

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Канева Федора Юрьевича на диссертацию Шишакова Константина Валентиновича «Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении и приборостроении), 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике).

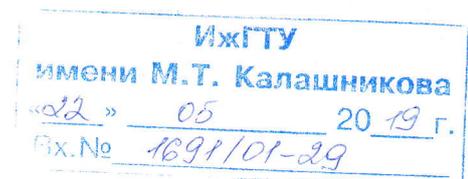
Актуальность темы исследования

Разработка многосистемных комплексов наведения оптических телескопов является составной частью создания современных больших оптических телескопов с размерами до 10 и более метров. Деформируемость их больших и облегченных конструкций не позволяет достичь требуемого оптического качества работы без использования большого числа активных подсистем управления. Недостаточная развитость этого направления в России привела к отсутствию отечественных сверхбольших оптических телескопов (с диаметрами более 7 метров), в то время, когда за рубежом разрабатываются уже проекты наземных сверхбольших оптических телескопов с диаметрами до 30 и более метров.

Актуальность разработки таких сверхбольших наземных оптических телескопов, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн, определяется современными потребностями развития фундаментальной науки по устройству дальнего космоса.

Необходимость проведения научных наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне длин волн актуализирует также разработку проектов по созданию больших космических телескопов, являющихся еще более сложными системами автоматизированных наблюдений.

Не менее актуальными для России являются разработки и создание оптических телескопов средних размеров (с диаметрами зеркал около 3 метров) для контроля и наблюдений за ближним околоземным пространством, отличающихся от астрономических телескопов более высокими скоростями сопровождения наблюдаемых объектов в околоземном пространстве.



Каждое из перечисленных направлений развития современного крупногабаритного телескопостроения опирается на разработку и создание своих единичных проектов, в которых применяются уникальные инженерные решения.

Среди них, с точки зрения многосистемного наведения больших наземных телескопов, можно выделить разные варианты реализации: многоконтурных систем управления электроприводами углового слежения всем телескопом, корректирующих каналов слежения вторичными и другими зеркалами в оптическом тракте, низкочастотных систем пространственно распределенной активной компенсации эксплуатационных аберраций оптической схемы (систем активной оптики), высокочастотных систем пространственно-временной коррекции искажений волнового фронта в турбулентной атмосфере (систем адаптивной оптики), а также других вспомогательных управляемых элементов, устройств и систем.

А с точки зрения многосистемного наведения больших космических телескопов здесь можно выделить разные варианты реализации: высокоточных систем пространственной ориентации космического аппарата, корректирующих каналов слежения вторичными или другими зеркалами в оптическом тракте, низкочастотных систем активной оптики и других вспомогательных управляемых элементов, устройств и систем.

Высокая стоимость таких уникальных проектов по созданию больших оптических телескопов (наземных и космических), измеряемая сотнями миллионов долларов, повышает потребность в создании «цифровых двойников» (генеральных имитационных моделей) с целью прогнозирования и достижения проектной эффективности, а также понижения стоимости прохождения всех этапов жизненного цикла соответствующих телескопов.

Поэтому с точки зрения сопровождения соответствующих этапов жизненного цикла больших оптических телескопов развитие теоретических основ, методов, моделей и алгоритмов для разработок многосистемных комплексов их наведения является несомненно актуальным. Она подчеркивается и современные тенденциями расширения состава комплексов наведения с одновременными требованиями повышения эффективности активных и адаптивных систем пространственно-временного управления, увеличения размерностей распределенных обратных связей в активных и адаптивных оптических системах, расширения возможностей управления, усложнения контуров и алгоритмов управления в комплексах наведения, а также обеспечения эффективной интеграции систем управления в оптико-механические комплексы наведения не только отдельных больших телескопов, но и их групп (интерферометров, оптических систем с разнесенными апертурами и других).

