

**НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ
НАЦИОНАЛЬНОГО ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

**SCIENTIFIC GOALS OF OPTICAL INSTRUMENTS
OF THE NATIONAL HELIOGEOPHYSICAL COMPLEX**

Р.В. Васильев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, roman_vasilyev@iszf.irk.ru
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, roman_vasilyev@iszf.irk.ru*

М.Ф. Артамонов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artamonov.maksim@iszf.irk.ru*

А.Б. Белецкий

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, beletsky@iszf.irk.ru*

О.С. Зоркальцева

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, olgak@iszf.irk.ru
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, olgak@iszf.irk.ru*

Е.С. Комарова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, eskomarik@gmail.com
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, eskomarik@gmail.com*

И.В. Медведева

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ivmed@iszf.irk.ru*

А.В. Михалев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mikhalev@iszf.irk.ru
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, mikhalev@iszf.irk.ru*

С.В. Подлесный

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, step8907@mail.ru*

К.Г. Ратовский

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru*

Т.Е. Сыренова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, angata@iszf.irk.ru*

М.А. Ташчилин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, miketash@iszf.irk.ru*

И.Д. Ткачев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, tid007@iszf.irk.ru*

R.V. Vasilyev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, roman_vasilyev@iszf.irk.ru
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, roman_vasilyev@iszf.irk.ru*

M.F. Artamonov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, artamonov.maksim@iszf.irk.ru*

A.B. Beletsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, beletsky@iszf.irk.ru*

O.S. Zorkaltseva

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, olgak@iszf.irk.ru
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, olgak@iszf.irk.ru*

E.S. Komarova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, eskomarik@gmail.com
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, eskomarik@gmail.com*

I.V. Medvedeva

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ivmed@iszf.irk.ru*

A.V. Mikhalev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mikhalev@iszf.irk.ru
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, mikhalev@iszf.irk.ru*

S.V. Podlesny

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, step8907@mail.ru*

K.G. Ratovsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru*

T.E. Syrenova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, angata@iszf.irk.ru*

M.A. Tashchilin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, miketash@iszf.irk.ru*

I.D. Tkachev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, tid007@iszf.irk.ru*

Аннотация. Исследования верхней атмосферы должны выполняться с использованием оптических фотометрических и спектрометрических средств. Современные устройства позволяют вести прецизионную фотометрию свечения ночной атмосферы с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением. Получаемые параметры свечения позволяют определять физико-химические свойства

Abstract. Studies of the upper atmosphere have to be performed using optical photometric and spectrometric means. Modern devices allow precise photometry of the glow of the night atmosphere — airglow — with high temporal spatial and spectral resolution. As a result, the obtained airglow parameters make it possible to determine the physicochemical properties of the upper atmosphere and observe their variation under the influ-

верхней атмосферы, наблюдать их вариации под действием различных факторов. Создающийся в Восточной Сибири Национальный гелиогеофизический комплекс должен иметь в своем составе определенный набор современных оптических инструментов. В работе обсуждаются основные явления, которые будут исследоваться оптическими инструментами комплекса, изложены сведения о составе и задачах этих инструментов, приведены результаты предварительных исследований, выполненных с помощью прототипов инструментов. В результате исследований установлено наличие существенного (около 10 м/с) вертикального ветра на разных высотах (100 и 250 км), продемонстрирована важность его учета для исследования вертикальной динамики заряженной компоненты. Многолетняя динамика вертикального ветра на высоте около 100 км имеет выраженный сезонный ход и отсутствие суточных вариаций, в то время как на высоте 250 км она имеет выраженный суточный ход, наиболее ярко проявляющийся в зимнее время. Это говорит о предполагаемом наличии вертикальных циркуляционных ячеек на разных высотных уровнях. Демонстрируются возможности методов оптической стереоскопии и дифференциального анализа изображений в применении к исследованию быстрых светящихся образований и проведению активных наземных и космических экспериментов по модификации ионосферы Земли. Приведены результаты определения трехмерной картины долгоживущего метеорного следа с использованием двух широкоугольных камер. Предложен алгоритм, который позволяет получить стереоизображение происходящих в верхней атмосфере событий, зарегистрированных одновременно с разных точек наблюдений. Показано, что совместная работа инструментов всего комплекса и развитие сотрудничества со сторонними организациями являются достаточно хорошим направлением дальнейшего исследования вертикальной динамики верхней атмосферы Земли и явлений космической погоды.

Ключевые слова: свечение верхней атмосферы, фотометр, дифракционный спектрометр, интерферометр Фабри—Перо, камера всего неба, стереоскопия, горизонтальный ветер, вертикальный ветер, метеоры, атмосферное электричество, искусственная модификация ионосферы.

ence of various factors. The National Heliogeophysical Complex, which is being created in Eastern Siberia, is therefore to include a certain set of modern optical instruments. The paper presents the main phenomena that will be investigated by the optical instruments of the complex, provides information on their composition and scientific goals, presents the results of preliminary studies performed using a prototype of the instruments. As a result of the studies, the presence of a significant (about 10 m/sec) vertical wind at various altitudes (100 and 250 km) was established, the importance of taking into account the vertical wind to study the vertical dynamics of the charged component was demonstrated. The long-term dynamics of the vertical wind at an altitude of about 100 km has a pronounced seasonal variations and the absence of diurnal variations, whereas the dynamics of the vertical wind at an altitude of 250 km has a pronounced diurnal variations, which is mostly clearly defined in winter. This suggests the presumed presence of vertical circulation cells at various altitude levels. The possibilities of optical stereoscopy and differential image analysis methods are demonstrated, as applied to the study of fast luminous formations and conducting active ground and space experiments to modify Earth's ionosphere. We report the results of the determination of a three-dimensional picture of a long-lived meteor track with the use of two wide-angle cameras. We propose an algorithm that allows us to get a stereo image of events occurring in the upper atmosphere, recorded simultaneously from different observation points. The joint work of the tools of this complex and the development of cooperation with third-party organizations are shown to be a good enough direction for further study of the vertical dynamics of Earth's upper atmosphere and space weather phenomena.

Keywords: airglow, photometer, diffraction spectrometer, Fabry—Perot interferometer, all-sky camera, stereoscopy, horizontal wind, vertical wind, meteors, atmospheric electricity, artificial modification of the ionosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Свечение атмосферы Земли происходит в результате различных процессов: химических реакций, электрических явлений, термомеханического воздействия и других, проявляющихся в большей или меньшей степени практически во всем ее объеме. Наблюдения и исследования свечения атмосферы Земли важны для реализации задач исследования ее структуры и динамики, поскольку характеристики свечения подвержены вариациям, возникающим в результате движения воздушных масс, изменения их температуры и состава. Поэтому строящийся в Восточной Сибири Национальный гелиогеофизический комплекс (НГК) для исследований в области сол-

нечно-земной физики и космической погоды, должен иметь в своем составе средства регистрации оптического излучения атмосферы. Очевидно, что наиболее эффективно собственное свечение атмосферы будет регистрироваться ночью в отсутствие основного источника фона — прямого солнечного излучения. Свечение ночного неба содержит несколько компонент: свечение объектов дальнего космоса — звезд и галактик; солнечный свет, отраженный и рассеянный на планетах солнечной системы и газопылевой составляющей, окружающей Землю; вспышки сторающих в атмосфере метеоров; свечение, вызванное атмосферным электричеством; свечение, обусловленное химическими реакциями, протекающими в верх-

ней атмосфере. Наиболее интересными для исследований в области солнечно-земной физики и космической погоды являются три последних явления.

Свечение, вызываемое химическими реакциями с участием озона, водорода, атомарного кислорода, ионов молекулярного кислорода и оксида азота, а также элементов метеорного происхождения, происходит в результате излучательной релаксации возбужденных продуктов этих реакций — нейтральных атомов кислорода, натрия, калия и молекул гидроксила [Шефов и др., 2006]. Хемилюминесцентное свечение верхней атмосферы практически непрерывно во времени и обладает широким спектром, состоящим из полос и линий излучения различных элементов, составляющих атмосферу. Особенности протекающих реакций, различные времена жизни, определяющие условия безызлучательного гашения возбужденных нейтральных компонент, приводят к распределению спектрального состава свечения по высоте — стратификации определенных линий свечения в мезосфере и нижней термосфере. Таким образом, наблюдения характеристик спектрального состава и его динамики чрезвычайно привлекательны для исследования высотных профилей параметров ночной атмосферы Земли.

Свечение от молний появляется вследствие мощного импульса электрического тока в тропосфере, возникающего между заряженными облаками или между облаком и поверхностью земли. В нижней атмосфере этот ток вызывает нагрев газа и возникновение горячей светящейся плазмы, в то время как в верхней атмосфере (выше 80 км) свечение возникает в результате быстрого изменения электрического поля в холодной плазме из-за тропосферного электрического разряда [Соогау, 2015]. Спектр электромагнитного излучения тропосферных молний довольно широкий — от длинных радиоволн до рентгена. Спектральный состав оптического свечения высотных молниевых разрядов (эльфы, спрайты и др.) содержит преимущественно линии излучения вибрационных переходов молекулярного азота, лежащие в красной и инфракрасной частях спектра видимого излучения [Lu et al., 2017]. Изменения химического состава и физических условий мезосферы — области максимального развития высотных молниевых разрядов — должны оказывать существенное влияние на их параметры, поэтому исследование этих спорадических явлений перспективно для изучения верхней атмосферы, событий космической погоды и солнечно-земных связей.

Следует отметить, что сама по себе тропосферная грозовая активность также достаточно интересна для исследований, связанных с влиянием солнечной активности на погоду и климат Земли [Siingh et al., 2011; Nicoll, 2014]. Влияние, оказываемое на земную атмосферу солнечными корональными выбросами массы и связанными с ними потоками плазмы, заключается в изменении химического баланса малых составляющих атмосферы, что может приводить к изменению динамики образования атмосферного аэрозоля, вариациям облачного покрова, нарушению радиационного баланса и т. п. Как следствие,

эти процессы могут изменять условия формирования грозовых областей, что проявляется во взаимосвязи грозовой и геомагнитной активности [Owens et al., 2015; Wu et al., 2019].

