

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.379.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10 февраля 2023 г. №2
о присуждении Расторгуеву Андрею Алексеевичу, гражданину Российской
Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Расчёт характеристик бортового оптического гиперспектрометра на основе схемы Оффнера» по специальности 1.3.6. Оптика принята к защите 18 ноября 2022 г. (протокол заседания № 17) диссертационным советом 24.2.379.01, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34) приказом Минобрнауки России № 105/нк от 11 апреля 2012 г.; полномочия подтверждены приказом Минобрнауки России от 03.06.2021 № 561/нк, с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 13.12.2022 № 1750/нк.

Соискатель Расторгуев Андрей Алексеевич, «19» апреля 1984 года рождения. В 2006 году соискатель окончил государственное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет» по специальности физика, специализация оптика и спектроскопия, в 2021 г. соискатель освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, работает в должности начальника сектора в отделе 1133 (научно-производственный отдел целевой эффективности и подтверждения тактико-технических характеристик космических комплексов и космических систем, гиперспектральных комплексов, обработки и взаимодействия с потребителями информации дистанционного зондирования Земли) акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс».

Диссертация выполнена на кафедре наноинженерии федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Харитонов Сергей Иванович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», профессор кафедры наноинженерии.

Официальные оппоненты: **Грейсух Григорий Исаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», заведующий кафедрой «Физика и химия»; **Осипов Олег Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», заведующий кафедрой «Высшая математика» – дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. Н.П. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), г. Москва, в своём **положительном отзыве**, подписанном старшим научным сотрудником лабораторией физико-химической кинетики, доцентом, доктором физико-математических наук Чернышовым А.К. и директором СФ ФИАН, председателем ученого совета СФ ФИАН, доктором физико-математических наук Аязовым В.Н., утверждённом директором ФИАН Колачевским Н.Н., указала, что диссертация соответствует специальности 1.3.6. Оптика. Диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяет требованиям ВАК России, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 13 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ. Суммарный объём опубликованного материала в соавторстве по диссертации составляет 9,82 печатных листа, в том числе 4,52 печатных листа принадлежит соискателю. Из материалов совместных публикаций лично соискателю принадлежат: математическая модель космического гиперспектрометра, позволяющая формировать модельное гиперспектральное изображение с учётом входных данных по параметрам предметной плоскости, оптико-электронной части гиперспектрометра,

расчётного вектора скорости движения изображения и позволяющая учесть: изменения пространственного и спектрального разрешения, изменения уровня освещённости в оптическом спектре, возможные ошибки идентификации спектров объектов при работе на борту космического аппарата; метод расчёта функции рассеяния точки гиперспектрометра по схеме Оффнера в приближении скалярной волновой теории и результаты расчёта структурных передаточных характеристик оптической системы гиперспектрометра; результаты применения разработанной модели для анализа изображения в плоскости фотоприёмника и определения погрешностей юстировки оптической схемы спектрометра. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. **Расторгуев, А.А.** Моделирование распределения освещённости в плоскости регистратора космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / **А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский** // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41. – № 3. – С. 399-405 (научная статья 0,82 / 0,27 у. п. л.).

2. **Расторгуев, А.А.** Моделирование допустимых погрешностей расположения оптических элементов для космического гиперспектрометра, проектируемого по схеме Оффнера / **А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский** // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42. – № 3. – С. 424-431 (научная статья 0,94 / 0,31 у. п. л.).

3. **Rastorguev, A.A.** Estimation of permissible technological errors in the arrangement of optical elements for the hyperspectrometer according to the Offner's scheme (=Оценка допустимых технологических погрешностей расположения оптических элементов гиперспектрометра по схеме Оффнера) / **A.A. Rastorguev, S.I. Kharitinov, N. L. Kazanskiy** // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096. – P. 1-8 (научная статья 0,93 / 0,31 у. п. л.).

4. **Rastorguev, A.A.** Analytical calculation of diffraction order intensities for a hyperspectrometer (=Аналитический расчёт интенсивностей дифракционных порядков для гиперспектрометра) / **A.A. Rastorguev, S.I. Kharitinov** // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368. – P. 1-6 (научная статья 0,7 / 0,35 у. п. л.).