Таким образом, проблема повышения качественных и эксплуатационных показателей функционирования разрабатываемых и создаваемых уникальных сверхбольших оптических телескопов (наземных и орбитальных) за счет увеличения интегрального потенциала от улучшения характеристик и взаимодействия модульных систем управления, объединяющихся в их настраиваемые многосистемные комплексы наведения, является актуальной проблемой, имеющей важное хозяйственное значение для отечественного крупнобаритного телескопостроения.

С учетом того, что в настоящее время отсутствует цельная, системно связанная теоретическая база для решения указанной проблемы, тема диссертационной работы Шишакова К.В. тоже является актуальной, а ее научные и практические результаты имеют большое значение для проведения научных и прикладных исследований во многих предметных областях.

Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы – 327 страниц, включая 71 рисунок.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования и степень ее разработанности. Изложены цель диссертационной работы, объект, предмет и задачи исследования, отмечено соответствие темы диссертации требованиям паспорта специальности ВАК. Рассмотрены вопросы научной новизны и практической значимости диссертационной работы, достоверности и обоснованности полученных в диссертационной работе результатов. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Содержание первой главы отвечает требованию проведения системного рассмотрения и сравнительного анализа характеристик современных эксплуатируемых и разрабатываемых больших оптических телескопов (наземных и космических), имеющих многосистемные комплексы наведения. В ней описываются параметры входящих в них модульных систем управления для конкретных конструктивных реализаций уникальных проектов телескопов. В результате систематизированы современные требования и достигнутые параметры систем наведения больших оптических телескопов, а также определены основные принципы синтеза таких комплексов наведения. Глава завершается постановкой проблемы исследования и определением направлений ее решения в соответствии с поставленными задачами.

Вторая глава посвящена разработке методологии системного анализа многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов. В ней предложено проводить синтез многосистемных комплексов наведения на основе пространственно-временной частотной декомпозиции условий функционирования телескопов. Это позволило сформулировать и детализировать постановку задач системного анализа, синтеза, оптимизации и управления модульными системами в составе комплексов многосистемного наведения больших оптических телескопов. Выделенные на основе пространственно-временного частотного разделения модульные системы комплекса разделены на системы общего слежения, корректирующего слежения, активной оптики, адаптивной оптики и обеспечивающие.

В третьей главе построены аналитические и компьютерные имитационные модели модульных систем слежения с учетом выделения важнейших конструктивных факторов. Они предназначены для сопровождения разработок таких систем в составе комплексов наведения больших оптических телескопов. В качестве аналитических моделей для последующего аналитического синтеза многосистемного комплекса слежения, в главе приведены низкочастотные модели следящего телескопа в альт-азимутальной монтировке, низко и среднечастотная модели управляемого по наклонам вторичного зеркала большого телескопа, а также низкочастотные модели плавной стабилизации космического аппарата вместе с орбитальным телескопом.

Для получения высокочастотных компьютерных моделей, соответствующих детализированной проработке механических конструкций в современных САПР, предложена методика идентификации таких моделей, апробированная на примере высокочастотной модели управляемого по наклонам вторичного зеркала большого телескопа.

Также в главе выполнено исследование особенностей управления по наклонам упругим диагональным третичным зеркалом с включенным контуром активного демпфирования его низших резонансных колебаний.

В четвертой главе построены и исследованы модели деформируемых зеркал для модульных систем коррекции волнового фронта в составе комплексов наведения больших оптических телескопов. Такие системы призваны активно исправлять и адаптивно корректировать соответствующие эксплуатационные оптические aberrации в оптическом тракте телескопа и вдоль трассы распространения оптического луча, повышая тем самым интегральную эффективность всего комплекса наведения большого телескопа.

В главе выполнено моделирование управляемых деформаций главных зеркал телескопов для разработки модулей активной оптики, приведены модели гибких зеркал для компенсации влияния атмосферной турбулентности в составе модулей адаптивной оптики, предложены системы организации дополнительной оптической обратной связи для управления волновым фронтом. Последние системы с оптической обратной связью позволяют уменьшить лучевую нагрузку на лазерные пучки подсвета целей в околоземном пространстве, а также ослабить требования по фазовым искажениям к оптическим усилителям.