Метеорные явления обычно наблюдаются на высотах от 80 до 120 км. Характер взаимодействия метеорного тела с атмосферой зависит от его начальной массы, скорости и состава. Набегающий поток частиц раскаляет метеор, и в результате наблюдается кратковременная яркая вспышка длительностью от долей до единиц секунд. Разрушение метеорного тела в разреженной атмосфере происходит путем абляции, или испарения атомов с его поверхности под действием налетающих частиц воздуха. После пролета метеора остается ионизированный светящийся метеорный след длиной от нескольких сотен метров до нескольких десятков километров, который затем смещается (дрейфует) под действием воздушных течений. Такие следы в зависимости от их состава (пыль, газ, плазма) могут наблюдаться в атмосфере от нескольких секунд до нескольких часов [МакКинли, 1964; Kelley et al., 2000, Clemesha et al., 2001]. Спектр свечения метеоров состоит главным образом из эмиссионных линий атомных спектров со значительно более слабыми молекулярными полосами. Наиболее интенсивные линии в спектрах принадлежат атомам и ионам Fe, Na, Mg, Mg⁺ Ca, Ca⁺, Cr, Si⁺, N, O [Астапович, 1958]. Спектр свечения долгоживущих метеорных следов состоит преимущественно из дублета натрия 589.0, 589.6 нм [Kelley et al., 2000], но есть указания, что спектральный состав этих образований содержит также свечение основных компонент верхней атмосферы [Clemesha et al., 2001]. Поскольку максимум оптического свечения в результате падения метеоров реализуется в нижней термосфере и мезосфере, вариации интенсивности и спектрального состава свечения метеоров, а также динамику долгоживущих метеорных образований можно использовать для получения дополнительных сведений о состоянии верхней атмосферы.

В ИСЗФ СО РАН исследования свечения верхней атмосферы в высоких широтах начались около пятидесяти лет назад на Норильской комплексной магнитно-ионосферной станции (70° N, 88° E) [Горелый и др., 1977] и более 30 лет назад — в средних широтах в Геофизической обсерватории (ГФО) вблизи с. Торы (52° N, 103° E) [Ермилов, Михалев, 1989; Ermilov, Mikhalev, 1991]. На основе сведений о свечении атмосферы, оперативных и полученных за несколько последних десятилетий, проводится сравнительный анализ вариаций интенсивности свечения с динамикой различных явлений в нижней и средней атмосфере, извлекается информация о развитии среднеширотных сияний, температуре и скорости ветра в нижней термосфере и мезопаузе, волновых процессах верхней атмосферы различных масштабов. Устройства, которыми в настоящее время оснащены геофизические обсерватории ИСЗФ, — достаточно современные призменные и дифракционные спектрометры, регистрирующие интенсивности основных линий хемилюминесцентного свечения верхней атмосферы; широкоугольные цветные ка-

меры; сверхширокоугольная система, регистрирующая излучение атомарного кислорода на длине волны 630 нм (камера всего неба); интерферометр Фабри—Перо, адаптированный для аэрономических исследований; солнечный фотометр системы AERONET. Следует отметить, что состав существующих оптических инструментов не позволяет проводить полноценные одновременные наблюдения параметров различных спектральных линий и стереоскопико светящихся образований для детального исследования вертикальной динамики атмосферы. Кроме того, чувствительность регистрирующих элементов в большинстве устройств достаточна только для относительно длительных экспозиций порядка нескольких минут, в то время как некоторые современные задачи исследования верхней атмосферы требуют секундного и субсекундного временного разрешения.

Создание НГК — нового комплексного научного объекта в Байкальском регионе — включает значительное обновление состава существующих оптических инструментов ИСЗФ СО РАН. Это приведет к существенному расширению существующих наблюдательных возможностей. Появится возможность проведения одновременных наблюдений параметров основных линий свечения атмосферы, пространственной картины свечения в разных спектральных линиях. Разнесение существующих и новых систем на некоторое расстояние позволит выполнять стереоскопические исследования светящихся образований. Оптические и радиофизические наблюдения единого объема атмосферы позволят исследовать взаимодействие нейтральной и заряженной компонент верхней атмосферы в различных геофизических условиях. Мультиспектральные оптические наблюдения, лидарные и радарные наблюдения позволят получить вертикальную картину взаимодействия заряженной и нейтральной компонент практически от стратосферы до термосферы. Модификация ионосферы мощным коротковолновым излучением нового нагревного стенда, создающегося в рамках НГК, или химико-физическим воздействием различными спутниковыми средствами, а также сопровождение этих исследований совместными оптическими и радиофизическими наблюдениями высотных профилей параметров атмосферы позволят на новом уровне исследовать процессы в верхней атмосфере.

В работе обсуждаются состав вводимых в эксплуатацию оптических инструментов НГК и их роль в проведении будущих исследований верхней атмосферы, космической погоды и солнечно-земной физики.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Научные задачи оптических инструментов НГК относятся к большому кругу явлений и процессов, реализуемых в верхней атмосфере и ионосфере Земли [Шефов и др., 2006]. Среди наиболее актуальных можно отметить исследование сильных геомагнитных бурь, зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП), солнечной активности, климатических

изменений, других геофизических событий и антропогенного влияния.

Оптические инструменты НГК являются комплексом, обеспечивающим решение указанных научных задач как минимум в двух направлениях. Одним из них является исследование особенностей и характеристик свечения, естественным образом возникающего в атмосфере Земли, и сопоставление наблюдаемых параметров свечения с физико-химическими процессами в атмосфере под воздействием внешних и внутренних факторов (солнечной и геомагнитной активности, взаимодействия океана и атмосферы Земли, литосферных процессов). Другим направлением является сопровождение комплексных активных исследований, связанных с модификацией верхней атмосферы радиофизическими устройствами, спутниковыми и ракетными средствами.

Для получения максимальной эффективности работы наблюдательных средств НГК оптические инструменты комплекса размещаются в ГФО, где их области обзора будут максимально пересекаться с областями обзора существующих и создающихся средств исследования верхней атмосферы (рис. 1). Видно, что камеры всего неба и интерферометры Фабри—Перо, расположенные в ГФО, фактически будут наблюдать общий объем атмосферы с радаром некогерентного рассеяния (НР), мезосферно-стратосферным (МС) лидаром, ионозондами, приемниками глобальных навигационных спутниковых систем. Рассмотрим чуть более подробно возможности исследования некоторых геофизических явлений, формирующих космическую погоду или зависящих от нее, при помощи оптических инструментов в совокупности с другими инструментами НГК.

Геомагнитные бури относятся к важнейшим геофизическим явлениям солнечного происхождения, вызывающим различные возмущения в атмосфере Земли. Поведению эмиссий верхней атмосферы во время геомагнитных возмущений посвящено достаточно большое количество работ (см., например, [Shiokawa et al., 2005]). При геомагнитных возмущениях на средних широтах отмечаются усиления интенсивности эмиссий атомарного кислорода, преимущественно в линии 630 нм, сильные геомагнитные бури ($K_p \geq 8-9$, $Dst < -200$) нередко сопровождаются усилением эмиссии 557.7 нм. Поскольку свечение в разных линиях возбуждается на разных высотах, используя наблюдения пространственной картины свечения при помощи камер всего неба или отслеживая динамику ветра и температуры при помощи интерферометров Фабри—Перо одновременно в разных спектральных линиях, можно будет создать полную пространственную картину распространения возмущения, в том числе и по высоте. Подключение радиофизических средств к этим наблюдениям позволит определить поведение заряженной компоненты верхней атмосферы. Использование существующих магнитометрических станций в совокупности с новыми многоканальными фотометрами позволит исследовать быстрые, секундные и субсекундные особенности протекающих процессов, как правило, связанных с динамикой частиц, выпадающих из радиационных поясов. В результате

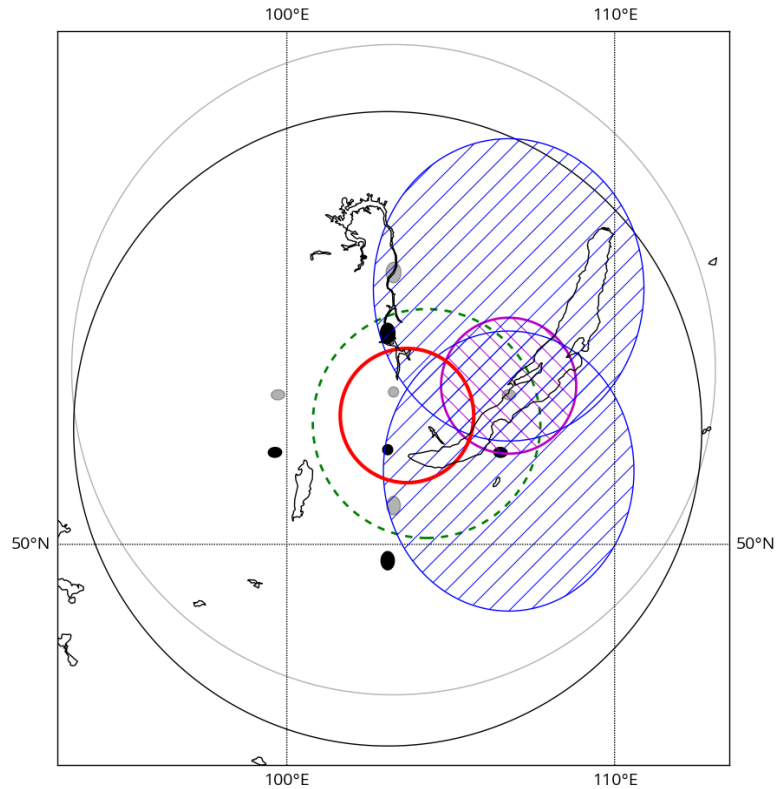


Рис. 1. Проекция полей зрения инструментов НГК на высоте 250 км на поверхность Земли. Красная утолщенная окружность — нагревный стенд ИКАР-АИ; синие эллипсы с правой штриховкой — НР-МСТ-радар; фиолетовая окружность с левой штриховкой — МС-лидар; зеленая штриховая окружность — существующий ионозонд DPS-4; черная окружность — камера всего неба, черные закрашенные эллипсы — интерферометр Фабри—Перо в ГФО; серая окружность — камера всего неба, серые эллипсы — интерферометр Фабри—Перо, вынесенные из обсерватории для стереоскопических оптических наблюдений

таких комплексных исследований можно будет определять степень взаимного влияния заряженной и нейтральной компонент верхней атмосферы, особенности физико-химических процессов, протекающих в среднеширотной верхней атмосфере во время геомагнитных бурь.