5. **Расторгуев, А.А.** Моделирование формирования изображения космическим гиперспектрометром по схеме Оффнера / **А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский** // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44. – № 1. – С. 12-21 (научная статья 1,18 / 0,39 у. п. л.).

6. **Расторгуев, А.А.** Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в приближении волновой оптики / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46. – № 1. – С. 56-64 (научная статья 1,05 / 0,35 у. п. л.).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от следующих организаций и специалистов:

1. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологии», подписан профессором кафедры телекоммуникационных систем УГАТУ, директором Института инфокоммуникационных технологий, д.т.н., профессором Султановым Альбертом Хановичем. Замечания: 1) В автореферате диссертации не показано, как соотносятся, полученные автором модельные изображения с изображениями, полученными гиперспектральной аппаратурой, работающей на борту реального космического аппарата; 2) В автореферате диссертации почему-то не приведено сравнение результатов расчёта положения изображения в спектрометре по формулам (6) - (10) с результатами, полученными методом трассировки лучей.

2. ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», подписан профессором высшей школы гидротехнического и энергетического строительства ФГАОУ ПО «СПбПУ», д.т.н., доцентом Владимиром Львовичем Баденко. Замечания: 1) В материалах автореферата отсутствуют характеристики гиперспектральных изображений, полученных с использованием различных параметров углового движения, углов ориентации, погрешностей движения гиперспектрометра; 2) из описания четвёртого раздела работы в автореферате остаётся неясным какую дифракционную решётку предпочтительно использовать в гиперспектрометр – с длиной волны блеска 555 нм или 640 нм; 3) в положениях, выносимых на защиту указано, что в предложенной автором модели учитывается вращение Земли: требуется уточнить в каком именно выражении оно учитывается и насколько велико влияние этого параметра; 4) на каком именно гиперспектральном сенсоре проведена апробация предложенной модели и каковы результаты экспериментальной проверки.

3. ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», подписан первым заместителем директора НИИ обработки аэрокосмических изображений «Фотон» РГРТУ, д.т.н., профессором Кузнецовым Алексеем Евгеньевичем. Замечания: 1) Не ясно, можно ли использовать предложенную автором модель при моделировании других гиперспектрометров, например, авиационного базирования; 2) Из текста автореферата не ясно как на качестве изображения отразится моделирование совместного действия полученных в ходе расчетов условных допусков на смещения и развороты оптических элементов спектрометра; 3) В автореферате

отсутствуют сведения о использовании полученных результатов, например, в учебном процессе кафедры.

4. ФГБУН «Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук», подписан главным научным сотрудником Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН, д.ф.-м.н. Петровым Николаем Ивановичем. Замечания: 1) На мой взгляд, представленные в четвёртой главе результаты моделирования было бы интересно дополнить сравнением с реальным гиперспектральным изображением, полученным из космоса.

5. ПАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева", подписан начальником сектора оптических измерений и исследований, к.т.н. Ли Александром Викторовичем. Замечания: 1) Исходя из каких предпосылок для моделирования была выбрана, приведённая в автореферате, оптическая схема гиперспектрометра? 2) Насколько возможно применить разработанные математические модели для расчёта оптических систем с другими конструктивными параметрами, трёхзеркальной системы Оффнера, других схем спектрометров с дифракционной решёткой? 3) Неясно почему в оптической схеме спектрометра используется дифракционная решётка с частотой штрихов 30 лин/мм, ведь если использовать решётку с более высокой частотой штрихов, то можно улучшить спектральное разрешение прибора.

Все отзывы **положительные**. В отзывах отмечено, что указанные недостатки не снижают научной и практической значимости работы и не влияют на общую **положительную** оценку диссертации. Во всех отзывах отмечено, что диссертация соответствует требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и сделано заключение о возможности присуждения Расторгуеву А.А. учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Выбор Грейсуха Г.И. в качестве официального оппонента по диссертации обосновывается тем, что он является известным специалистом в области расчёта оптических систем, оптоэлектроники, дифракционной и градиентной оптики.

