

Федеральное бюджетное государственное учреждение науки Ордена Трудового
Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Сыренова Татьяна Евгеньевна

Метод анализа пространственных вариаций интенсивности свечения верхней
атмосферы, регистрируемых цифровыми широкоугольными камерами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Специальность 25.00.29 - “Физика атмосферы и гидросферы”

Иркутск 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН)

Научный руководитель: Белецкий Александр Борисович, кандидат физико-математических наук, Институт солнечно-земной физики СО РАН, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: Перцев Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, ведущий научный сотрудник

Колтовской Игорь Иннокентьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, и.о.заведующего лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет".

Защита состоится " " г. в часов на заседании диссертационного совета Д 003.034.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЗФ СО РАН и на сайте <http://www.iszf.irk.ru>.

Автореферат разослан " " _____ 20 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

Поляков В. И.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Результатом многочисленных фотохимических процессов, в частности, фотоионизации под воздействием Солнца в дневное время, люминесценции, вызываемой прохождением космических лучей, хемилюминесценции, является собственное излучение атмосферы, существующее как в дневное, так и в ночное время. Состоящее из свечения различных эмиссий оно является важным индикатором процессов, происходящих во всех слоях атмосферы. Изучение пространственной картины интенсивности атмосферных эмиссий является удобным способом получения информации о процессах, происходящих на высотах их высвечивания. С помощью цифровых камер, регистрирующих свечение атмосферы, можно проследить пространственно-временную динамику возмущений, в том числе волновых, оценить их основные параметры. Исследование волновых процессов в атмосфере является важной и актуальной задачей, поскольку волновые возмущения играют существенную роль в динамике атмосферы, являясь переносчиком энергии и импульса между высотными слоями атмосферы. Наиболее вероятным источником возмущений являются акустико-гравитационные волны (АГВ) и внутренние гравитационные волны (ВГВ), источники которых, в основном, находятся в тропосфере и литосфере. Важным аспектом является изучение и оценка параметров таких событий, как следы пролетов метеоров, космических объектов, способных также служить источником волновых возмущений.

При распространении возмущений из нижних слоев атмосферы в верхние амплитуда волн увеличивается, поэтому возникает возможность регистрации их проявлений на высотах мезосферы - термосферы. АГВ и ВГВ исследуются как прямыми методами измерения вариаций параметров нейтральной атмосферы, так и косвенными наземными оптическими и радиофизическими методами, позволяющими получать пространственное распределение параметров атмосферы и ионосферы. Измерение параметров волн радиофизическими методами проводится через их проявления в заряженной компоненте ионосферы - перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) – неоднородности электронной концентрации, которые могут наблюдаться как одно либо несколько пространственных колебаний.

Наиболее интенсивной атмосферной эмиссией в видимой части спектра на высотах F-области (около 250 км) является линия высвечивания атомарного кислорода 630 нм. Использование разнесенных в пространстве двух и более цифровых камер с широким углом

обзора позволяет строить стереоизображения и получать пространственно-временные характеристики наблюдаемых волновых структур, авроральных дуг, метеорных следов и т.п.

Целью работы является анализ пространственно-временных вариаций интенсивности атмосферных эмиссий, в том числе волновой природы, на высотах верхней атмосферы.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Выполнение обзора пространственно-временных характеристик возмущений, в том числе волновой природы, в верхней атмосфере и ионосфере для различных долготно-широтных регионов, что позволит в дальнейшем оценить влияние локальных особенностей местности (рельеф, преобладающие погодные условия) на генерацию и распространение волновых возмущений.

2. Создание методики анализа данных широкоугольных оптических систем, включающей автоматическую идентификацию звезд, географическую привязку изображений, автоматическое выделение волновых возмущений и определение их параметров.

3. Обработка архивных данных с целью получения статистически значимых характеристик проявлений волновой активности в интенсивности атмосферных эмиссий в области термосферы.

4. Сравнение характеристик возмущений, зарегистрированных в интенсивности атмосферных эмиссий, с характеристиками перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), зарегистрированных с помощью инструментов радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН.

5. Исследование вариаций интенсивности свечения атмосферы, обусловленных возможными источниками АГВ и ВГВ таких, как пролеты метеоров, запуски космических аппаратов и т.п.

Научная новизна работы

1. Впервые для среднеширотной зоны азиатской части Евразии (Тункинская долина, Республика Бурятия) проведены измерения и накоплена база данных измерений пространственного распределения интенсивности атмосферной эмиссии атомарного кислорода 630 нм за период 2013-2021 годы.

2. Разработана методика обработки кадров широкоугольных камер с узким спектральным диапазоном, включающая автоматическую идентификацию звезд на кадрах с

оценкой их относительной интенсивности и географическую привязку пикселей кадров для произвольной высоты. Данная методика также включает алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме идентифицировать волновые структуры на изображениях широкоугольных камер, получать их параметры и проводить анализ пространственных характеристик в интенсивности атмосферных эмиссий на основе стереоскопических наблюдений. Автоматический режим работы методики позволяет обрабатывать достаточно большие массивы данных.

3. Проведено комплексное исследование пространственно-временных характеристик долгоживущего метеорного следа, зарегистрированного после пролета болида над Тункинской долиной 18 ноября 2017 г на основе данных пространственно разнесенных оптических и радиофизических наблюдений. Получено, что динамика наблюдаемого следа обусловлена ветровым сдвигом, а возможным источником свечения является гидроксил, образующийся в результате фотохимических реакций воды метеорного тела с атомарным кислородом верхней атмосферы Земли.

4. Впервые для средних широт азиатского континента (юга Восточной Сибири) получены морфологические характеристики волновых структур в излучении атмосферной эмиссии 630 нм. Проведено сравнение с параметрами ПИВ, зарегистрированными инструментами радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН.

Методы исследования

Данные о параметрах верхней атмосферы Земли получены с помощью инструментов оптического комплекса Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН. Анализ данных проведен с помощью разработанной в ходе исследования методики автоматической обработки данных широкоугольных оптических систем, позволяющей идентифицировать звезды, осуществлять географическую привязку изображений и выделять периодические структуры и анализировать их морфологические характеристики. Статистические характеристики перемещающихся ионосферных возмущений получены по данным радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием большого массива экспериментального материала, сопоставлением с результатами других исследователей, применением апробированных методов экспериментальных исследований и математических и статистических методов обработки результатов.

