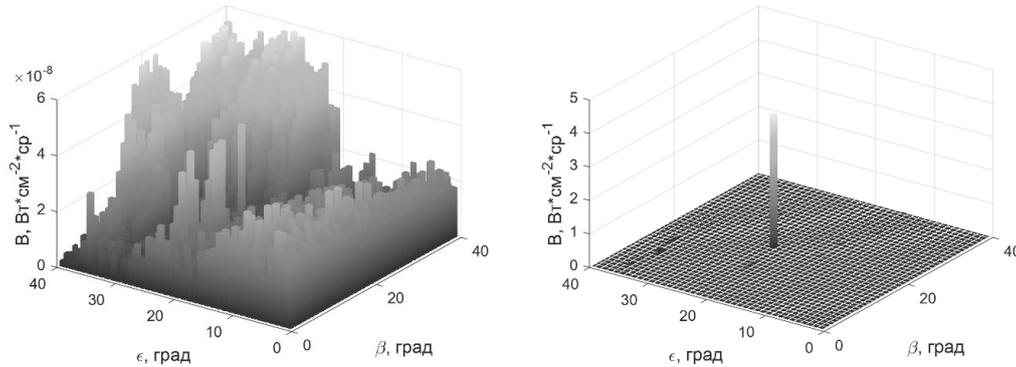


Рисунок 8 — Результаты применения контрастного метода выделения МО на фоне кучевой облачности (Cu) 4-6 балла

На основе полученных данных рассчитана вероятность обнаружения БВС на фоне атмосферы в зависимости от дальности до наблюдателя (рисунок 9).

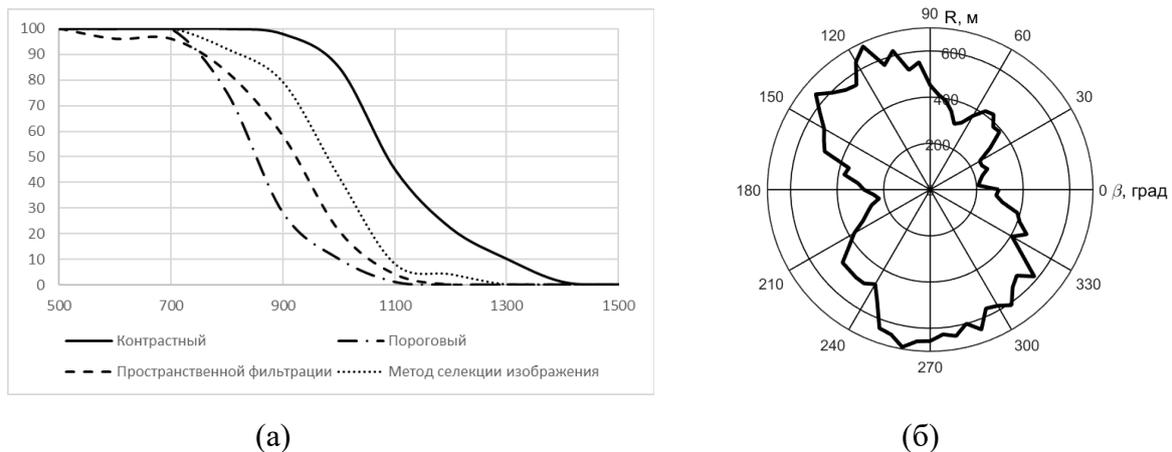


Рисунок 9 — Распределение вероятностей обнаружения БВС в зависимости от дальности на фоне ясного неба (а) и результаты расчета дальности обнаружения БВС (б)

В результате математического моделирования установлено, что алгоритм обработки изображения с использованием контрастного метода обнаружения МО на фоне атмосферы работоспособен.

В-четвертых, выработаны рекомендации по совершенствованию существующих и разработке новых алгоритмов обработки ИФ, повышающих эффективность обнаружения при помощи ПОЭС работающих в диапазоне 1,5-2 мкм:

1. Усовершенствование алгоритмов обработки ИФ предлагается проводить на основе фонового принципа извлечения информации.
2. Статистические модели распределения средних значений и СКО флук-

туаций энергетической яркости атмосферы позволяют разделить типы облачности на две группы, имеющие мелкомасштабную структуру и крупномасштабные неоднородности.