Стратосферная динамика, так же как и геомагнитные бури, оказывает значительное влияние на процессы в верхней атмосфере. Возникающие практически ежегодно зимние внезапные стратосферные потепления (ВСП) — спонтанные нарушения циркуляции стратосферы, в зимнем полушарии сопровождающиеся значительным, до нескольких десятков кельвин, увеличением температуры стратосферы — вызывают генерацию дополнительной волновой энергии в атмосфере, изменяют условия распространения волн различного масштаба [Pedatella et al., 2018]. Вследствие этого происходит изменение ветрового и температурного режима мезосферы и нижней термосферы. Как и в случае с геомагнитными бурями, исследование термодинамических характеристик верхней атмосферы, пространственной картины свечения в разных спектральных линиях (гидроксила, натрия, атомарного кислорода) и динамики заряженной компоненты радиофизическими средствами во время ВСП предоставит возможность построения наиболее полной пространственной картины динамики верхней атмосферы. Поскольку волновые процессы играют важную роль в динамике

ВСП, широкоугольные камеры всего неба, работающие в разных спектральных диапазонах, позволят исследовать вертикальную динамику волновых образований в мезосфере и нижней термосфере. Для этих исследований следует отметить также достаточно важную роль МС-лидара НГК, поскольку возможность исследования вертикальных профилей параметров верхней стратосферы (диапазон высот 50–80 км) способны дать только устройства подобного плана.

Тропосферные процессы и взаимодействие океана и атмосферы проявляются в вариациях оптического свечения верхней атмосферы на временных масштабах от микросекунд (грозовая активность и высотные молниевые разряды) до нескольких лет (квазидвухлетние колебания экваториального зонального ветра (QBO), Эль-Ниньо Южное колебание (ENSO)). Исследование быстрых оптических явлений в верхней атмосфере, связанных с атмосферным электричеством, их динамики и морфологии удобно выполнять при помощи быстрых фотометров и камер всего неба. Наиболее эффективно регистрация высотных молниевых разрядов будет проводиться при объединении оптических и радиофизических средств. Существующие грозопеленгационные системы, такие как WWLN, VAISALLA, грозопеленгационная сеть ФГУП «Авиалесоохрана» «Веря-МР», грозопеленгационная сеть ИКФИА и другие, предоставляют информацию о координатах областей с грозами.

С использованием этой информации камеры всего неба позволят оценить наличие облачности и морфологически определять наличие высотных молниевых разрядов, а быстрые фотометры предоставят информацию о динамике интенсивности регистрируемого свечения. Возможность оперативного управления фотометрами НГК, позволяющая изменять направление регистрации в зависимости от положения области с грозой, значительно повысит эффективность таких наблюдений. Продолжение наблюдений основных эмиссионных линий в совокупности с накопленными ранее сведениями об интенсивности эмиссий позволит исследовать медленные вариации и тренды физико-химических параметров верхней атмосферы под действием медленных вариаций тропосферной циркуляции. Кроме того, сопоставление полученных сведений о долговременных изменениях интенсивности свечения верхней атмосферы с изменениями газового и аэрозольного состава тропосферы поможет понять степень влияния этих факторов на верхнюю атмосферу, определить особенности вертикального транспорта различных составляющих атмосферы.

В 70–80 гг. прошлого столетия для среднеазиатской сейсмической зоны были проанализированы характеристики собственного свечения ночной атмосферы в эмиссиях кислорода [OI] 557.7 и 630 нм, натрия Na 589.3 нм и полосах гидроксила OH (8–3) в связи с сейсмической активностью. В результате было показано, что в период подготовки и развития землетрясений в указанных эмиссиях наблюдаются возмущения различных временных масштабов (см., например, [Торошелидзе, Фишкова, 1988]). Позднее аналогичное проявление сейсмической активности в излучении верхней атмосферы было выявлено и в Байкальской рифтовой зоне [Mikhalev et al., 2001; Михалев, 2016]. Использование камер всего неба, интерферометров Фабри—Перо, дифракционных спектрометров позволит установить более полную картину процессов, связывающих литосферу и верхнюю атмосферу. Помимо интенсивности свечения основных линий в верхней атмосфере, достаточно интересно будет взглянуть на изменение температурной и ветровой динамики, картины волновых возмущений, динамики малых компонент свечения. Мультиспектральные наблюдения, как в случае с геомагнитными бурями и ВСП, позволят определить характер вертикальной динамики этих явлений.

Метеоры — явления, наблюдающиеся каждую ясную ночь, поэтому их можно рассматривать как способ долговременного, непрерывного мониторинга состояния атмосферы Земли. Стереоскопические или базисные наблюдения позволяют измерять высоты сгорания метеоров и исследовать зависимость плотности атмосферы от высоты как реакцию на солнечную активность или внутренние причины увеличения толщины атмосферы. Этим способом можно определить также характер нормализации параметров ее внешних слоев после прекращения внешнего воздействия. Наблюдения дрейфа метеорных следов еще в прошлом веке указали на наличие быстрых горизонтальных воздушных течений в области их возникновения (высота 80–110 км), дохо-

дящих до 300 м/с (в среднем 50–70 м/с). Астапович [Астапович, 1958], исследуя 119 следов, обнаружил, что в течение суток вектор дрейфа следует направлению на Солнце. Это означало существование периодических перемещений воздушных масс верхней атмосферы и соответствовало солнечно-суточным геомагнитным вариациям из-за перемещения зарядов в E-слое [Chapman, 1940; Nwankwo et al., 2018]. На высоте обычного слоя E часто возникает спорадический слой E_s, появление которого в основном связывают с метеорной активностью [Мартыненко, 1967; Ma et al., 2019] или ветровым сдвигом [Fabre et al., 2018]. Скорость диссипации метеорных следов связана с давлением и температурой окружающих слоев воздуха и позволяет оценить их величину [Воронцов-Вельяминов, 1969; Oppenheim, Dimant, 2014]. Взаимодействие метеорных частиц с земной атмосферой на данный момент изучено лишь в отношении абляции метеорных тел при прохождении воздушных слоев. Вопрос влияния притока космической пыли на верхние слои атмосферы пока остается открытым. Привнесение метеорного вещества в разреженную верхнюю атмосферу способно заметно изменять ее химический состав, особенно в отношении тяжелых элементов. Регулярные наблюдения позволяют исследовать связь между изменениями химического состава и метеорными потоками. Существует ряд работ, демонстрирующих усиление атмосферной эмиссии в линиях разных элементов во время действия сильных метеорных потоков [Шефов и др., 2006]. Также есть основания считать, что химический состав частиц отдельных потоков идентичен и потому различные потоки могут преимущественно давать вклад строго определенных элементов [Бабаджанов, Обрубов, 1991; Rudawska et al., 2020]. На высоте сгорания метеоров возникает еще одно уникальное и до сих пор необъяснимое явление природы — серебристые облака. Ряд гипотез о возникновении этого явления не позволяет сделать однозначных выводов о его природе. Существует метеорная гипотеза, согласно которой поступающие из космического пространства в верхние слои атмосферы метеорные частицы становятся ядрами конденсации. Регулярные наблюдения метеорных потоков и серебристых облаков позволят ответить на вопрос об их взаимосвязи. Таким образом, комплексные оптические и радиофизические наблюдения метеоров, сопровождающих их появление в верхней атмосфере, и фоновых параметров средствами НГК позволят получить новые сведения о природе метеорных явлений, уточнить предположения об образовании спорадических заряженных слоев и серебристых облаков.

При исследованиях собственного излучения верхней атмосферы Земли необходимо учитывать спектральную прозрачность атмосферы и другие элементы астроклимата и оптической погоды. Теоретическим вопросам распространения излучения в атмосфере Земли применительно к собственному излучению верхних слоев атмосферы посвящено достаточно большое количество работ. Например, в работе [Гаврилова, 1987] теоретически решалась задача о диффузном пропускании атмосферой из-

лучения от сферического светящегося слоя применительно к кислородным эмиссиям 557.7 и 630.0 нм. Был сделан вывод, что интенсивности свечения верхних слоев, полученные при разной прозрачности атмосферы, сильно отличаются друг от друга и для правильного учета атмосферного ослабления необходимо параллельно с измерениями интенсивности свечения проводить измерения прозрачности атмосферы. Существование аэрозоля на разных высотах атмосферы может влиять на спектральное распределение сумеречного и ночного свечения атмосферы за счет составляющей непрерывного фона, зависящего от состояния атмосферы и образующегося в результате многократно рассеянной солнечной радиации. В случае выделения сплошного спектра собственного излучения верхней атмосферы учет составляющей непрерывного фона целесообразно проводить с учетом динамики аэрозольных образований и оптических характеристик нижней атмосферы [Михалев, Тацилин, 2007]. Исследованию радиационных характеристик аэрозоля в ГФО посвящена коллективная монография [Исследование..., 2012]. С помощью солнечного фотометра CIMEL-318, входящего в состав наземной сети станций AERONET, была исследована сезонная изменчивость аэрозольной оптической толщи (АОТ) и влагосодержания атмосферы: сезонные вариации, годовой и суточный ход спектральной АОТ. В работе [Михалев и др., 2019] с использованием ранее полученных спектральных характеристик АОТ и влагосодержания атмосферы, проведен анализ влияния атмосферного аэрозоля на результаты наземных наблюдений собственного излучения верхней атмосферы в эмиссионных линиях атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630.0 нм. Отмечается спектральная зависимость коэффициентов корреляции между интенсивностями эмиссий 557.7, 630.0 нм и АОТ и выявлен ее нелинейный характер: рост коэффициентов корреляции при малых значениях АОТ (до 0.5) и спад при больших замутнениях. Следует подчеркнуть, что в обеих работах данные по прозрачности атмосферы были получены с помощью солнечного фотометра и в общем случае могут не отражать динамику аэрозоля в темное время суток. Мультиспектральные оптические и лидарные наблюдения с помощью новых инструментов НГК позволят исследовать сезонную изменчивость спектральных АОТ в темное время суток и вести регистрацию собственного излучения верхней атмосферы с поправками на прозрачность атмосферы в любых условиях оптической погоды.