В пятой главе диссертационного исследования внимание сконцентрировано на высокоточных моментных электроприводах, определяющих точность углового слежения всей конструкцией большого наземного телескопа. Сначала для формирования скоростных требований к следящим электроприводам по углам азимута и высоты выполнена координатная увязка следящего телескопа с космическими объектами наблюдения. Далее на этой основе для наблюдения низкоорбитальных объектов в околоземном пространстве предложена упрощенная и детализированная методика расчета предварительных проектных требований к электроприводам слежения.

Основное внимание в главе уделено повышению точности работы электроприводов слежения всем телескопом. Для этого построены модели высокоточных трехконтурных электроприводов и синтез контуров управления ими в условиях возмущений. Дополнительное введение в модели детализации важных конструктивных упругих элементов и электрических параметров контуров обратных связей, а также вариантов внутренних и внешних возмущений позволяет прогнозировать и выявлять производственные и эксплуатационные факторы, потенциально приводящие к ухудшению точности углового слежения, а также проводить поиск вариантов их нейтрализации.

В шестой главе диссертационного исследования автор сконцентрировал внимание на достигаемых точностях твердотельных волновых гироскопов, выступающих в роли измерителя точности угловой стабилизации космического аппарата вместе со всей конструкцией телескопа. Особенно это важно для наблюдений слабых звездных источников в режимах длинных временных экспозиций (когда замыкание обратных связей по оптическому сигналу ошибки уже не удовлетворяет частоте контура угловой стабилизации космического аппарата с телескопом). Отмечая для таких режимов прямое влияние точности гироскопов на ошибку угловой стабилизации оптической оси космического телескопа, в главе предложены детализированные имитационные модели для сопровождения разработок, изготовления и эксплуатации высокоточных твердо-

тельных волновых гироскопов, а также выполнены исследования факторов и алгоритмов, влияющих на точность их измерительных сигналов. Среди них исследованы модели временного дрейфа сигнала с учетом влияния контуров внутреннего управления, приведены варианты алгоритмов формирования сигналов в измерительном устройстве, а также выполнен анализ технологических факторов, потенциально ухудшающих их точность. Необходимость такой детализации описания процессов формирования измерительных сигналов гироскопов показывается в последующем при анализе вариантов комплексирования всех измерительных средств единого комплекса многосистемного наведения большого космического телескопа.

В седьмой главе предложены основы методологии для проведения структурно-параметрического синтеза многосистемных комплексов слежения больших оптических телескопов применительно к наземным и орбитальным большим телескопам. Для этого сначала рекомендованы методики низкочастотного синтеза алгоритмов управления всем следящим телескопом с учетом критерия уменьшения создаваемых инерционных нагрузок на деформируемую конструкцию большого телескопа (включая системы корректирующего наведения). По его результатам формируются требования к следующим ступеням многосистемного наведения телескопа. Далее для больших наземных телескопов предложены и обоснованы варианты режимов и структур взаимодействия модульных систем слежения с ориентацией на повышение автономности их разработки и настройки. Чтобы более явно выделить их свойства, такой синтез проведен на упрощенных моделях, без излишней детализации. Для них предложена методика выбора и согласование параметров синтезируемых регуляторов в многосистемных комплексах слежения. Отдельно рассмотрено применение предложенной методологии структурно-параметрического синтеза к комплексам многосистемного слежения больших орбитальных телескопов, включая синтез их структур, режимов и алгоритмов управления. Для них дополнительно исследовано влияние характеристик измерительных средств на алгоритмы их комплексирования, а также на настройку структуры комплекса двухсистемного наведения.

Восьмая глава посвящена исследованию влияния конструктивных факторов и параметров на прогнозирование точности разрабатываемых модульных систем слежения в комплексах наведения больших оптических телескопов. При моделировании процессов слежения наземным телескопом за космическим объектом в околоземном пространстве детально исследовано влияние эксплуа-

тационных факторов и конструктивных параметров электродвигателей на точностные характеристики такого слежения.