Научная и практическая ценность работы

Разработана методика, позволяющая в автоматическом режиме идентифицировать волновые возмущения и определять их характеристики на кадрах широкоугольных оптических систем с узким спектральным диапазоном, а также идентифицировать наблюдаемые звезды и проводить географическую привязку пикселей кадров для произвольного диапазона высот.

При наблюдениях с помощью пространственно разнесенных камер данная методика позволит наиболее точно восстанавливать пространственные характеристики таких событий, как волновые структуры, авроральные дуги, метеорные следы, искусственные образования и пр. Проанализированы пространственно-временные характеристики долгоживущего метеорного следа, предположительно обусловленного разрушением тела метеора и ветровым сдвигом. Свечение следа, вероятно, объясняется фотохимической реакцией воды метеорного тела с атомарным кислородом атмосферы Земли.

В результате проведенных исследований получены морфологические характеристики перемещающихся волновых возмущений, зарегистрированных в интенсивности атмосферной эмиссии атомарного кислорода 630 нм в регионе Восточной Сибири. В дальнейшем с использованием накопленной статистики возможно провести работу по идентификации источников наблюдаемых возмущений. Также эти данные будут полезны при исследовании взаимодействия как между нейтральной и заряженной компонентами в области термосферы, так и между различными высотными слоями атмосферы в процессах переноса энергии и импульса.

На защиту выносятся:

1. Методика обработки и анализа данных широкоугольных оптических систем с узким спектральным диапазоном, позволяющая в автоматическом режиме идентифицировать звезды, проводить географическую привязку для произвольной высоты, идентифицировать перемещающиеся волновые возмущения и получать их пространственно-временные параметры.

2. Пространственно-временные характеристики долгоживущего метеорного следа, зарегистрированного после пролета болида над Тункинской долиной 18 ноября 2017 г. Динамика метеорного следа обусловлена вертикальным сдвигом поля ветра, существующим на этих высотах во время наблюдения. Высота распространения метеорного следа лежит в

диапазоне 88-106 км. Долгоживущий метеорный след распространялся преимущественно на юг со средней скоростью 80 м/с.

3. Морфологические характеристики перемещающихся волновых возмущений в интенсивности свечения атомарного кислорода атмосферы, их особенности для региона Восточной Сибири. Горизонтальные скорости возмущений лежат в пределах 30-100 м/с, горизонтальная длина волны - в диапазоне ~20-800 км. Преимущественное направление распространения возмущений на юго-запад и, в меньшей мере, на юг, юго-восток и восток.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно либо при его непосредственном участии. Выносимые на защиту положения основаны на результатах исследований, проведенных автором самостоятельно либо при его непосредственном участии. Автор принимал прямое участие в получении, обработке, научном анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на симпозиумах и конференциях: Международная Школа молодых ученых им. А.Г. Колесника “Физика окружающей среды” (Томск, 2016), Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (Томск, 2016, Москва, 2021), Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (Москва, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020), Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике и конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 2017, 2019), Апатитский семинар с международным участием “Физика авроральных явлений” (Апатиты, 2019), Международная ассамблея Европейского геофизического общества (EGU General Assembly, online) (Австрия, Вена, 2020, 2021), Всероссийская конференция “Распространение радиоволн” (Калининград, 2021).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 34 печатных работах, из них 7 в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК.

Структура и объем диссертации

Данная диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 99 страниц, включая 22 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 226 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении представлена актуальность темы диссертации, сформулирована постановка задачи и краткая аннотация содержания работы по главам, отмечается научная новизна, достоверность и практическая ценность полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

В **первой главе** приведено современное состояние исследований пространственно-временных вариаций интенсивности свечения верхней атмосферы.

В *разделе 1.1* описываются вариации интенсивности свечения атмосферы Земли, дающие важную информацию о процессах, происходящих на различных высотах. В средней атмосфере на высотах мезосферы и нижней термосферы располагаются слои высвечивания различных эмиссий: молекулы гидроксила (87 км), молекулы кислорода (92 км), атомы натрия (93 км), атомы кислорода - эмиссия 557.7 нм (97 км). На высотах F-области (250 км) ионосферы наибольшие интенсивности имеют эмиссии атомов кислорода 630 нм. За многолетний период исследований собственного излучения верхней атмосферы получены сведения о закономерностях поведения параметров как самих эмиссий, так и слоев атмосферы, в которых возникают эти свечения. Все компоненты верхней атмосферы, как нейтральные, так и ионизованные, испытывают воздействие нижней атмосферы и наземных процессов. Акустико-гравитационные волны - это низкочастотные продольные волны, образующиеся в случае, когда сила земной гравитации и возвращающая сила, обусловленная градиентом плотности атмосферы, сравнимы с силой сжатия. Волны, имеющие периоды больше минимального предела - периода Брента-Вяйсяля, называются внутренними гравитационными волнами (ВГВ) или волнами плавучести. Период Брента – Вяйсяля вычисляется по формуле (1) и имеет значение меньше, чем π , деленное на угловую скорость вращения Земли:

$$\tau_g = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{\gamma \cdot k \cdot T}{(\gamma - 1) \cdot M \cdot m_H \cdot g^2}} = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma H}{(\gamma - 1)g}}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$ - отношение теплоемкостей, k - постоянная Больцмана, g - ускорение свободного падения, T - температура, M - молекулярная масса, m_H - масса атома водорода, H - высота однородной атмосферы.

В *разделе 1.2* рассматривается классификация возмущений в зависимости от масштабов, описываются механизмы возникновения разных типов волновых возмущений.