Кроме наблюдения за процессами, протекающими в атмосфере Земли под действием естественных природных факторов, достаточно широко развиты методы активного воздействия на верхнюю атмосферу в целях ее исследования. Наличие ионосферы Земли и развитие мощной коротковолновой передающей техники позволяет выполнять такого рода воздействия при помощи нагрева электронов ионосферы мощным радиоизлучением в диапазоне 1–10 МГц. В рамках НГК создается нагревный стенд ИКАР-АИ (Иркутская коротковолновая антенная решетка активных излучателей), работающий в диапазоне 2.5–6.0 МГц с эффективной излучаемой мощностью

~200 МВт. Хорошо известно, что под действием мощных радиоволн в ионосфере электроны ускоряются до сверхтепловых энергий и в результате ударного возбуждения атомарного кислорода область, облучаемая мощными радиоволнами, начинает светиться [Biondi et al., 1970; Bernhardt et al., 2000]. Параметры свечения, его высота, интенсивность, форма сильно зависят от условий ускорения электронов, поэтому использование разнесенных на некоторое расстояние камер всего неба, работающих в разных спектральных диапазонах, позволит стереоскопическими методами определить характеристики светящейся области, а использование возможностей двухлучевой интерферометрии с помощью радара НР НГК позволит сопоставить размеры мелкомасштабных образований, наблюдаемых оптическими и радиофизическими методами. Отслеживание динамики температуры модифицированной области при помощи интерферометров Фабри—Перо и радара НР позволит независимым образом сопоставить поведение температуры нейтральной и заряженной компонент верхней атмосферы при искусственном воздействии. Таким образом, комплексные оптические и радиофизические исследования верхней атмосферы при помощи НГК позволят по-новому взглянуть на процессы, протекающие в ионосферной плазме, и уточнить их детали. Кроме исследования собственно области с модифицированной ионосферой, ИКАР-АИ и комплекс инструментов НГК даст возможность исследования искусственно генерируемых естественных процессов, например внутренних гравитационных волн и высыпаний этих явлений, полученная благодаря оптическим наблюдениям в разных спектральных диапазонах, контроль циркуляции и температуры атмосферы предоставляют НГК уникальную возможность исследования их вертикальной динамики в различных практически контролируемых условиях.

Помимо воздействия на ионосферу мощными радиоволнами, наличие ракетно-космической техники и орбитальных спутниковых систем даст возможность прямого физико-химического воздействия на верхнюю атмосферу. Энергетика воздействия может варьировать в широких пределах от многокилограммовых горячих сверхзвуковых выбросов топлива маршевых двигателей космических аппаратов до инжекции порядка килограмма химически активных веществ. Такая модификация верхней атмосферы в зависимости от интенсивности и типа выбрасываемого вещества приводит в итоге к модификации химического и ионного состава верхней атмосферы, генерации акустических, инфразвуковых и внутренних гравитационных волн и, как следствие, к появлению светящихся образований. Использование комплекса оптических инструментов НГК в данном случае позволит установить особенности возникающих химико-физических процессов. Температурный и динамический режимы верхней атмосферы, а также их вариации при этом будут определяться интерферометрами Фабри—Перо. Разнесенные камеры всего неба позволят определить высоту светящихся образований, дифракционные спектрометры предоставят

информацию как о поведении естественных атмосферных оптических эмиссий, так и об искусственно инжектированных веществах. Как и с метеорами, вопрос влияния на верхнюю атмосферу распадающихся в верхней атмосфере остатков космических аппаратов, как правило, содержащих химически активные компоненты, остается открытым. Оценить степень влияния человеческой деятельности в околоземном космическом пространстве, особенно в свете последних событий, связанных с началом вывода на околоземную орбиту масштабных группировок телекоммуникационных спутников OneWeb, Starlink, определить химико-физическую природу изменений помогут наземные системы, подобные комплексу оптических инструментов, создающемуся в рамках НГК.

СОСТАВ ОПТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Поскольку спектр свечения верхней атмосферы состоит из линий и полос излучения атомов и молекул газовых компонентов, основные наблюдаемые характеристики — это временная динамика интенсивности и параметров отдельных спектральных составляющих. Для наблюдения интенсивностей спектральных линий используются спектрометры различного типа — дифракционные, призмные и др. Спектральная картина в этих устройствах регистрируется при помощи специализированных высокочувствительных ПЗС-матриц, позволяющих значительно упростить и автоматизировать процесс записи, хранения и обработки спектрограмм. В настоящее время в ГФО используются спектрометры такого типа со спектральным разрешением от 10 до 0.2 нм, способные просматривать диапазон порядка 300–700 нм, и временным разрешением 1–10 мин. Дифракционный спектрометр инфракрасного диапазона (рабочая спектральная область 800–900 нм) с высокочувствительным охлаждаемым цифровым приемником используется для получения спектральных характеристик (интенсивность, температура) эмиссий молекул гидроксила (полоса 6–2, 834.0 нм, высота максимума излучения ~87 км) и атмосферной системы молекулярного кислорода (полоса 0–1, 864.5 нм, высота максимума излучения ~94 км). Измерения проводятся в патрульном режиме с 2008 г. С использованием полученных спектров вычисляется вращательная температура гидроксила, которая соответствует температуре атмосферы на высотах излучающего слоя (область мезопаузы). Интенсивность атмосферных эмиссий молекул OH и O₂ дает информацию о динамических процессах в излучающем слое, а также сведения о концентрации основных атмосферных составляющих. Данные наземных спектральных измерений используются для мониторинга температурного режима верхней атмосферы, исследования проявления гелиогеофизических воздействий различной природы, волновых процессов в верхней атмосфере, эффектов зимних ВСП, изучения многолетних трендов температуры, валидации спутниковых данных, влияния солнечной и

геомагнитной активности на состояние верхней атмосферы [Medvedeva, Ratovsky, 2015, 2019; Medvedeva et al., 2019].

Дифракционный и призмный спектрометры видимого диапазона с охлаждаемыми фотосенсорами ведут наблюдения временной динамики интенсивности линий атомарного кислорода 557.7 и 630.0 нм и дублета натрия 589.0, 589.6 нм с временным разрешением несколько минут. Эмиссии кислорода используются для исследования динамики мезосферы — нижней термосферы в периоды действия геомагнитных бурь, зимних ВСП, влияния солнечной активности и других явлений [Mikhalev, 2011], поскольку высота высвечивания этих линий ~250 км (630.0 нм) и ~100 км (557.7 нм). Свечение дублета натрия используется для исследований метеорных потоков [Комарова, Михалев, 2014].

Характеристики регистрируемых линий несут информацию о движении светящегося вещества. С помощью монохроматического излучения атомов и молекул можно наблюдать эффект Доплера, который приводит к уширению и сдвигу спектральных линий вследствие хаотического (температура) и коллективного (дрейф, ветер) движения атомов и молекул. Интерферометры Фабри—Перо способны формировать интерференционную картину, чувствительную к сдвигу и уширению спектральных линий на уровне 10^{-15} – 10^{-14} м. Такие вариации доплеровского уширения и сдвига линий возникают при вариациях ветра порядка нескольких метров в секунду и температуры порядка нескольких кельвинов. ГФО оснащена интерферометром Фабри—Перо, адаптированным для проведения аэрономических исследований и оснащенный термостабилизированным эталоном диаметром 70 мм, входными интерференционными светофильтрами и высокочувствительной ПЗС-камерой с охлаждаемым фотосенсором [Shiokawa et al., 2012]. Динамика ветра и температуры верхней атмосферы для нескольких спектральных линий записывается интерферометром с временным разрешением ~10 мин. Эти сведения чрезвычайно полезны для исследования как ее регулярных вариаций, так и геофизических событий разного рода, магнитных бурь, ВСП и пр. [Васильев и др., 2017, 2018; Михалев и др., 2018].

Помимо спектрометров, для регистрации свечения определенных линий можно использовать одноканальные фотометры с интерференционными светофильтрами с максимумом пропускания вблизи интересующей длины волны. Основным преимуществом фотометров с интерференционными фильтрами является их высокая светосила, что позволяет достигать высокого временного разрешения (порядка миллисекунд). Поэтому с их помощью можно исследовать особенности свечения метеоров, вспышек молний, быстрых вариаций свечения мезосферы и термосферы. Многоканальный фотометр эксплуатировался в ГФО до 2010 г. [Белецкий и др., 2010] и был выведен из эксплуатации в связи с модернизацией оборудования. В настоящее время обсерватория не обладает фотометрическими устройствами такого типа. Регистрация быстрых вариаций свечения в ГФО ведется устройствами на основе ПЗС-матриц, что позволяет

вести идентификацию наблюдаемых быстрых событий по их изображениям, но получить временное разрешение, сопоставимое с устройствами на основе фотоумножителей, пока не удалось [Tkachev et al., 2017, 2019].

Регистрация пространственных вариаций свечения ночной атмосферы и контроль прозрачности атмосферы непосредственно над точкой наблюдения осуществляется камерами на основе цветных ПЗС-матриц. Специализированная широкоугольная оптическая система, установленная в ГФО с 2013 г. имеющая, как и фотометр, интерференционные полосовые светофильтры, позволяет регистрировать пространственную картину интенсивности линии атомарного кислорода 630.0 нм. Периодически в ГФО проводится регистрация пространственной картины свечения атомарного кислорода на длине волны 557.7 нм и свечения гидроксила. Использование широкоугольных камер в выделенных спектральных линиях и полосах показало их высокую эффективность. Результаты наблюдений используются для исследований среднеширотных сияний, в частности, субавроральных красных дуг (SAR-arcs), внутренних гравитационных волн, долгоживущих метеорных следов и искусственного свечения, возникающего в результате работы нагревного стенда и в активных космических экспериментах [Тащилин и др., 2010; Белецкий и др., 2016; Михалев и др., 2018; Shindin et al., 2018].

Несколько инструментов (камера всего неба КЕО-Sentinel, интерферометр Фабри—Перо КЕО-Agipae, дифракционный спектрометр Shamrock-i303) были введены в эксплуатацию в ГФО относительно недавно. Эти устройства фактически являются прототипами оборудования, из которого будет создан комплекс оптических инструментов НГК. Ниже приведены некоторые результаты, полученные на этих прототипах, которые демонстрируют работоспособность и обоснованность выбранного для НГК оборудования и могут быть использованы как задел для дальнейших исследований.