Моделирование задачи двухканальной угловой стабилизации орбитального оптического телескопа по слабым звездным источникам выполнено с учетом пониженной частоты получения оптического сигнала ошибки, периодически накапливаемого на интервалах экспозиции. Исследованы возможности повышения точности наведения такого телескопа с помощью управления его активным вторичным зеркалом. Сначала определены частоты замыкания обратной связи по такому низкочастотному оптическому сигналу ошибки, обеспечивающие требуемую точность наведения телескопа. Они будут ограничивать частотную область компенсируемых возмущений. Для ее расширения предложен вариант высокочастотного восстановления сигнала ошибки наведения и исследована его эффективность. Это позволило повысить частоту контура обратной связи с сохранением высокой эффективности слежения.

Девятая глава посвящена разработке системы методов настройки модульных систем коррекции волнового фронта по соответствующим критериям оптимизации с целью обеспечения интегрального повышения эффективности всего комплекса многосистемного наведения больших оптических телескопов. Предложенные методы настройки, реализуемые через решение оптимизационных задач, могут быть использованы не только на этапах разработки и создания больших телескопов с многосистемным наведением, но и на этапе их эксплуатации, при проведении автоматизированных научных исследований.

В перечень важнейших методов настройки включены: кластеризация и прореживание приводов управления для оптимизации пространственной структуры систем коррекции волнового фронта, оптимизация градиентных методов коррекции волнового фронта по функционалам интенсивности светового поля, оптимизация систем адаптивной атмосферной оптики с обратной связью по волновому фронту. Дополнительно исследованы возможности градиентного управления активными зеркалами при слабом световом сигнале. Также выполнен анализ новых возможностей систем управления волновым фронтом при введении контуров оптической обратной связи, позволяющих ослабить требования к лучевой стойкости гибких зеркал и к фазовым флуктуациям в оптических усилителях.

В заключении приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

Список использованных источников включает 344 работы.

В приложениях представлены акты внедрения научных и практических результатов диссертационного исследования.

Анализ содержания позволяет сделать вывод о достижении поставленной цели и решении основных и частных задач диссертационного исследования.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации Шишакова К.В. достаточно высокая, так как обеспечена использованием апробированных научных положений и методов исследования, корректном применении математического аппарата, сертифицированных программ моделирования, согласованностью новых результатов с известными; непротиворечивостью с научными публикациями; подтверждением результатами апробации, внедрения и экспериментальной проверкой отдельных теоретических положений.

Она подтверждается широким представлением научных положений, выводов и рекомендаций в научных изданиях, на научных конференциях, а также актами внедрения и использования результатов диссертационной работы в ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», в ФТИ УрО РАН (г.Ижевск), на АО «ИЭМЗ «Купол» (г. Ижевск), на АО «ИМЗ» (г. Ижевск), в ЗАО «НПЦ «Техинформ» (г. Королев).

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации диссертационного исследования Шишакова К.В. обладают необходимым уровнем достоверности и новизны.

Сформулированные в диссертационном исследовании научные положения, выводы и рекомендации позволяет утверждать, что автору удалось развить теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов.

Предложенные методология, формализованные подходы, модели, методы и алгоритмы создают новые возможности по улучшению проектных и эксплуатационных показателей функционирования больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) за счет использования интегрального потенциала их многосистемных комплексов наведения. При этом можно считать выделенные автором научные результаты как новые и существенные.

1. Методология для сопровождения разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов, основывающаяся на их пространственной и временной частотной декомпозиции, которая позволяет взаимно увязать методы, модели и алгоритмы разработок составных модульных

систем управления в рамках общей задачи интегрального обеспечения проектной эффективности создаваемых больших телескопов в условиях эксплуатационных микродеформаций их оптико-механических конструкций.