Акустико-гравитационные волны играют важную роль в процессе переноса импульса и энергии из нижних слоев атмосферы в верхние. Исследования распространения волн в верхней атмосфере начались около середины прошлого столетия и продолжаются в настоящее время с помощью спутникового зондирования, наземных оптических и радиофизических инструментов. Однако механизмы формирования, определение достоверных источников волн и их распространения как из нижних слоев атмосферы, так и из магнитосферы и относительный вклад каждого из источников до конца не ясен. Существует достаточно большое количество механизмов генерации АГВ и ВГВ. В результате многочисленных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что источниками волновых процессов в атмосфере и ионосфере могут быть: орография, погодные тропосферные фронты, глубокая конвекция, солнечный терминатор, землетрясения, цунами, торнадо, тропические циклоны, пролеты метеоров, полярная и экваториальная токовые системы и т. д. Также волновые возмущения могут быть формироваться за счет поступления энергии из магнитосферы во время магнитной суббури или бури. Кроме естественных источников АГВ существуют и антропогенные факторы, такие как запуски космических аппаратов, промышленные, военные и атомные взрывы большой мощности.

В *разделе 1.3* описаны известные оптические и радиофизические методы исследования АГВ и ВГВ, в том числе через их ионосферный аналог - ПИВ и посредством регистрации интенсивности собственного свечения атмосферы. Расстояние между соседними пространственными колебаниями (фронтами) называют горизонтальной длиной волны, причем длина волны, может изменяться внутри одного цуга от фронта к фронту. Различают крупномасштабные и среднемасштабные ПИВ. Впервые ПИВ были интерпретированы как проявления АГВ в ионосфере в 60-х годах XX века, когда начались активные исследования с помощью радиотехнических средств [Hines, 1974]. С развитием радиофизических методов, в особенности с использованием спутников, такие способы зондирования атмосферы стали играть ведущую роль в исследовании ионосферных неоднородностей.

Исследования, проведенные в разных регионах наблюдений, указывают на некоторые особенности параметров распространяющихся волновых возмущений в зависимости от широты наблюдений и сезона, а также от местоположения возможных источников возмущений. Следует отметить, что характеристики волновых возмущений и их проявления в заряженной компоненте в общем случае могут не совпадать. Например, при

распространении возмущений в различных направлениях относительно геомагнитного поля, следует ожидать различий в поведении нейтральной и заряженной компонент. Поэтому важно сделать независимые измерения параметров возмущений на высотах термосферы, чтобы правильно определить их свойства и поведение. Эти измерения можно использовать для статистического анализа данных, чтобы определить частоту появления гравитационных волн, их периоды и факторы, влияющие на их амплитуду и частоту возникновения.

В ходе данного исследования проанализированы работы по регистрации параметров ВГВ различными методами с пунктов наблюдений, расположенных в различных широтно-долготных секторах. Обзор проанализированных работ представлен в *разделе 1.4*.

Наиболее тщательно исследования волновых возмущений выполнены в средних и экваториальных широтах на японском меридиане, а также в Северной Америке, в Южной (преимущественно в Бразилии), в Европе. Ночные среднемасштабные ПИВ, в основном, распространяются на юг либо юго-запад в северном полушарии. Мелкомасштабные гравитационные волны в средних широтах в северном полушарии имеют тенденцию распространяться на восток летом и на запад зимой; предполагается, что волны фильтруются ветрами в средней атмосфере в зональном направлении - на запад летом и на восток зимой. Преимущественное направление волновых возмущений во многих работах с помощью различных методов детектирования показывает сезонную зависимость.

Во **второй главе** приведено описание оборудования и используемой методики обработки данных. В данной работе использовались данные оптической системы КЕО Sentinel, расположенной в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН. В *разделе 2.1* описывается комплекс оптических инструментов Геофизической обсерватории. Широкоугольная оптическая система КЕО Sentinel предназначена для регистрации пространственной картины интенсивности эмиссии 630 нм (высота высвечивания 180-300 км). Основные технические характеристики: направление визирования - зенит, поле зрения 145 градусов, время экспозиции 30 - 60 с, полуширина пропускания интерференционного фильтра ~2 нм [Сыренова и др., 2021].

До настоящего времени обработка данных, полученных с помощью КЕО Sentinel, производилась в ручном режиме. Но ручная обработка большого объема архивных и оперативных данных требует значительных затрат времени. К тому же такой метод сильно зависит от субъективного восприятия и квалификации оператора. В связи с вышесказанным возникла необходимость автоматической обработки данных с целью детектирования

перемещающихся возмущений по данным широкоугольных камер. Подобная методика была разработана и апробирована на архиве данных оптической системы KEO Sentinel. В разделе 2.2 описываются три блока, из которых состоит методика, позволяющая в автоматическом режиме производить выделение и идентификацию звезд на кадрах камер, осуществлять привязку пикселей изображений к географическим координатам, а также автоматически идентифицировать волновые структуры и определять их основные характеристики. Каждый из блоков методики можно использовать по отдельности.

Первый блок методики позволяет в автоматическом режиме выделять и идентифицировать звезды на кадрах широкоугольных камер. Данные, полученные с помощью широкоугольных камер, имеющих объективы типа “рыбий глаз”, зачастую сложно верифицировать с точки зрения оценки пространственных параметров, поскольку такие камеры имеют искажения по краям изображений. Для учета имеющихся искажений была выполнена геометрическая калибровка камеры. В качестве реперных точек использовались звезды, идентифицированные на изображениях с помощью автоматического алгоритма. Затем для каждого объекта были сопоставлены азимут и высота в горизонтальной системе координат с центром в месте расположения камеры и соответствующие горизонтальный и вертикальный номер пикселя изображения. Для сопоставления координат пикселя на изображении с соответствующим углом места и азимутом использовались выражения:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{y-y_0}{x-x_0}\right) + \phi_0 \quad (2)$$

$$\theta(x, y) = ar^2 + br + c \quad (3)$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (4)$$

Выражение (2) определяет азимутальный угол с учетом произвольного поворота камеры на угол ϕ_0 , где x, y - пиксельные координаты на изображении, x_0, y_0 - положение истинного зенита в этих координатах. Уравнение (2) определяет зенитное угловое расстояние пикселя, которое удобно записать при помощи расстояния между произвольным пикселем и истинным зенитом на матрице (3). Приведенная зависимость имеет квадратичный характер относительно расстояния (4) с постоянными коэффициентами a, b и c . Связь между координатами (2-4) также можно представить в комплексном виде:

$$z = x + iy = \theta(x, y) \exp^{i\phi(x, y)}, \quad (5)$$

где зависимости $\theta(x, y)$ и $\phi(x, y)$ определяются выражениями (2-4). Используя реперные

координаты звезд в горизонтальной системе и их соответствующие положения на матрице камеры, постоянные коэффициенты в (2-4) можно найти методом наименьших квадратов, используя (5) как модельную функцию. Минимизационная задача МНК с использованием (5) решалась при помощи алгоритма Левенберга-Марквардта [Moré, 1978]. В качестве функции ошибки использовался модуль разности (6) для угла места и азимута объекта из каталога PyEphem [<https://pypi.org/project/ephem/>], и для горизонтальных координат, полученных из координат пикселя, соответствующего центру этого объекта на изображении камеры:

$$S = \sum_{n=0}^M \left| \theta_n e^{i\varphi_n} - \theta(x_n, y_n) e^{i\varphi(x_n, y_n)} \right| \quad (6)$$

для угла места и азимута n-го объекта из каталога звезд, и его соответствующих координат на изображении.