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ВЕТЕР

Понимание процессов вертикальной динамики атмосферы для задач исследования влияния геомагнитных возмущений на атмосферу, взаимосвязи процессов на разных высотных уровнях, происходящих в самой атмосфере, или влияния литосферы и океана на состояние атмосферы Земли чрезвычайно важно. Наиболее значимым в этом отношении можно считать вертикальный ветер, или вертикальный дрейф воздушных масс, который сам по себе переносит энергию движения воздуха на разные высотные уровни и с максимально возможной эффективностью обеспечивает вертикальный транспорт химических компонентов. Естественно, интегральное вертикальное движение атмосферы на больших пространственно-временных масштабах незначительно, однако неравномерность нагрева различных участков атмосферы в совокупности с действием горизонтального (адвективного) транспорта тепла гипотетически может привести к образованию локальных областей с ярко выраженным вертикальным

движением. Такое вертикальное движение воздуха возникает в результате конвективных процессов в приповерхностном слое атмосферы или в тропосферных циркуляционных ячейках (ячейка Хэдли, ячейка Феррела, полярная ячейка). Последние результаты о вертикальном транспорте воздуха в средней термосфере, полученные при помощи прототипов устройств оптического комплекса НГК и радиофизических инструментов [Medvedev et al., 2019], указывают на возможность существования вертикальной циркуляционной ячейки, регулярно перемещающейся от полюса к экватору и обратно в течение суток. Иллюстрацией может служить рис. 2, на котором показана усредненная за геофизическую зиму (± 45 дней от зимнего солнцестояния) динамика вертикального и меридионального нейтрального ветров, полученная интерферометром Фабри—Перо с помощью методики, описанной в [Васильев и др., 2017], и динамика высоты максимума F2-слоя ионосферы, полученная с помощью ионозонда. Высота максимума электронной концентрации варьирует под действием нейтрального ветра, причем преимущественно для объяснения этих вариаций используется меридиональный ветер, под действием которого замагниченная плазма перемещается вдоль наклоненных от вертикали линий геомагнитного поля (рис. 3). Однако наличие вертикального нейтрального ветра для геометрии, в которой направление вектора геомагнитного поля ближе к вертикали, чем к горизонтали, приведет к более выраженному действию вертикального ветра на высоту максимума. Используя сведения о положении вектора магнитного поля и обеих скоростях нейтрального ветра, можно по аналогии с серво-моделью [Rishbeth, 1967] смоделировать динамику перемещения максимума электронной концентрации в виде

$$H_m F2'(t) = z_0 + cD(t) = z_0 + c[V(t)\sin\alpha \cos\alpha + W(t)\cos^2\alpha], \quad (1)$$

где $H_m F2'$ — положение максимума электронной концентрации; z_0 — балансовая высота пика электронной концентрации, определяющаяся диффузией и рекомбинацией ночной ионосферной плазмы в отсутствие дрейфа из-за нейтрального ветра; V — скорость меридионального нейтрального ветра; W — скорость вертикального нейтрального ветра; α — угол между наклоном геомагнитного поля и вертикалью (предполагается, что направление магнитного поля ориентировано строго вдоль линии север—юг, что с хорошей точностью выполняется для места, где проводились описываемые исследования вертикального ветра); D — проекция суммарной скорости нейтрального ветра на вектор геомагнитного поля; c — масштабный коэффициент, описывающий степень взаимодействия заряженной и нейтральной компонент, а также связь скорости вертикального дрейфа заряженного компонента и высоты максимума концентрации. Как видно, поведение $H_m F2$ для $z_0 = 300$ км и $c = 1$ достаточно хорошо согласуется с наблюдаемым в действительности поведением максимума F2-слоя (рис. 2, справа). Хорошо видно, что наибольшая высота максимума электронной концент-

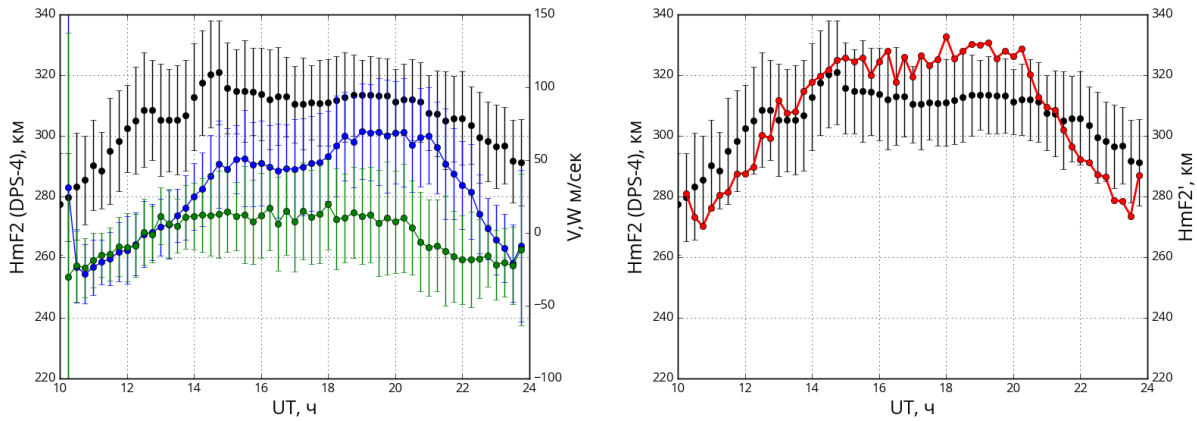


Рис. 2. Слева — поведение усредненных за определенный момент UT на протяжении геофизической зимы (± 45 дней от зимнего солнцестояния) высоты максимума F2 (черным), меридионального ветра (синим, положительное направление на юг), вертикального ветра (зеленым, положительное направление вверх). Справа — сопоставление высоты максимума F2, полученного с помощью (1) (красным) и измеренного с помощью ионозонда (черным)

Таблица 1

Коэффициенты корреляции для наблюдаемых скоростей ветров и высот слоя $H_m F_2$ (синхронно, по усредненным значениям в пределах сезона)

Коэффициенты корреляции по Пирсону для величин	Геофизическая зима 2016–2017 гг.	Геофизическая зима 2017–2018 гг.	Геофизическая зима 2018–2019 гг.
Вертикальный ветер и $H_m F_2$	0.905	0.885	0.918
Меридиональный ветер и $H_m F_2$	0.825	0.795	0.878
$H_m F_2$ по данным DPS-4 и оцененная при помощи (1)	0.953	0.921	0.961

рации наблюдается в середине ночи, когда направленный вверх вертикальный ветер максимален. Снижение высоты максимума в часы, близкие к рассвету и закату, сопровождается ростом направленного вниз вертикального ветра. Коэффициенты корреляции различных компонент ветра и вычисленного дрейфа с положением максимума F2 приведены в табл. 1. Если вклад в вертикальное движение заряженной компоненты определяется исключительно меридиональным ветром, то коэффициент корреляции между $H_m F_2$ и меридиональным ветром должен быть максимальным. Однако коэффициент корреляции вертикального ветра и $H_m F_2$ выше — это значит, что в поведение максимума F2 вертикальный ветер дает больший вклад, поскольку направление геомагнитного поля близко к вертикали в месте проведения наблюдений (рис. 3). Более того, оцененное с помощью (1) поведение максимума F2 с использованием комбинации меридионального и вертикального ветров имеет максимальный коэффициент корреляции, причем тенденция повторяется для трех сезонов.

Следовательно, можно заключить, что наблюдаемая интерферометром Фабри—Перо вариация вертикального ветра на высоте около 250 км с помощью свечения линии атомарного кислорода 630 нм обусловлена именно вертикальными движениями в средней термосфере. Наблюдаемые суточные вариации вертикального ветра могут быть объяснены

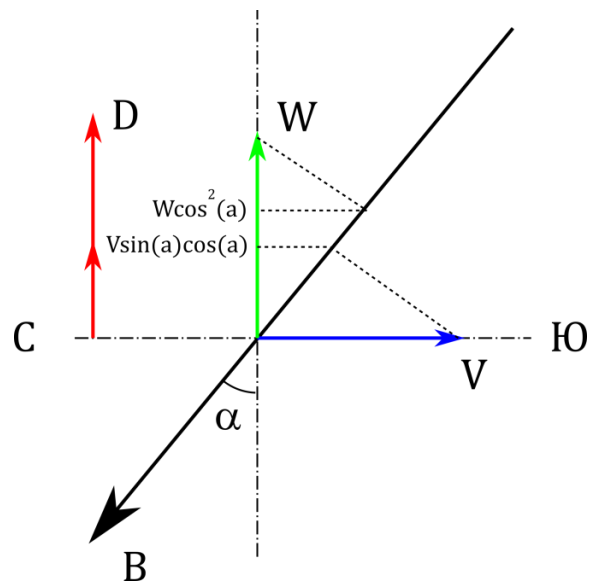


Рис. 3. Иллюстрация действия нейтрального ветра на замагниченную плазму. \mathbf{V} , \mathbf{W} — направления меридионального и вертикального ветра соответственно, \mathbf{B} — направление вектора геомагнитного поля, \mathbf{D} — вертикальный дрейф плазмы под суммарным действием меридионального и вертикального ветра (1); C, Ю — стороны света

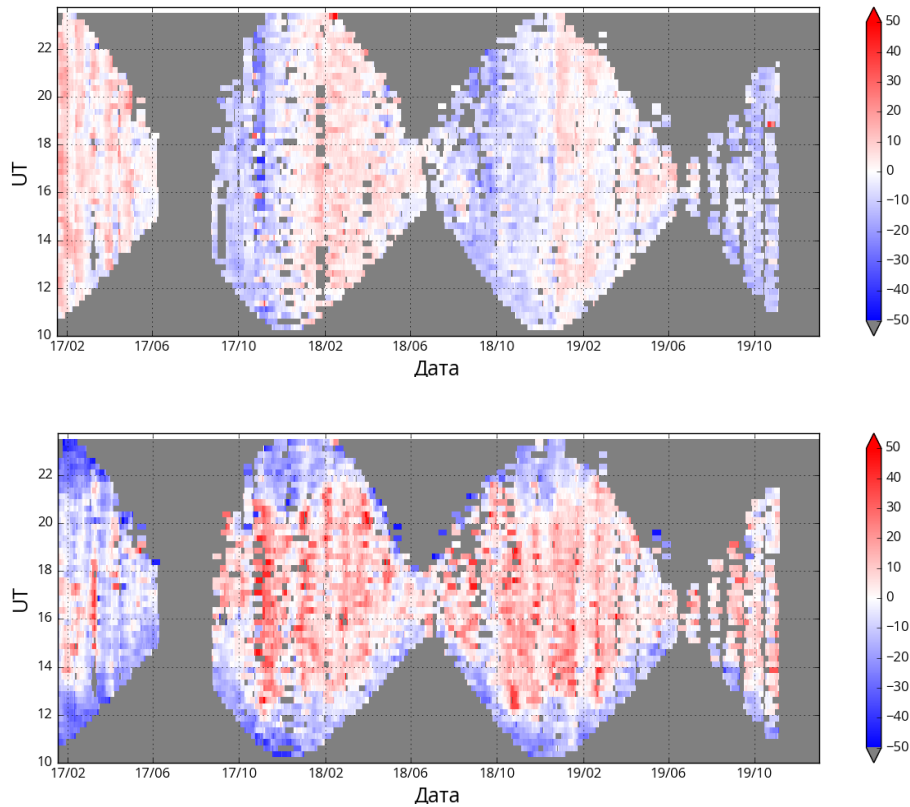


Рис. 4. Межгодовое, суточно-сезонное поведение вертикального ветра, наблюдаемого при помощи двух различных линий свечения атомарного кислорода. Горизонтальная ось — дата, вертикальная — универсальное время, цветом показана скорость ветра в м/с. Вверху — поведение скорости ветра, полученное в линии 557.7 нм (высота свечения около 100 км), внизу — поведение скорости ветра, полученное в линии 630.0 нм (высота свечения около 250 км)