2. Система моделей модульных систем слежения с учетом влияния допусков технологических погрешностей изготовления их элементов и конструкций для интеграции в распределенные комплексы наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных).

3. Система моделей модульных систем коррекции волнового фронта с контурами управления распределенной обратной связью, включая оптическую обратную связь, для интеграции в распределенные комплексы наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных).

4. Система взаимно дополняющих моделей и алгоритмов управления прецизионными электроприводами с учетом влияния упругих деформаций их элементов, а также внутренних микропульсаций и электромагнитных возмущений, для выбора конструктивных и электромеханических параметров, обеспечивающих требуемую эффективность наведения больших наземных оптических телескопов в опорно-поворотном устройстве.

5. Система моделей формирования сигналов твердотельных волновых гироскопов для комплексов наведения больших орбитальных оптических телескопов, позволяющая в процессе их производства уточнить влияние на выходные сигналы технологических допусков изготовления, а также алгоритмов управления внутренними волновыми процессами.

6. Методы и алгоритмы для проведения структурно-параметрического синтеза многосистемных комплексов слежения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) по критериям минимизации эксплуатационных деформаций их облегченных конструкций, ориентированные на автономность процессов по созданию и начальной настройке модульных систем при сохранении их интегрального единства и согласования для достижения требуемой эффективности наведения.

7. Комплексные модели, позволившие исследовать влияние алгоритмов и параметров систем управления, а также внешних и внутренних возмущающих факторов на эффективность двухсистемного слежения большими оптическими телескопами.

8. Система взаимно дополняющих методов настройки и оптимизации модульных систем коррекции волнового фронта, призванных в совокупности повысить интегральную эффективность больших оптических телескопов.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждена опубликованием автором 68 печатных работах, среди которых:

- одна монография без соавторов объемом 264 стр;
- одно учебное пособие без соавторов объемом 346 стр;
- 8 статей в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus;
- 44 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, из которых 17 работ выполнены соискателем лично, остальные в соавторстве.

Практическая значимость и полезность научных и прикладных результатов, полученных в диссертации

В диссертационном исследовании Шишакова К.В. сформирован комплексный подход к сопровождению разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов, который позволяет решать широкий круг практических задач повышения их эксплуатационных показателей на всех этапах жизненного цикла.

Входящие в него модели, алгоритмы и методики будут полезны:

- при разработке и настройке многосистемных комплексов наведения больших наземных оптических телескопов;
- при разработке и настройке многосистемных комплексов наведения больших космических оптических телескопов;
- при создании полных имитационных компьютерных моделей («цифровых двойников»), требующихся для сопровождения разработок и эксплуатации больших оптических телескопов (наземных и космических);
- для повышения эффективности подсистем и элементов комплексов наведения, включая многоконтурные системы управления электроприводами углового слежения всем телескопом, корректирующие каналы слежения вторичными и другими зеркалами в оптическом тракте, низкочастотные системы пространственно распределенной активной компенсации аберраций оптической схемы, высокочастотные системы пространственно-временной коррекции искажений волнового фронта в турбулентной атмосфере, а также другие вспомогательные управляемые элементы, устройства и системы;
- для повышения эффективности многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов путем раскрытия интегрального потенциала входящих в них систем управления.

Практическая значимость также подтверждается участием автора в различных отечественных проектах (входящих, в том числе, в Федеральные программы), а также приведенными актами внедрений результатов диссертацион-

ного исследования в Физико-техническом институте Уральского отделения РАН (г.Ижевск), на АО «Ижевский электромеханический завод «ИЭМЗ «Купол» (г. Ижевск), на АО «Ижевский механический завод «ИМЗ», в ЗАО «Научно-производственный центр «НПЦ «Техинформ» (г. Королев), а также использованием в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (имеются акты об использовании результатов исследований и внедрения).