На рисунке 1 показана часть кадра оптической системы КЕО Sentinel 3 декабря 2016 г. Всего на полном кадре идентифицировано 22 звезды, совпавших со звездным каталогом, с яркостью от -1.44 до 1.98.



Рисунок 1 - Пример работы алгоритма идентификации звезд. Показана часть кадра оптической системы КЕО Sentinel, зарегистрированного 3 декабря 2016 г. Кругом обозначены области кадра, идентифицированные как звезды, квадратом - совпавшие со звездным каталогом.

Согласно распределению ошибок при определении углов места и азимутов, погрешность определения координат звезд по сравнению с каталогом составляет менее 1 градуса (СКО=0.84) для углов места и 1 градус (СКО=1.16) для азимута.

Второй блок методики заключается в сопоставлении каждого пикселя изображения широкоугольной камеры к широте и долготе Земли. Задавая географические координаты точки наблюдений и предполагаемый диапазон высот изучаемого события, можно найти координаты проекции события на земную поверхность, решая геодезическую задачу на шаре.

Третий блок методики выполняет автоматическую идентификацию периодических структур на изображениях широкоугольных систем и определяет их основные параметры. Для обработки выбираются ясные безлунные ночи. Выборка данных возможна как визуальным методом, так и с помощью автоматического алгоритма оценки прозрачности с помощью наблюдаемых звезд. Первый этап обработки позволяет выделить на кадре перемещающиеся структуры. Для этого используется модифицированный метод временного дифференцирования (Time Differencing method), описанный в работе [Swenson and Mende, 1984]. Идея алгоритма обработки заключается в построении картины разности интенсивностей двух последовательных кадров. В первую очередь изображения нормализуются, далее происходит попиксельное вычитание двух кадров, при этом все неподвижные объекты вычитаются, и на кадре остается картина движения неоднородностей ночного неба. Далее выбираются продольные и поперечные профили интенсивности кадра, количество которых зависит от формата кадра. Затем рассчитываются кросскорреляционные функции между каждым профилем и набором эталонных сигналов, которые представляют собой два периода гармонического колебания различной частоты. Частоты эталонного сигнала изменяются в анализируемом диапазоне. Если коэффициент корреляции превышает пороговое значение, равное 0.7, считается, что идентифицировано волновое событие с частотой, соответствующей частоте эталонного сигнала. Далее находится фронт волны, определяется область пространства, в которой детектируется возмущение, и его истинная частота. В случае нахождения возмущений одинаковой частоты в одной и той же пространственной области изображения детектированные в двух соседних кадрах возмущения объединяются в одно событие. По взаимокорреляционной функции между волновыми возмущениями одного события из кадров, полученных в разное время, определяются скорость и направление перемещения возмущения. Таким образом, получен массив параметров возмущений, включающий горизонтальные скорости распространения периодических структур, направления волновых фронтов, горизонтальные длины волн.

В **третьей** главе представлены основные результаты исследования пространственных

вариаций интенсивности атмосферных эмиссий по данным широкоугольной оптической системы KEO Sentinel.

В *разделе 3.1* приводится исследование метеорного следа, который наблюдался 18.11.2017 в течение примерно 40 минут с помощью двух оптических инструментов, разнесенных в пространстве на 150 км. Первая камера всего неба KEO Sentinel. Вторая широкоугольная цветная камера Allsky-340 производства SBIG расположена в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН, вблизи с. Монды (51.6° с.ш., 100.9° в.д., высота 1992 м). В камере используется RGB фотоприёмник Kodak KAI-340 размером 640x480 пикселей, размер пикселя 7.4 мкм, объектив типа “рыбий глаз” с фокусным расстоянием 4 мм и относительным отверстием 1:4, что обеспечивает угловое поле зрения 185°x145°. Масштаб изображения в зените составляет 18 угловых минут на пиксель. Длительность экспозиции 60 с.

Метеорные следы с длительностью несколько десятков минут являются достаточно редким явлением. Наблюдавшийся нами метеорный след с длительностью около 40 минут сопоставим с длительностью следа, наблюдавшегося [Kelley et al., 2000].

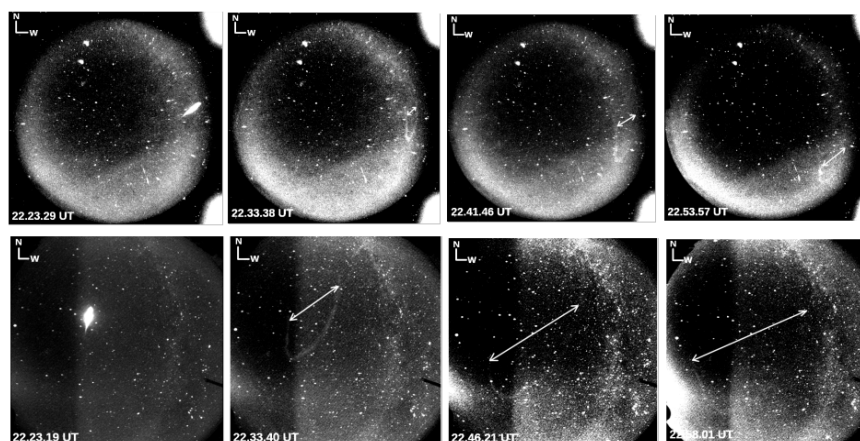


Рисунок 2 - Кадры изображений, полученные в близкие моменты времени с помощью оптических систем KEO Sentinel (верхний ряд) и Allsky-340 (нижний ряд) 18 ноября 2017 г.