зательства (или опровержения) наличия подобного циркуляционного образования необходимо провести двухпозиционные стереоскопические наблюдения динамики полного вектора скорости нейтрального ветра. Это будет возможно с помощью нового оптического оборудования НГК, вынесенного в расположенную к северу от комплекса оптических инструментов НГК геофизическую обсерваторию (см. рис. 1). Для таких наблюдений чрезвычайно важна временная синхронизация, которая будет обеспечиваться устройствами, формирующими отметки времени на основе сигналов глобальных навигационных спутниковых систем.

Суточно-сезонная динамика вертикального ветра для периода 2017–2020 гг. на разных высотных уровнях (линии атомарного кислорода 630.0 и 557.7 нм) приведена на рис. 4. Существенным моментом является различие характера изменения вертикального ветра для высоты ~250 км (линия атомарного кислорода 630 нм) и высоты ~100 км (линия атомарного кислорода 557.7 нм). Видно, что в средней термосфере в зимнее время наблюдается регулярный суточный ход скорости вертикального ветра с изменением направления вечером и утром, в то время как в нижней термосфере выраженного суточного хода нет, зато отчетливо наблюдается годовой ход скорости ветра с изменением направления в летнее и зимнее время.

Интерферометр Фабри—Перо в процессе наблюдения меняет светофильтры, соответствующие раз-

ным линиям атомарного кислорода последовательно, т. е. можно сказать, что наблюдения параметров красной и зеленой линий свечения ведутся одновременно в рамках десятиминутного интервала по единой методике. Термостабилизация интерферометра Фабри—Перо для устранения температурной зависимости наблюдений выполняется в два этапа: аппаратно с помощью специализированной термостабилизирующей системы, а затем при обработке сырых данных с использованием сведений об аппаратной функции устройства, полученной с помощью гелий-неонового лазера, стабилизированного по частоте. Методы обработки сырых данных (интерферограмм) каждой линии для получения скорости ветра идентичны. По всей видимости, нет аппаратного влияния на получаемые данные или влияния окружающей среды (рассеяния в тропосфере, вариации температуры приземного воздуха и др.) вследствие того, что характер поведения ветра на разных высотах различен (см. рис. 4). Таким образом, наблюдаемое различие в динамике вертикального ветра говорит о различных явлениях, приводящих к ее возникновению, например, можно предположить наличие двух независимых циркуляционных ячеек в средней и нижней термосфере. Уточнение этого факта (определение параметров циркуляционных ячеек) является одной из интересных научных задач для решения с помощью НГК.

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КАМЕР ВСЕГО НЕБА

Как было неоднократно упомянуто, наличие нескольких (минимум двух) камер, наблюдающих полностью или частично перекрывающуюся область верхней атмосферы, позволит проводить стереоскопические наблюдения светящихся образований. Эти сведения позволят восстановить не только высоту, но и полную трехмерную картину образования. В качестве примера можно привести выполненные относительно недавно стереоскопические наблюдения долгоживущего метеорного следа [Иванов и др., 2019]. Он наблюдался в ноябре 2017 г. и был одновременно зарегистрирован двумя камерами всего неба, расположенными на расстоянии 150 км друг от друга. В связи с тем, что процесс стереовидения основан на триангуляции соответствующих пикселей на двух изображениях, должно быть точное соответствие между положением пикселя в системе координат камеры и мировой системе координат [Vogovička et al., 1995]. Кроме того, для широкоугольных камер неизбежны абберации оптических систем, которые могут значительно повлиять на определение координат. Для устранения указанных искажений на изображениях была сделана калибровка, позволяющая сопоставить положение пикселя светочувствительной матрицы с определенной координатой на небесной сфере. Калибровка выполнялась по положению наблюдаемых звезд. В результате калибровки были получены аналитические зависимости, учитывающие радиальные искажения и зависимости между системами координат для каждой камеры:

$$\theta = -1.024 \cdot 10^{-4} \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right] - 0.2701 \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + 88.87, \quad (2)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{(y - y_0)}{(x - x_0)} \right], \quad (3)$$

где θ — угол места; φ — азимут; x, y — координаты на кадре (номер пикселя по горизонтали и вертикали); x_0, y_0 — координаты точки зенита. С использованием полученных выражений для каждого пикселя матрицы решением геодезической задачи можно найти географические координаты проекции изображения с некоторой высоты на поверхность Земли. Следующим шагом было сопоставление проекций изображений метеорного следа с фиксированной высоты, полученных одновременно в разных наблюдательных пунктах (рис. 5). В том случае, если географические координаты какой-либо части метеорного следа на одном изображении совпадают с координатами какой-либо части метеорного следа на втором, можно сказать, что данная часть следа находится на высоте, для которой построены проекции изображений. Далее для каждого близкого момента времени наблюдения следа строились его изображения в географических координатах в двух наблюдатель-

ных пунктах для некоторого набора высот и для каждой высоты определялись пересекающиеся части следа.

В результате можно получить трехмерную динамику всего следа во времени. Трехмерные координаты метеорного следа для изображений камер рис. 5 представлены в табл. 2. Для выбранных точек 1–4 высоты одинаковы — таким образом, можно утверждать, что эта часть метеорного следа распространялась преимущественно горизонтально на высоте ~73 км. Совпадения для остальных частей следа на проекциях найдены выше до высот ~105 км.

Таблица 2

Координаты долгоживущего метеорного следа, восстановленные с помощью данных рис. 5

Номер	Широта	Долгота	Высота
1	51.85	101.70	73
2	51.75	101.70	73
3	51.50	101.62	73
4	51.75	101.23	73
5	52.00	101.00	80
6	52.30	100.90	85
7	53	100.5	105

Обработка изображений с проекциями осуществлялась визуально оператором, так как автоматизировать этот этап не представляется возможным из-за сложного процесса определения метеорного следа на фоне других объектов — ярких звезд, неравномерного фонового свечения и т. п. Предложенный метод подобен методикам, использующимся другими научными группами, исследующими верхнюю атмосферу, например [Kouahla et al., 2010]. В сочетании с лидарными, радарными и спутниковыми данными этот метод позволит наиболее точно восстановить пространственные характеристики таких событий, как волновые структуры, авроральные дуги, метеорные следы, искусственные образования и пр. Можно предположить, что накопленная статистика событий в совокупности с развитием методов машинного зрения, нейросетевыми алгоритмами обработки изображений в дальнейшем позволит автоматизировать процесс подобно [Whiter et al., 2013] и найти ему применение в других научно-прикладных задачах.

ОПТИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ В АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Активные космические эксперименты являются эффективным методом исследований верхней атмосферы Земли, так как позволяют контролировать условия и параметры воздействия на исследуемую среду. Описанные выше прототипы оптических инструментов НГК использовались при проведении активного космического эксперимента «Радар–Прогресс» [Белецкий и др., 2016; Михалев и др., 2016] по инъекции топлива бортовых двигателей космических аппаратов на высотах термосферы. В частности, было выявлено, что после включения сближающе-корректирующих двигателей (СКД транспортных