Замечания по диссертационной работе

К сожалению, представленная на рецензию работа не свободна от недостатков, к которым мне бы хотелось отнести следующее

1. В обзоре характеристик больших телескопов (п. 1.2) не всегда указано место расположения телескопа и страна построившая телескоп. Например, это не указано для БГА, страна-владелец не указана у телескопа Гершеля. Нужно отметить, что место стояния является очень важной характеристикой, от него зависит эффективность работы прибора.
2. Непонятно, почему п. 1.2 называется «Проекты больших наземных телескопов...». В параграфе рассказывается не только о проектах, но и о введенных в эксплуатацию приборах.
3. Понимание диссертационной работы затрудняют недостатки оформления. Так на рисунках 6.3, 6.6, 8.2 названия координатных осей отсутствуют. На рис. 3.7 нет подписи оси ординат. На рис. 8.1 названия осей написаны на английском языке.
4. В таблице на стр. 182 добротность измеряется в минутах. Я всегда считал, что это безразмерная величина. Автор, мне кажется, со мной согласен, указав на этой же странице безразмерную добротность. Предлагаю использовать только один вариант и, желательно, правильный.
5. Общее замечание к Главе 2 и последующим. Непонятно, какие данные были получены лично автором, а какие были заимствованы из литературных источников. Например, стр. 54: «Для их нейтрализации применяется множество измерительных датчиков и исполнительных приводов, воздействующих через обратные связи на свои объекты управления (рисунок 2.1)» Метод, включающий показанные на рис. 2.1 операции (захват, поиск, обнаружение), был разработан автором или заимствован из публикаций других авторов?
6. Данные, помещенные на рис. 3.3 (АФЧХ угла наклона) получены автором или заимствованы? Эта АФЧХ получена экспериментально или в результате моделирования? По тексту работы это понять сложно.

7. Несколько замечаний к Главе 9, которая посвящена методам адаптивной оптики, оптимизации управления гибким зеркалом, увеличению быстродействия алгоритмов.

7.1. Стр. 251, первое предложение параграфа 9.1: «Похожей тематике посвящены статьи ...». Это первое предложение параграфа, т.е. ни какая тематика выше не обсуждалась, поэтому непонятно, что и на что похоже.

7.2. Предложение на стр. 252: «Модальная система коррекции волнового фронта наиболее часто применялась в адаптивной оптике ...» Естественный вопрос: «Кем применялась?» Ссылка на литературные источники была бы здесь очень уместна.

Нужно отметить, что приведенные замечания не влияют существенно на представленный в диссертационной работе материал и не снижают существенное общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Шишакова Константина Валентиновича «Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Анализ содержания диссертации позволяет сделать вывод о достижении автором поставленной цели и решении основных и частных задач диссертационного исследования. Диссертация написана в форме, позволяющей получить достаточно ясное представление о целях, задачах, методах и результатах проведенных автором исследований.

Сформулированные автором выводы и заключения обоснованы, а их достоверность и новизна не вызывают сомнения.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, в нем с достаточной полнотой изложены основные идеи и выводы диссертационной работы, степень новизны и практическая значимость результатов исследований.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней (утверждено Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 с изменениями, утвержденными Постановлением Правительства РФ № 335 от 21.04.2016 г.), которые предъявляются к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Шишаков Константин Валентинович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими

процессами и производствами (в машиностроении и приборостроении),
05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и
технике).

Официальный оппонент
Ведущий научный сотрудник
Института оптики атмосферы им. В.Е.
Зуева Сибирского отделения РАН,
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.05 - оптика),
старший научный сотрудник

Канев Федор Юрьевич

«16» мая 2019 года

Адрес, включая адрес электронной почты:
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева,
Сибирского отделения РАН,
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.
Телефон/факс: (3822) 492-086, e-mail: mna@iao.ru

Подпись официального оппонента
ведущего научного сотрудника ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН,
доктора физико-математических наук,
старшего научного сотрудника Канева Ф.Ю. заверяю:

Ученый секретарь
ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, к.ф.-м.н.

О.В. Тихомирова