Длительность экспозиция 60 сек.

С помощью разработанной методики были построены проекции метеора на поверхность Земли и оценены его пространственные параметры. В результате анализа пересекающихся частей метеора для различных высот было определено, что метеороид двигался в северном направлении под углом 60° к горизонту. Метеор загорался на высоте 111 км и погас на высоте 78 км, полная длина трека составляет около 38 км. На проекциях

изображений достаточно отчётливо видна неоднородность метеора, возникшая перед его гашением, которая возникла, вероятно, вследствие фрагментации метеороида.

Применяя такой же подход к максимально совпадающим по времени снимкам долгоживущего метеорного следа, была определена его пространственно-временная динамика. Развитие следа происходило в диапазоне высот 88-106 км. Сразу после гашения метеора долгоживущий след имел размеры порядка 10 км, а перед окончательной диссипацией характерные продольные и поперечные размеры след составили 375 км и 140 км, соответственно.

Полученные пространственные координаты различных частей следа указывают на то, что след имеет форму не плоской дуги, а полувитка спирали, растянутой по высоте.

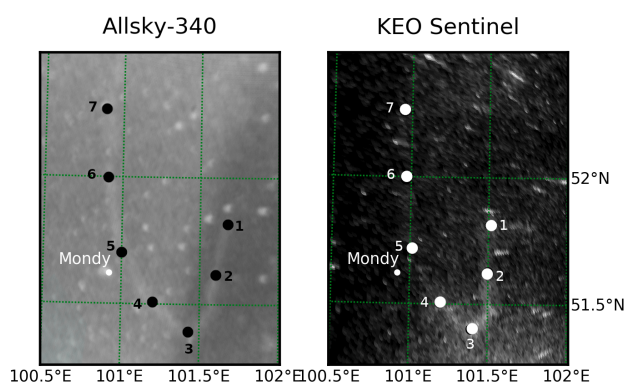


Рисунок 3 - Проекция изображений двух камер (слева Allsky-340, справа KEO Sentinel) на поверхность Земли с высоты 94 км в 22:33:38 UT. Пронумерованные точки – части метеорного следа, для проекций которых на поверхности Земли найдены совпадения для различных высот.

Характерная форма метеора указывает на то, что во время движения метеороида произошла его фрагментация, вероятнее всего в результате взрыва. По всей видимости, этот взрыв привел к образованию облака твердых аэрозольных частиц, которое в процессе своего движения, вызванного взрывной волной и ветровым полем, приняло форму спирали, закрученной вокруг вектора нормали к поверхности Земли. Аэрозоль, образованный взрывной фрагментацией метеороида, был сосредоточен на высотах 88-106 км в течение времени наблюдения. Первоначально, в первые минуты после взрыва аэрозоль двигался во всех направлениях со скоростью порядка 100-200 м/с. По прошествии нескольких минут движение замедлилось до характерных скоростей ветра на указанных высотах. Спиралевидная форма следа определяется вертикальным сдвигом поля ветра,

существующим на этих высотах во время наблюдения долгоживущего метеорного следа. Это подтверждается наблюдением фоновой динамики нейтральной атмосферы в месте, где наблюдался долгоживущий след ветра при помощи интерферометра Фабри-Перо и метеорного радиолокатора.

При исследовании данного события возникла еще одна интерпретация возникновения эллипсоидной формы следа и причинах его свечения. Согласно этой версии долгоживущий метеорный след обусловлен формой самого метеора: в процессе его разрушения произошла фрагментация метеорного вещества, вследствие чего след распространяется, сохраняя примерную форму метеороида, предположительно, в горизонтальном направлении [Михалев, 2021].

В *разделе 3.2* приведены результаты исследования следа, наблюдающегося после пролета космического аппарата со спутником Ямал-601, запуск которого был произведен 30.05.2019 г с космодрома “Байконур”. Получены пространственно-временные характеристики зарегистрированного следа.

Разработанная методика по автоматическому выделению периодических структур позволила обработать большой массив данных широкоугольной оптической системы КЕО Sentinel. В результате обработки архива данных были идентифицированы волновые возмущения и получены их основные параметры, которые представлены в *разделе 3.3*.

Для поиска волновых возмущений были отобраны данные, наиболее подходящие для обработки - полученные в ясные безлунные ночи с 2014 по март 2021 года. Общее количество выбранных для анализа ночей составило 112 (~ 770 часов).

Согласно заданным нами значениям частот эталона, мы получили параметры периодических возмущений по трем группам, которые обозначим как: короткопериодные - до 20 минут, среднепериодные - от 20 до 60 минут и длиннопериодные - от 60 минут. Преимущественное направление распространения короткопериодных возмущений по результатам обработки - на юго-запад и, в меньшей мере, на восток. Горизонтальная длина волны данных возмущений лежит в пределах 35-50 км, горизонтальная скорость составляет в среднем около 70-80 м/с. Для среднепериодных возмущений было выявлено также преимущественное направление на юг и юго-запад. При этом скорости имеют значения преимущественно 80 м/с, периоды - в среднем около 25-30 минут, горизонтальная длина волны составляет около 140-160 км. Азимуты длиннопериодных возмущений имеют три основных направления - юг, юго-запад и юго-восток, скорости распространения около 40

м/с, основное значение периодов ~100 минут, горизонтальная длина волны лежит в диапазоне от 200 до 300 км.

Проведено сравнение характеристик ПИВ, полученных по данным радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН с оптическими данными для близких по значению периодов (рисунок 4). По данным радиофизического комплекса преобладает распространение ночных ПИВ на юг, юго-запад и на север. Эти значения аналогичны направлениям, полученным для возмущений аналогичных периодов по оптическим данным, кроме северного.