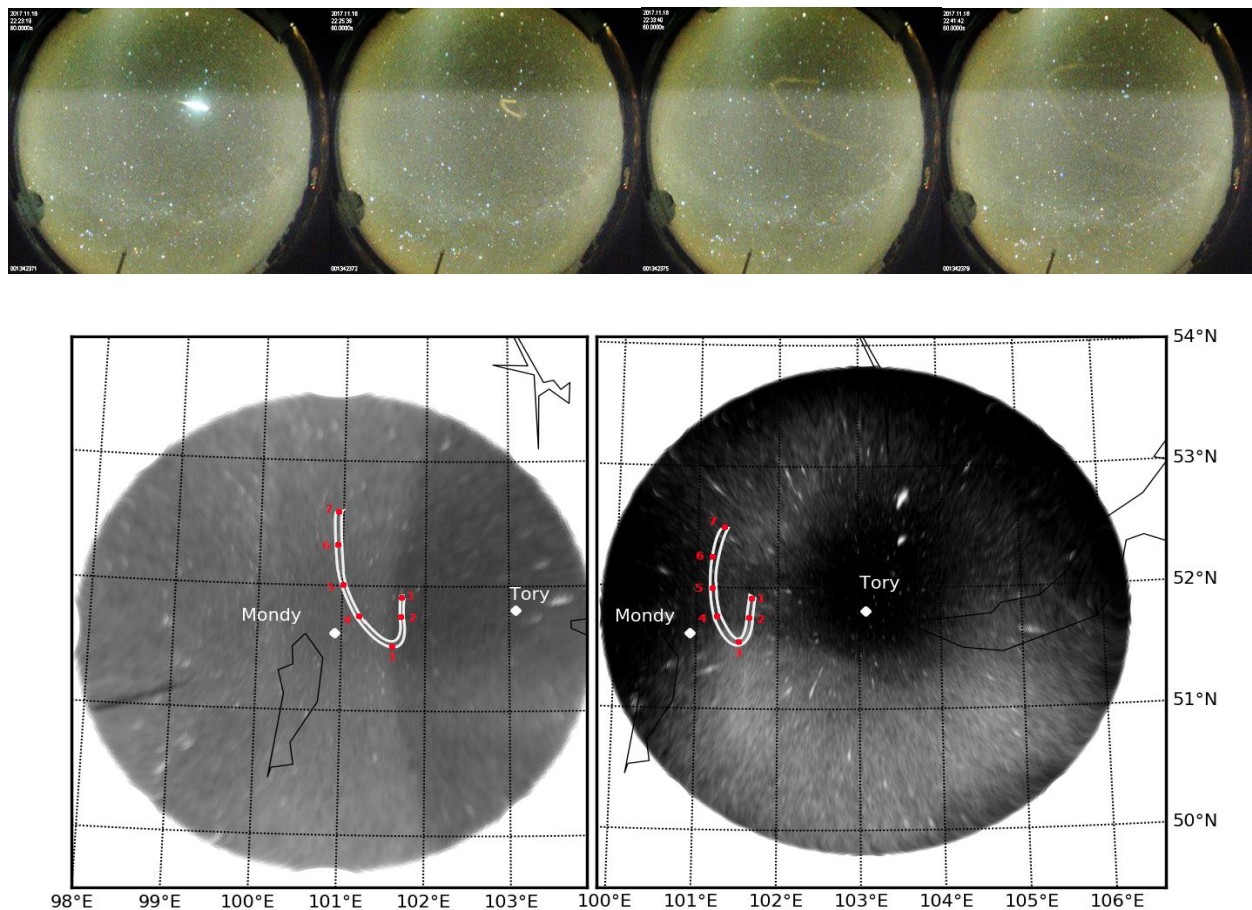


Рис. 5. Вверху — серия кадров с динамикой метеорного следа, полученных камерой в Саянской солнечной обсерватории (ССО). Внизу — проекции изображений двух камер (слева — ССО, справа — ГФО) на поверхность Земли с высоты 73 км. Пронумерованные точки — части метеорного следа, для проекций которых на поверхности Земли найдены совпадения для различных высот

грузовых кораблей (ТГК) типа «Прогресс» на высотах термосферы образуются области свечения повышенной интенсивности. Было высказано предположение, что эти светящиеся образования связаны с рассеянием сумеречного солнечного излучения на продуктах работы СКД на орбите ТГК или с появлением дополнительного свечения в эмиссии атомарного кислорода [OI] 630 нм в результате модификации ионосферы. Примерная динамика такого образования показана на рис. 6.

Приведенная последовательность кадров, снятых с интервалом в полминуты, демонстрирует пространственно-временную динамику светящегося образования, возникшего в результате включения двигателя (светлое пятно в середине кадра). Максимальные наблюдаемые размеры области свечения составили 330–350 км вдоль орбиты и 250–270 км поперек. Скорость расширения области свечения в первые моменты после включения СКД составила 6–7 км/с вдоль орбиты и 3–3.5 км/с поперек. Затемненная область вокруг вытянутого изображения от выброса на первом кадре, скорее всего, связана с особенностью специализированной дифференциальной методики обработки изображений, разрабатываемой в ИСЗФ на основе [Tkachev et al., 2017, 2019] для исследования подобных явлений. Артефакты

на краях кадра связаны с неустраняемыми в текущем варианте методики изображениями звезд и Луны.

Позднее в работе [Михалев и др., 2020] был рассмотрен вклад различных компонентов инжектируемого вещества (H_2 , OH, H_2O , CO и CO_2) в усиление интенсивности свечения атомарного кислорода [OI] 630.0 нм и в изменение заряженных компонент верхней атмосферы. Было показано, что изменения интенсивности свечения и концентрации заряженных компонент обусловлены разными химическими реакциями. Наибольший вклад в увеличение интенсивности свечения в эмиссии 630.0 нм вносит инжекция в атмосферу водорода и углекислого газа, а уменьшение концентрации заряженных компонент преимущественно обусловлено инжекцией паров воды.

Нагрев ионосферы при помощи коротковолнового радиоизлучения является мощным инструментом исследования ионосферной плазмы и верхней атмосферы Земли. При помощи прототипов оптических инструментов НГК были выполнены исследования светящихся образований, возникающих в результате работы нагревного стенда СУРА. Воздействие на ионосферу осуществлялось с помощью КВ-радиоизлучения обыкновенной поляризации при вертикальной ориентации диаграммы направленности стенда. Регистрация искусственного свечения производилась

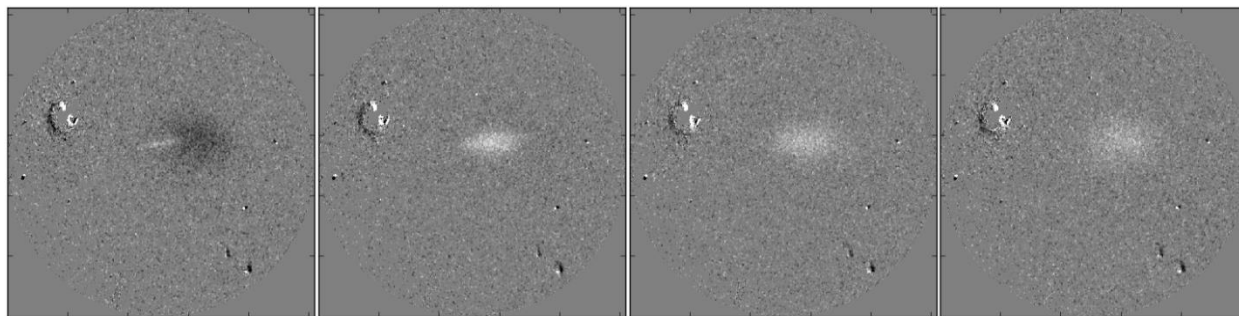


Рис. 6. Последовательность кадров камеры всего неба обработанных при помощи дифференциальной методики выделения областей быстрых вариаций интенсивности. Время создания снимков (слева направо): 13:24:31, 13:25:02, 13:25:33, 13:26:04 UT, включение двигателя произошло в 13:24 UT. Светящийся выброс — светлое пятно в центре кадра

в двух разнесенных пунктах камерами всего неба на длине волны 630 нм. Один был расположен в непосредственной близости от антенной системы стенда СУРА, второй находился на расстоянии ~ 170 км от нагревного стенда. В результате были получены изображения светящихся областей, позволившие стереоскопическим методом определить пространственные параметры образований и их связь с параметрами мощной радиоволны [Shindin et al., 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены сведения о следующих новых оптических инструментах Национального гелиогеофизического комплекса:

- фотометры для скоростной фотометрии основных эмиссионных линий верхней атмосферы с полем зрения $\sim 10^\circ$ и временным разрешением до 1 мс;
- дифракционные спектрометры для регистрации спектрального состава излучения ночного неба в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах, обладающие спектральным разрешением порядка 0.1 нм и чувствительностью, достаточной для наблюдения вариаций интенсивности линий в несколько рэлей;
- широкоугольные оптические системы (камеры всего неба) с пространственным разрешением порядка 0.1–0.5°, оснащенные автоматически сменяемыми светофильтрами для наблюдения основных эмиссионных линий свечения ночной атмосферы и чувствительностью к наблюдению вариаций интенсивности в несколько рэлей;
- интерферометры Фабри—Перо с диаметром эталона 70 мм, оснащенные автоматически сменяемыми светофильтрами для наблюдения основных эмиссионных линий свечения ночной атмосферы, перископическим входным окном с автоматическим управлением и обладающие чувствительностью, достаточной для регистрации вариаций ветра и температуры верхней атмосферы на уровне 5 м/с и 5 К соответственно.

Исследователи отмечают целесообразность и актуальность установки и использования этих устройств для совместной работы с существующими и будущими объектами НГК. Дублирование устройств необходимо для проведения одновременных наблюдений параметров атмосферы в разных спектральных диапа-

зонах, соответствующих разным высотным уровням. Существующие прототипы устройств могут быть использованы для создания локальной сети оптических инструментов для проведения стереоскопических наблюдений светящихся образований. Обе перечисленные особенности дают возможность восстановления трехмерной динамической картины параметров нейтральной атмосферы, что в совокупности с другими средствами комплекса приведет к возможности детального исследования взаимодействия нейтральных и заряженных компонент в различных геофизических условиях и при искусственных воздействиях. Продолжение многолетних наблюдений основных эмиссионных линий и малых спектральных составляющих даст возможность исследования долговременных трендов параметров верхней атмосферы Земли, в том числе под влиянием антропогенных факторов.

В настоящее время данные, полученные при помощи прототипов оптических инструментов НГК, по активным экспериментам, по большим магнитным бурям, по исследованию быстрых оптических явлений в атмосфере Земли, и другим задействованы в качестве экспериментальной основы при реализации ряда грантов РФФИ (№ 17-05-00492; № 17-29-05047; № 18-05-00594; № 19-05-00665; 20-05-00212; № 20-05-00580) по исследованию и моделированию указанных явлений.

Оснащение оптических инструментов НГК быстрыми фотометрическими устройствами приведет к дополнительным возможностям исследования явлений атмосферного электричества, метеоров и быстрых вариаций естественного свечения атмосферы и среднеширотных сияний. Эти спорадические события могут быть дополнительным источником информации о состоянии верхней атмосферы. Дальнейшее развитие методов быстрой фотометрии метеоров может стать источником информации о динамике температуры и ветра в мезосфере и стратосфере. Исследование высотных молниевых разрядов — достаточно новая и интересная научная область. Как и метеоры, параметры высотных молниевых разрядов, их временная и пространственная динамика могут многое сообщить о физико-химическом состоянии верхней атмосферы. Кроме того, источник высотных молниевых разрядов — тропосферная грозовая активность — может быть достаточно хорошим

маркером, показывающим степень влияния внешних факторов (солнечной и геомагнитной активности) на состояние тропосферы. Важность этих исследований очевидна, поскольку максимальное влияние на человеческую деятельность оказывают именно тропосферные события погоды, а натурные исследования вертикального взаимодействия тропосферы, стратосферы, мезосферы и термосферы определяющим образом влияют на модернизацию существующих и разработку новых моделей атмосферы Земли.