Выбор Осипова О.В. в качестве официального оппонента по диссертации обосновывается тем, что он является известным специалистом в области физики волновых процессов, радиофизики и электродинамики СВЧ.

Выбор ФГБУН «Физический институт им. Н.П. Лебедева Российской академии наук» (ФИАН) в качестве ведущей организации обосновывается достижениями ее специалистов в области комплексных исследований фундаментального, поискового и прикладного характера, в области оптики и спектроскопии.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложена и исследована математическая модель процесса формирования изображения космическим гиперспектрометром, основанном на схеме Оффнера, отличающаяся учётом совокупного влияния следующих характерных факторов: скорость поступательного и углового движения по орбите; параметры орбиты; вращение Земли; оптические характеристики атмосферы Земли; освещённость поверхности Земли; погрешности юстировки оптической схемы гиперспектрометра; оптические параметры объектива; ширину щелевой диафрагмы; период и форму поверхности отражающей дифракционной решётки спектрометра, а также включающая динамическую модель оптоэлектронного тракта светочувствительной матрицы. Предложенная математическая модель позволила учесть при формировании изображения: возможные изменения пространственного и спектрального разрешения при работе на борту космического аппарата; изменение уровня освещённости на краях оптического спектра (в центре поля зрения) и в центральной области спектра (для края поля зрения) по сравнению с известным аналитическим подходом к расчёту освещённости; возможные ошибки идентификации и искажения в спектрах объектов;

предложен метод расчёта передаточных характеристик (функции рассеяния точки, частотно-контрастной характеристики) оптической системы гиперспектрометра по схеме Оффнера, заключающийся в замене последовательного вычисления дифракционного интеграла по входным апертурам всех оптических элементов одним интегрированием по поверхности первого зеркала спектрометра. Наличие дифракционной решетки на поверхности зеркала учитывается в рамках локальной асимптотической аппроксимации решетки на криволинейной поверхности плоской решеткой в касательной плоскости. **Получено** аналитическое выражение для расчёта коэффициентов интенсивности порядков дифракции решётки на криволинейной поверхности с профилем, близким к треугольному при произвольном падении света. Для предельного случая **установлено** локальное увеличение контраста на длине волны 500 нм для пространственных частот от 200 до 300 мм^{-1} , локальное увеличение контраста на длине волны 700 нм для пространственных частот от 150 до 200 мм^{-1} , локальное увеличение контраста на длине волны 900 нм для пространственных частот от 100 до 150 мм^{-1} в сагиттальном направлении плоскости изображения. Значения контраста на длинах волн 500 нм, 700 нм и 900 нм составили 0,256, 0,352, 0,446, что по отношению к значениям контраста на этих длинах волн на частотно-контрастной характеристике идеальной оптической системы с кольцевой апертурой составляет 102,4%, 146,6%, 176,3% соответственно;

получены результаты численного анализа влияния погрешностей юстировки оптической схемы Оффнера на параметры формируемого изображения. **Показано**, что при смещении от -12 до 14 мкм по оси OZ, наклонах до 34" вокруг осей OX, OY для зеркала спектрометра с радиусом -159,6 мм и при смещении от -30 до 25 мкм по оси OZ, наклонах до 135" вокруг осей OX, OY, до 89" вокруг оси OZ для зеркала спектрометра с радиусом -80,6 мм ширина функции рассеяния точки не превышает характерный размер светочувствительного элемента в 11–12 мкм для современных светочувствительных матриц.

Теоретическая значимость исследования обосновывается тем, что: **разработана** новая математическая модель космического гиперспектрометра по схеме Оффнера, основанная на скалярной теории дифракции, а также **исследовано** влияние различных факторов дистанционного зондирования на гиперспектральное изображение. Модель может быть **использована** при разработке оптимальных конфигураций широкого класса оптических спектральных приборов, устанавливаемых на беспилотные летательные аппараты, авиационные летательные аппараты, космические аппараты (включая наноспутники формата CubeSat), а также при выборе соответствующих конструкционных материалов и технических решений, формулировании рекомендаций по эксплуатации приборов.