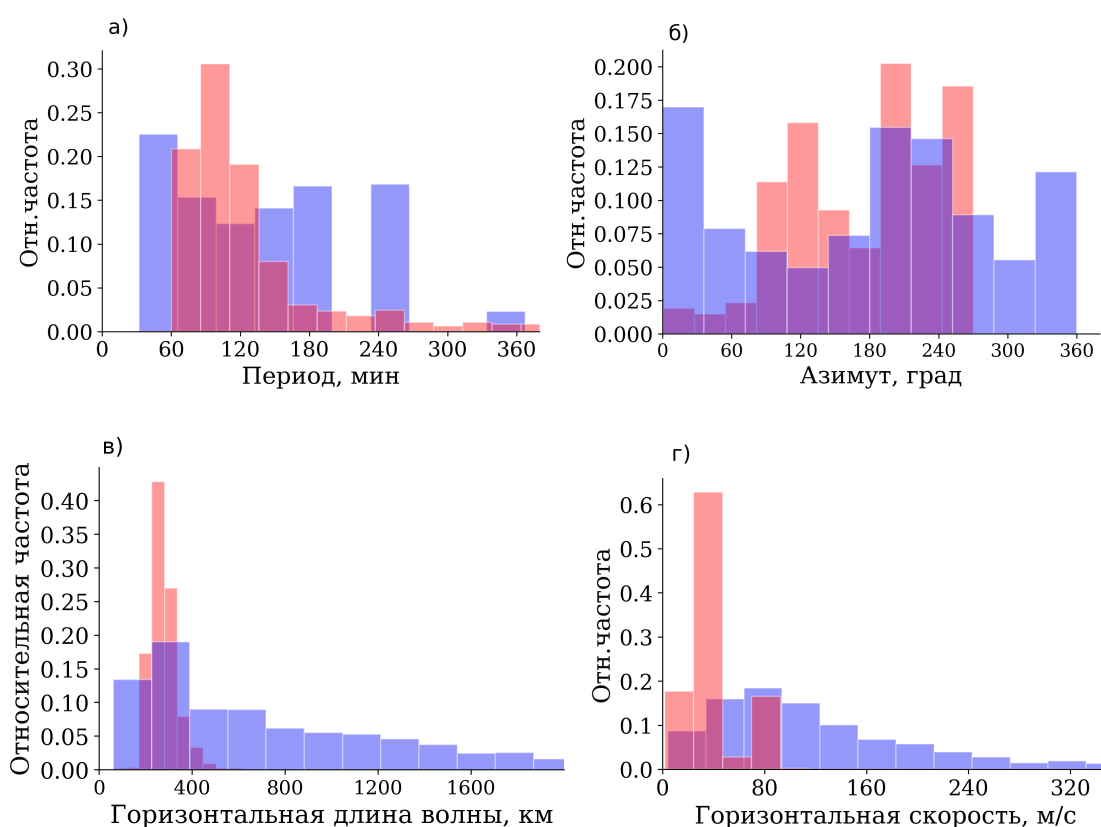


Рисунок 4 - Распределения параметров перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), полученные на основе данных радиофизического комплекса (синие столбцы) и параметров возмущений, полученных с помощью KEO Sentinel (красные столбцы): а) периоды, б) азимуты, в) горизонтальная длина волны, г) горизонтальные скорости.

Наиболее вероятные значения скорости распространения волновых возмущений всех масштабов, полученные в результате автоматической обработки, составляют около 80 м/с. Горизонтальные длины волн наблюдаемых возмущений для короткопериодных возмущений составили ~30-40 км, для средне- и длиннопериодных около 150-160 и 250-380 км, соответственно. Периоды составляют в среднем 60-120 минут. Преимущественное

направление распространения возмущений одинаковое - на юго-запад, но в оптических данных отсутствует северное направление, регистрируемое в радиофизических данных. Полученные юго-западные и юго-восточные направления волновых возмущений, подтверждают глобальную особенность наблюдений в средних широтах северного полушария многими исследователями, которые использовали также данные оптических наблюдений эмиссии 630 нм и радиофизические методы.

Дальнейшее использование накопленной статистики и сопоставление с радиофизическими данными позволит определить наиболее вероятный механизм генерации волновых возмущений. Также эти данные будут полезны при исследовании взаимодействия как между нейтральной и заряженной компонентами в области мезосферы-термосферы, так и между различными высотными слоями атмосферы в процессах переноса энергии и импульса.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- Разработана методика для автоматической обработки и анализа данных широкоугольных оптических систем с узким спектральным диапазоном. Методика позволяет в автоматическом режиме выделять и идентифицировать звезды на кадрах широкоугольной оптической системы, производить географическую привязку пикселей кадра для произвольной высоты, идентифицировать волновые возмущения и определять их параметры (периоды, пространственные размеры, направление и скорость распространения).

- Проведен детальный анализ уникального долгоживущего метеорного следа длительностью около получаса с использованием данных широкоугольных камер, а также радиолокационных характеристик, полученных при помощи метеорного радара и ионозонда. Динамика долгоживущего метеорного следа обусловлена ветром, однако в первые минуты развития следа возможно присутствие высокоскоростной составляющей, возникшей вследствие взрыва метеорного тела в атмосфере. Возможным источником свечения следа является гидроксил, образующийся в результате фотохимических реакций воды метеорного тела с атомарным кислородом верхней атмосферы Земли.

- С помощью разработанного метода на основе данных о пространственном распределении интенсивности атомарного кислорода 630 нм за период с 2014 по 2021 годы получены морфологические характеристики волновых возмущений на высотах высвечивания эмиссии в регионе Восточной Сибири. Установлено преимущественное

направление распространения возмущений на юго-запад и восток. Средние скорости распространения составили около 80 м/с. Полученные характеристики имеют как сходства, так и различия с данными радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН.

С использованием оптических инструментов Национального гелиогеофизического комплекса ИСЗФ СО РАН и возможностью создания пространственно разнесенной базы наблюдений и с применением вышеописанной методики возможно построение стереоизображений событий как регулярного, так и нерегулярного характера, что позволит получать наиболее точную информацию о высотах и других пространственных характеристиках.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в изданиях из перечня ВАК:

1. Васильев, Р.В. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри—Перо КЕО SCIENTIFIC «ARINAE» / Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б., Жеребцов Г.А., Медведева И.В., Михалев А.В., Сыренова Т.Е. // Солнечно-земная физика. - 2017. - Т. 3, No 3. - с.70-87.