3. Угловые размеры неоднородностей видов облачных полей согласовываются с природными (пространственными) размерами неоднородностей, которые определяются по величинам пространственного радиуса корреляции ИФ. Исходя из этого, предполагается возможность разделения по ширине пространственных спектров излучения МО и протяженных неоднородностей атмосферы.

4. Для уменьшения времени поиска ПОЭС необходимо оснастить широкоугольной системой кругового обзора.

5. Анализ измерений показал, что излучение в диапазоне 1,5-2 мкм в ночное время практически отсутствует, поэтому обнаружение МО возможно только в дневное время.

Таким образом в третьей главе решены обозначенные научные задачи:

- разработана методика проведения экспериментальных исследований и построены статистические модели, описывающие пространственные характеристики излучения МО (индикатрисы излучения).

- разработан метод и алгоритм обработки ИФ, позволяющий выделить изображение МО на фоне атмосферы, в основе которого лежит фоновый принцип получения информации. Контрастный метод обладает научной новизной и формируют **третье** положение, выносимое на защиту;

- проведено имитационное математическое моделирование процесса обнаружения МО на фоне атмосферы, направленное на оценку эффективности обнаружения ПОЭС, работающих в диапазоне 1,5-2 мкм результаты которого подтвердили его работоспособность и эффективность контрастного алгоритма увеличив дальности обнаружения с его помощью на 10% по сравнению с пороговым;

- выработаны рекомендации по совершенствованию существующих и разработки новых алгоритмов обработки ИФ, повышающих эффективность обнаружения МО при помощи ПОЭС, работающих в диапазоне 1,5-2 мкм.

### **3. Заключение**

Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Разработаны методика и ИВК, предназначенные для проведения экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы.

2. Построены статистические модели, описывающие закономерности пространственной структуры флуктуаций энергетической яркости излучения

неоднородностей атмосферы. В полученных статистических моделях распределения средних значений и СКО флуктуаций энергетической яркости атмосферы выявлена тенденция увеличения интенсивности излучения с ростом угла места наблюдения и зависимость от высоты образования, состава облаков (кристаллы льда или капли воды) и концентрации частиц (кристаллов льда или капель воды).

3. Анализ статистических моделей показал, что облачность можно разделить по ее яркости на два типа: имеющую мелкомасштабную структуру и крупномасштабные неоднородности. При помощи корреляционного анализа были определены размеры неоднородностей. Экспериментальные исследования временной и пространственно-временной структуры позволят узнать «время жизни» неоднородностей, что позволит рассчитать необходимое время обновления корреляционных связей для повышения эффективности алгоритма поиска МО при помощи ПОЭС, работающих в диапазоне 1,5-2 мкм.

4. Разработана методика проведения экспериментальных исследований пространственных характеристик излучения МО.

5. Построены статистические модели, описывающие пространственные характеристики БВС (индикатриса излучения).

6. Разработаны контрастный метод и одноименный алгоритм обработки ИФ, позволяющие выделить изображение МО на фоне атмосферы, в основе которых лежит фоновый принцип получения информации.

7. Проведено имитационное математическое моделирование процесса обнаружения МО на фоне атмосферы, результаты которого подтвердили работоспособность и эффективность контрастного алгоритма, увеличив дальности обнаружения с его помощью на 10% по сравнению с рассмотренными методами.

8. Выработаны рекомендации по совершенствованию существующих и разработке новых алгоритмов обработки ИФ, повышающих эффективность обнаружения при помощи ПОЭС, работающих в диапазоне 1,5-2 мкм.

Это позволяет считать, что поставленная в работе цель разработки статистических моделей пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм, необходимых для выработки рекомендаций по совершенствованию алгоритмов обработки изображений фона, повышающих эффективность обнаружения малоразмерных объектов при помощи пассивных оптико-электронных систем, работающих в диапазоне 1,5-2 мкм, достигнута.

### Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

**Мищенко А.М., Рачковский С.С., Смолин В.А., Якименко И.В.**

Экспериментальные исследования пространственного распределения собственного излучения атмосферного фона в инфракрасном диапазоне волн / М.: Радиотехника, 2017. №2 С. 119-125.