исследованы в рамках скалярной теории дифракции предельные структурные передаточные характеристики оптической системы гиперспектрометра и **показано**, что использование зеркально-линзового объектива при фиксированной ширине щели спектрометра позволяет получать качественное изображение только в заданном диапазоне длин волн. Полученные результаты исследования могут найти применение при проектировании широкого класса оптических спектральных приборов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

определено, что при 11 мкм входной щели и характерных геометрических размерах гиперспектрометра спектральное разрешение в предельном случае может достигать 6,20 нм, 6,53 нм, 7,11 нм на длинах волн 500 нм, 700 нм и 900 нм соответственно, при этом **продемонстрировано**, что гиперспектрометр позволяет формировать качественное изображение, начиная с условий малой освещённости поверхности Земли (при углах падения солнечных лучей от 10° и более) в видимом диапазоне длин волн;

определено, что при смещении от -12 до 14 мкм по оси OZ зеркала спектрометра с радиусом -159,6 мм и при смещении от -30 до 25 мкм по оси OZ для зеркала спектрометра с радиусом -80,6 мм ширина функции рассеяния

точки и уровень геометрических искажений не превышает характерный размер светочувствительного элемента в 11–12 мкм для современных матриц.

Оценка достоверности результатов исследования.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, **подтверждается** корректностью математических операций, соблюдением логической последовательности протекания процессов функционирования гиперспектрометра в условиях орбитального полёта; совпадением и сходимостью с результатами решения тестовых задач при помощи аналитических моделей, апробированных методов и аналитических соотношений; проверками на изображениях уровней яркостей и форм спектральных характеристик (с учётом искажающих факторов); проверками адекватности моделей и результатов расчётов. Достоверность результатов расчёта функции рассеяния точки в приближении волновой оптики дополнительно **подтверждаются** согласованностью: результатов расчётов светового поля после дифракции на щели с результатами другого исследования; ограничений пространственных частот в сагиттальном направлении с теорией спектральных приборов; форм функции рассеяния точки с результатами моделирования в приближении геометрической оптики и экспериментальными результатами другого исследования.

Личный вклад соискателя. Все результаты в диссертационной работе, были получены лично соискателем. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем.

Полученные в диссертационной работе результаты представляют интерес при проектировании космической гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования, выборе соответствующих конструкционных материалов и технических решений, формулировании рекомендаций по эксплуатации аппаратуры в условиях космического полёта.

Рекомендуется использование результатов диссертации: при разработке космической гиперспектральной аппаратуры оффнеровского типа на предприятиях АО «РКЦ «Прогресс», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»; в образовательной деятельности ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, в учебном процессе ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и их внедрение в учебный процесс других вузов, осуществляющих подготовку специалистов в области оптики, обработки гиперспектральных спутниковых данных.

Результаты исследования нашли практическое применение при выполнении грантов РФФИ (16-29-11744 и 16-29-09528), гранта РНФ (№ 20-69-47110).

В диссертации отсутствует заимствованный материал без ссылки на автора или источник заимствования, результаты научных работ, выполненные соискателем учёной степени в соавторстве, без ссылок на соавторов.

В ходе защиты диссертации не были высказаны критические замечания. Соискатель Расторгуев А.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы.

Диссертация Расторгуева Андрея Алексеевича является законченной научно-квалификационной работой, отвечает критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пп. 9–11, 13, 14 Положения о присуждении учёных степеней в ред. от 26.01.2023).

На заседании 10 февраля 2023 г. диссертационный совет за решение научной задачи разработки математической модели космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, позволяющей проводить углублённые исследования влияния различных факторов на гиперспектральное изображение и его качество, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, принял решение присудить Расторгуеву А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета 24.2.379.01
академик РАН, д.т.н., профессор

В. А. Сойфер

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.2.379.01
к.ф.-м.н., доцент

А. М. Телегин

10.02.2023