2. Beletskii, A.V. Preliminary results of simultaneous recording of auroral and geomagnetic pulsations at the ISTEP SB RAS station Istok / Beletskii A.V., Rakhmatulin R.A., Syrenova T.Ye., Vasilev R.V., Mikhalev A.V., Pashinin A.Yu., Shiokawa K., Nishitani N. // Journal Solar-Terrestrial Physics. - 2019. - Vol. 5, Iss. 2. - pp. 39-44. DOI: 10.12737/szf-52201906.

3. Михалев, А.В. Долгоживущие метеорные следы / Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Еселевич М.В., Иванов К.И., Комарова Е.С., Подлесный А.В., Подлесный С.В., Сыренова Т.Е. // Солнечно-земная физика. - 2019. - Т. 5, No 3. - с.130-139.

4. Васильев, Р.В. Научные задачи оптических инструментов Национального гелиогеофизического комплекса / Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б., Зоркальцева О.С., Комарова Е.С., Медведева И.В., Михалев А.В., Подлесный С.В., Ратовский К.Г., Сыренова Т.Е., Тащилин М.А., Ткачев И.Д. // Солнечно-земная физика. - 2020. - Т. 6, № 2. - с. 105–122. DOI: 10.12737/szf-62202008.

5. Vasilyev, R.V. Studying a Long-Lasting Meteor Trail from Stereo Images and Radar Data / Vasilyev R.V., Syrenova T.E., Beletsky A.V., Artamonov M.F., Merzlyakov E.G., Podlesny A.V., Cedric M.V. // Atmosphere. - 2021. - 12(7). - 841. <https://doi.org/10.3390/atmos12070841>.

6. Сыренова, Т. Е. Географическая привязка кадров широкоугольных систем / Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. // Журнал технической физики. - 2021. - Т. 91, Вып.12. -

c.1990-1996. DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51765.172-21.

7. Syrenova, T.E. Morphology of traveling wave disturbances recorded in Eastern Siberia in 630 nm atomic oxygen emission / Syrenova T.E., Beletsky A.B., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Vasilyev R.V. // Atmosphere. - 2022. - 13(2). - 198. <https://doi.org/10.3390/atmos13020198>.

Публикации в других изданиях:

1. Белецкий, А. Б. Комплекс оптических инструментов на высокоширотной станции "Исток" ИСЗФ СО РАН / Белецкий А. Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В., Сыренова Т. Е., Алешков В. М., Черепанов В.Б // XXII Междунар. Симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы". Томск, 30 июня- 3 июля 2016г.: материалы Томск, 2016. - С. 162-С. 167. - CD-ROM.

2. Белецкий, А.Б. Анализ возмущений в верхней атмосфере на основе данных одновременных наблюдений радиофизическими и оптическими методами / Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Васильев Р.В., Михалев А.В., Ратовский К.Г., Толстиков М.В., Леонович В.А., Сыренова Т.Е., Ташлыков В.П. // Сборник тезисов докладов Четырнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса": Электронный сборник тезисов докладов, Москва, 14–18 ноября 2016 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2016. – с. 388.

3. Белецкий, А.Б. Оптические наблюдения среднеширотного сияния 17 марта 2015 г. / Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Сыренова Т.Е., Татарников А.В., Ташлыков В.П. // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". 14-18 ноября 2016 г., Москва, ИКИ РАН: тез.докл.М., 2016. - с.389.

4. Сыренова, Т.Е. Вариации излучения верхней среднеширотной атмосферы в периоды высокой геомагнитной активности / Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Подлесный С.В. // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск: 2017. - с. 290–292.

5. Белецкий, А.Б. Вариации излучения верхней среднеширотной атмосферы в периоды высокой геомагнитной активности / Белецкий А.Б., Сыренова Т.Е., Тащилин М.А., Михалев А.В., Когогин Д.А. // Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 2017, Институт космических

исследований, г. Москва - с.411.

6. Beletskii, A.B. Some results of synchronous observations of optical and magnetic variations in auroral latitudes / Beletskii A.B., Rakhmatulin R.A., Taschilin M.A., Pashinin A.Yu., Syrenova T.Ye., Mikhalev A.V., Vasilev R.V. // 14th China-Russia Space Weather Workshop, 5-9 nov, 2018, Haikou.

7. Белецкий, А.Б. Результаты синхронных наблюдений оптических и магнитных вариаций в авроральных широтах / Белецкий А.Б., Рахматулин Р.А., Пашинин А.Ю., Сыренова Т.Е. // XVI Всероссийская Открытая конференция «Современные Проблемы Дистанционного Зондирования Земли Из Космоса», 12-16 ноября 2018, ИКИ, г. Москва - с. 461.

8. Михалев, А.В. Долгоживущие метеорные следы, сформированные взрывами крупных метеороидов / Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Еселевич М.В., Иванов К.И., Комарова Е.С., Подлесный А.В., Подлесный С.В., Сыренова Т.Е. // XVI Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса», 12-16 ноября 2018, ИКИ, г. Москва - с. 476.

9. Beletskii, A.B. Short bursts of photometric signal during auroral atmosphere radiation / Beletskii A.B., Vasilev R.V., Syrenova T.Ye., Rakhmatulin R.A., Mikhalev A.V., Pashinin A.Yu., Oinats A.V., Shiokawa K., Nishitani N. // Physics of auroral phenomena, 42nd annual seminar. Abstracts. 11 – 15 march 2019, Apatity.

10. Сыренова, Т.Е. Проявления АГВ в верхней среднеширотной атмосфере земли, зарегистрированные оптическими методами / Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б. // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». г. Иркутск, 2019. - с. 382–383.

11. Сыренова, Т.Е. Морфология параметров перемещающихся возмущений в излучении атмосферных эмиссий в регионе Восточной Сибири / Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Михалев А.В. // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 11–15 ноября 2019, ИКИ РАН, Москва. С. 222. DOI 10.21046/17DZZconf-2019a.

12. Белецкий, А.Б. Автоматическая идентификация перемещающихся волновых возмущений в излучении атмосферных эмиссий по данным широкоугольных оптических систем / Белецкий А.Б., Сыренова Т.Е., Подлесный С.В., Васильев Р.В. // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса» 11–15 ноября 2019, ИКИ РАН, Москва. С. 16. DOI 10.21046/17DZZconf-2019a.