**Смолин В.А.** Исследование возможности обнаружения беспилотного летательного аппарата на атмосферном фоне в ближнем инфракрасном диапазоне / М.: Радиотехника, 2017. №10 С. 175-183.

**Мищенко А.М., Рачковский С.С., Смолин В.А., Якименко И.В.**

Результаты экспериментальных исследований пространственной структуры излучения атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм / М.: Светотехника, 2018. №1 С. 40-44.

**Якименко И.В., Мищенко А.М., Смолин В.А.** Анализ информативности рабочих спектральных диапазонов оптико-электронных систем обнаружения беспилотных летательных аппаратов / СПб.: Известия Российской Академии Ракетных и Артиллерийских Наук, 2018. Выпуск 103, №3 С. 90-92

**Mishchenko A.M., Rachkovsky S.S., Smolin V.A., Yakimenko I.V.** Results of spatial structure of atmosphere radiation in a spectral range (1.5-2)  $\mu\text{m}$  research // Light & Engineering, 2018. Volume 26, number 3, pp. 7-13.

Костикова Т.А., Смолин В.А., Рассказа Д.С., Мищенко А.М. Схема предварительного усиления для исследования собственного излучения облачной атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм / Сборник трудов VI международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации-2016». Смоленск: Издательство «Универсум», филиал НИУ МЭИ в г. Смоленске, 2016. Т.2, С. 182-185.

**Смолин В.А., Шпаковская Д.С., Мищенко А.М., Рачковский С.С.**

Измерительно вычислительный комплекс для исследования собственного излучения облачной атмосферы в диапазоне 8-13 мкм / Сборник трудов VI международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации-2016». Смоленск: Издательство «Универсум», филиал НИУ МЭИ в г. Смоленске, 2016. Т.2, С. 185-189

**Рассказа Д.С., Смолин В.А.** Исследования пространственного

распределения излучения атмосферного фона в инфракрасном диапазоне волн / Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/5386/5386.pdf>, свободный

Костикова Т.А., Рассказа Д.С., Смолин В.А. Схема для исследования собственного излучения облачной атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм / Сборник: «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать третья Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов» — Москва: Издательский дом МЭИ,

т.1, 2017. — 176 с.

Рассказа Д.С., Смолин В.А., Костикова Т.А., Рачковский С.С. Разработка измерительно-вычислительного комплекса для исследования собственного излучения облачной атмосферы / Сборник: XIV международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «информационные технологии, энергетика и экономика» — Смоленск, 2017. — 284 с.

Смолин В.А., Рассказа Д.С. Разработка ИВК для исследования собственного излучения облачной атмосферы / Сборник материалов научного семинара по теме «Современные достижения радиоэлектроники» — Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2017. — 67-70 с.

Смолин В.А., Рассказа Д.С. Экспериментальные исследования пространственного распределения излучения атмосферного фона в диапазоне волн 1,5-2 мкм / Материалы XXV военно-научной конференции. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2017.

Смолин В.А., Рассказа Д.С. Разработка схемы измерения излучения объектов в диапазоне длин волн 1,5-2 мкм / Сборник трудов VII международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации-2017». Смоленск: Издательство «Универсум», филиал НИУ МЭИ в г. Смоленске, 2017. Т.2, С.201-205.

Смолин В.А., Якименко И.В., Мищенко А.М., Рассказа Д.С. Программа управления измерительно-вычислительным комплексом для исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616553. ФИПС от 1.06.2018.

Якименко И.В., Якименко Ю.И., Жендарев М.В., Найдёнов Е.В., Мищенко А.М., Смолин В.А., Рассказа Д.С., Астахов С.П., Корниенко К.Ю., Рябинина Е.А. Статистические модели пространственной структуры энергетической яркости облачности различных типов в диапазоне 1,5-2 мкм / Сборник тезисов Международного симпозиума "Атмосферная радиация и динамика" (МСАРД-2019) (25–27 июня 2019), Санкт-Петербург, 2019 г. — с. 219–221.