13. Белецкий, А.Б. Результаты опытной эксплуатации макета широкоугольной оптической системы, предназначенного для регистрации пространственного распределения интенсивности атмосферных эмиссий / Белецкий А.Б., Чупраков С.А., Сыренова Т.Е., Васильев Р.В., Михалев А.В., Токарева Л.С. // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 11–15 ноября 2019, ИКИ РАН, Москва. С. 17. DOI 10.21046/17DZZconf-2019a.

14. Syrenova, T.E. Reconstruction of long-lived meteor track spatial characteristics on all-sky cameras / Syrenova T.E., Beletsky A.B., Vasilyev R.V., Mikhalev A.V. // Physics of auroral phenomena. 43rd Annual Seminar Abstracts, 10 – 13 March 2020. PGI-20-01-140, p. 53.

15. Syrenova, T. A technique for reconstructing the spatial characteristics of a long-lived meteor trails on all-sky cameras / Syrenova T., Vasilyev R., Beletsky A., Mikhalev A., Eselevich M. // EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-1168, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-1168>.

16. Сыренова, Т.Е. Оценка параметров метеорного следа на основе данных двухпозиционных оптических наблюдений / Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Михалев А.В. // Сборник тезисов докладов. Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: тезисы докладов XXVI Международного симпозиума. 06-10 июля 2020 г., Москва.

17. Сыренова, Т.Е. Географическая привязка кадров широкоугольных оптических систем / Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 16–20 ноября 2020, ИКИ РАН, Москва. С. 49.

18. Белецкий, А.Б. Оценка прозрачности атмосферы на основе данных широкоугольных оптических систем, предназначенных для регистрации свечения ночного неба в узких спектральных диапазонах / Белецкий А.Б., Сыренова Т.Е., Тащилин М.А., Васильев Р.В., Михалев А.В., Татарников А.В., Подлесный С.В., Щеглова Е.С. // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 16–20 ноября 2020, ИКИ РАН, Москва. С. 135.

19. Иванова, В.А. Регистрация волновых возмущений на высотах слоя Es по данным «Ионозонда-МС» и оптических инструментов ГФО ИСЗФ СО РАН в 2018 г. / Иванова В.А., Ойнац А.В., Подлесный А.В., Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Пономарчук С.Н., Рыбкина

А.А. // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 16–20 ноября 2020, ИКИ РАН, Москва. с. 152.

20. Васильев, Р.В. Совместные спутниковые и наземные исследования атмосферы Земли в ИСЗФ СО РАН / Васильев Р.В., Артамонов М. Ф., Белецкий А.Б., Веснин А.М., Лебедев В.П., Михалёв А.В., Подлесный С.В., Саункин А.В., Сыренова Т.Е. // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 16–20 ноября 2020, ИКИ РАН, Москва. с. 391.

21. Syrenova, T. AGW manifestations in the Earth neutral atmosphere and ionosphere / Syrenova T., Beletsky A. // EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-4243, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-4243>, 2021.

22. Сыренова, Т.Е. Автоматическая идентификация волновых структур по данным камеры всего неба / Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б. // Распространение радиоволн: труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции [Электронный ресурс]: научное электронное издание. — Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2021. - с. 182-184.

23. Белецкий, А.Б. Методика оценки прозрачности атмосферы в темное время суток по данным широкоугольных оптических систем / Белецкий А.Б., Сыренова Т.Е., Подлесный С.В., Тащилин М.А., Васильев Р.В., Татарников А.В. // Сборник тезисов докладов “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXVII Международного Симпозиума”. - 2021. - Томск: Изд-во ИОА СО РАН. -150 с.

24. Белецкий, А.Б. Предварительные результаты оценки прозрачности атмосферы в темное время суток по данным оптического комплекса Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН / Белецкий А.Б., Сыренова Т.Е., Татарников А.В., Щеглова Е.С., Тащилин М.А., Васильев Р.В. // Материалы 19-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 15–19 ноября 2021, ИКИ РАН, Москва, с. 149.

25. Белецкий, А.Б. Методика оценки прозрачности атмосферы в темное время суток по данным широкоугольных наземных камер / Белецкий А.Б., Сыренова Т.Е., Татарников А.В., Васильев Р.В., Щеглова Е.С. // Материалы 19-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 15–19 ноября 2021, ИКИ РАН, Москва, с. 10.

26. Иванова, В.А. Среднемасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения на высотах области E по данным инструментов ГФО ИСЗФ СО РАН / Иванова В.А., Ойнац

А.В., Подлесный А.В., Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Пономарчук С.Н., Рыбкина А.А. // Материалы 19-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 15–19 ноября 2021, ИКИ РАН, Москва, с. 408.

27. Михалев, А.В. Оптические эффекты полета ракеты-носителя «Протон-М» со спутником «Ямал-601» в дальней от места старта зоне / Михалев А.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П., Сыренова Т. Е., Хахинов В.В. // Космические исследования. - 2022. - Т. 60, No 2. - С. 1–9. DOI: 10.31857/S0023420622020054.

Список цитируемой литературы:

1. Hines, C.O. The upper atmosphere in motion / C.O. Hines // AGU. Washington D.C. – 1974. – p. 1027.

2. Moré J.J. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. In: Watson G.A. (eds) Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics. - 1978. - vol. 630. Springer, Berlin, Heidelberg.

3. Swenson, G.R. OH emission and gravity waves (including a breaking wave) in all-sky imagery from Bear Lake UT / Swenson G.R., Mende S.B. // Geophys. Res. Lett. - 1994. - N. 21. - pp. 2239–2242.

4. First observations of long-lived meteor trains with resonance lidar and other optical instruments / Kelley M. C., Gardner C., Drummond J., Armstrong T., Liu A., Chu X., Papen G., Kruschwitz C., Loughmiller C., Grime B., and Engelman J. // Geophysical Research Letters. - 2000. - VOL. 27, NO. 13. - pp. 1811-1814.

5. Михалев А.В. Долгоживущие метеорные следы, сформированные при радиальном расширении крупных метеороидов // Космические исследования. - 2021. - Т. 59, № 6. - с. 498-503.