Предварительные результаты наблюдения совместной динамики вертикального ветра и заряженных компонент верхней атмосферы с помощью прототипов оптических инструментов НГК и ионозонда указывают на перспективность дальнейших исследований, связанных с уточнением взаимного влияния заряженной и нейтральной компонент верхней атмосферы в различных геофизических условиях и при искусственных воздействиях как с помощью создающегося в рамках НГК нового среднеширотного нагревного стенда ИКАР-АИ, так и спутниковых и ракетных средств. Динамика вертикального ветра, регистрируемая при помощи прототипов оптических инструментов НГК на протяжении нескольких лет на разных высотных уровнях, показывает возможность наличия в верхней атмосфере замкнутых циркуляционных ячеек, расположенных в термосфере и обладающих существенно различающимся поведением. Для подтверждения наличия этих циркуляционных ячеек и дальнейшего уточнения их параметров необходимо не только разместить дополнительные оптические инструменты в ГФО, но и разнести существующие прототипы на некоторое расстояние, чтобы при помощи стереоскопических методов определить полную пространственно-временную динамику этих образований. Кроме того, для определения крупномасштабной структуры циркуляционных ячеек необходимо создавать новые пункты наблюдения или использовать существующие российские и зарубежные наблюдательные сети. Таким образом, одной из научных задач для НГК может стать исследование вертикальных циркуляционных образований в верхней атмосфере и их вариативность под действием внешних (солнечная и геомагнитная активность) и внутренних (стратосферные и тропосферные процессы, влияние океана и литосферы) процессов. Циркуляционные ячейки в результате процессов вертикального и горизонтального переноса активных химических компонентов могут заметно изменять состав верхней атмосферы, что может привести к значительным вариациям заряженных компонент, возникновению дополнительных источников тепла и других событий и в конечном итоге оказывать существенное влияние на космическую погоду.

Продемонстрированные возможности стереоскопических методов исследования светящихся образований говорят о перспективности применения этого метода к задачам НГК. Наблюдение общего объема атмосферы с помощью оптических и радиофизических средств НГК, возможность контролируемого воздействия на верхнюю атмосферу в этом объеме и привлечение современных прецизионных методов

оптической спектроскопии и фотометрии позволят НГК выполнять качественные исследования на высоком уровне и приведут к появлению новых научных результатов.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и РФФИ в рамках научных проектов № 18-05-00594, 20-05-00212, 20-05-00580 и 19-35-90093. Работа основана на данных оптического комплекса центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астапович И.О. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. 634 с.
- Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В. Метеороидные рои: образование, эволюция, связь с кометами и астероидами // *Астрономический вестник*. 1991. Т. 25, № 4. С. 387.
- Белецкий А.Б., Михалев А.В., Черниговская М.А. и др. Исследование возможности проявления деятельности тропических циклонов в собственном свечении атмосферы Земли // *Иссл. Земли из космоса*. 2010. № 4. С. 41–49.
- Белецкий А.Б., Михалев А.В., Хахинов В.В., Лебедев В.П. Оптическое проявление работы бортовых двигателей низкоорбитальных космических аппаратов // *Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2, № 4. С. 85–91. DOI: [10.12737/21169](https://doi.org/10.12737/21169).
- Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри—Перо КЕО Scientific «Arinae» // *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 3. С. 70–87. DOI: [10.12737/szf-33201707](https://doi.org/10.12737/szf-33201707).
- Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Мерзляков Е.Г. Сравнительный статистический анализ поведения скорости нейтрального ветра в области мезосферы / нижней термосферы средних широт по данным измерений метеорным радаром интерферометром Фабри—Перо // *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 2. С. 86–95. DOI: [10.12737/szf-42201808](https://doi.org/10.12737/szf-42201808).
- Воронцов-Вельяминов В.А. Очерки о Вселенной. Химический состав Земли и метеоритов. М.: Наука, 1969. Т. 1. 476 с.
- Гаврилова Л.А. О диффузном пропускании атмосферой ночного излучения верхних слоев // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1987. Т. 23, № 10. С. 1098–1101.
- Горелький К.И., Дегтярев В.И., Курилов В.А. Природа флуктуаций отношения основных авроральных эмиссий во время суббурь // *Иссл. по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца*. М.: Наука, 1977. Вып. 43. С. 86–89.
- Ермилов С.Ю., Михалев А.В. Быстрые вариации в оптическом излучении неба средних широт // *Иссл. по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца*. М.: Наука, 1989. Вып. 84. С. 119–125.
- Иванов К.И., Комарова Е.С., Васильев Р.В. и др. Исследование дрейфа метеорного следа по данным базисных наблюдений // *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 100–106. DOI: [10.12737/szf-51201911](https://doi.org/10.12737/szf-51201911).
- Исследование радиационных характеристик аэрозоля в Азиатской части России / под ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.
- Комарова Е.С., Михалев А.В. Проявление метеорной активности потока Леониды в излучении верхней атмосферы Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11, № 2. С. 277–287.
- Мак-Кинли Д. Методы метеорной астрономии / пер. с англ. под ред. Л.А. Катасева, М.: Мир, 1964. 383 с.
- Мартыненко В.В. Задачи и методы любительских наблюдений метеоров. М.: Наука, 1967. 77 с.

- Михалев А.В. Излучение верхней атмосферы Земли в эмиссии [OI] 557.7 нм в периоды сейсмических событий в Байкальской рифтовой зоне // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1068–1072.
- Михалев А.В., Тащилин М.А. Некоторые задачи солнечно-земной физики, связанные с образованием и динамикой атмосферного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 555–558.
- Михалев А.В., Хахинов В.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П. Оптические эффекты работы бортового двигателя космического аппарата «Прогресс М-17М» на высотах термосферы // Косм. иссл. 2016. Т. 54, № 2. С. 113–118.
- Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. и др. Спектральные и фотометрические характеристики среднеширотного сияния во время магнитной бури 17 марта 2015 г. // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 4. С. 54–61. DOI: [10.12737/szf-44201806](https://doi.org/10.12737/szf-44201806).
- Михалев А.В., Тащилин М.А., Сакерин С.М. Влияние атмосферного аэрозоля на результаты наземных наблюдений излучения верхней атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 202–207.
- Михалев А.В., Васильев Р.В., Белецкий А.Б. Эффекты кратковременного увеличения интенсивности излучения атомарного кислорода [OI] 630.0 нм на высотах нижней термосферы, обусловленные техногенной деятельностью // Геомагнетизм и аэронавигация. 2020. Т. 60, № 1. С. 116–125.
- Тащилин М.А., Белецкий А.Б., Михалев А.В. и др. Некоторые результаты наблюдений пространственных неоднородностей в излучении эмиссии гидроксидов // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 15. С. 131–134.
- Торошелидзе Т.И., Фишкова Л.М. Анализ колебаний ночного излучения средней и верхней атмосферы, предшествующих землетрясениям // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, № 2. С. 313–316.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
- Bernhardt P.A., Wong M., Huba J.D., et al. Optical remote sensing of the thermosphere with HF pumped artificial airglow // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N A5. P. 10657–10671.
- Biondi A.A., Sipler D.P., Hake R.D. Optical ($\lambda 6300$) detection of radio frequency heating of electrons in the F region // J. Geophys. Res. 1970. V. 75, N 31. P. 6421. DOI: [10.1029/JA075i031p06421](https://doi.org/10.1029/JA075i031p06421).
- Borovička J., Spurný P., Keckliková J. A new positional astrometric method for all-sky cameras // Astron. Astrophys. Suppl. 1995. V. 112. P. 173–178.
- Chapman S. Geomagnetismus. Oxford, 1940. V. 1–2. 149 p.
- Clemesha B.R., de Medeiros A.F., Gobbi D., et al. Multiple wavelength optical observations of a long-lived meteor trail // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, N 14. P. 2779–2782. DOI: [10.1029/2000GL012605](https://doi.org/10.1029/2000GL012605).
- Cooray V. An Introduction to Lightning. Springer, 2015. 386 p.
- Ermilov S.Yu., Mikhalev A.V. Optical manifestation of microbursts of electron fluxes // J. Atmos. Terr. Phys. 1991. V. 53, N 11/12. P. 1157–1160.
- Fabre F., Marini A., Sidler T., et al. A demonstrator for an incoherent Doppler wind lidar receiver // Proc. SPIE. 2018. V. 10570. 1057005.
- Kelley M.C., Gardner C., Drummond J., et al. First observations of long-lived meteor trains with resonance lidar and other optical instruments // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, N 13. P. 1811–1814. DOI: [10.1029/1999GL011175](https://doi.org/10.1029/1999GL011175).
- Kouahla M.N., Moreels G., Faivre M., et al. 3D imaging of the OH mesospheric emissive layer // Adv. Space Res. 2010. V. 45. P. 260–267.
- Lu M.-R., Chen P.-Y., Kuo C.-L., et al. Recent work on sprite spectrum in Taiwan // Terr. Atmos. Oceanic Sci. 2017. V. 28, N 4. DOI: [10.3319/TAO.2016.08.26.02](https://doi.org/10.3319/TAO.2016.08.26.02).
- Ma J., Xue X., Dou X., et al. Large-scale horizontally enhanced sodium layers coobserved in the midlatitude region of China // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2019. V. 124, N 9. P. 7614–7628.
- Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. Method for determining neutral wind velocity vectors using measurements of internal gravity wave group and phase velocities // Atmosphere. 2019. V. 10, iss. 9. DOI: [10.3390/atmos10090546](https://doi.org/10.3390/atmos10090546).
- Medvedeva I., Ratovsky K. Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015. V. 120, iss. 6. P. 5151–5159. DOI: [10.1002/2015JA021289](https://doi.org/10.1002/2015JA021289).
- Medvedeva I.V., Ratovsky K.G. Solar activity influence on the mesopause temperature and F2 peak electron density // 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS-SPRING). 2019. P. 3958–3964.
- Medvedeva I.V., Semenov A.I., Pogoreltsev A.I., et al. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2019. V. 187. P. 22–32. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.005).
- Mikhalev A.V. Mid-latitude airglow during heliogeophysical disturbances // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. V. 51, N 7. P. 974–978.
- Mikhalev A.V., Popov M.S., Kazimirovsky E.S. The manifestation of seismic activity in 557.7 nm emission variations of the Earth's upper atmosphere // Adv. Space Res. 2001. V. 27, N 6-7. P. 1105–1108.
- Nicoll K.A. Space weather influences on atmospheric electricity // Weather. 2014. V. 69, N 9. P. 238–241. DOI: [10.1002/1467-9646.2323](https://doi.org/10.1002/1467-9646.2323).
- Nwankwo V., Chakrabarti S., Weigel B. The effect of solar forcing induced atmospheric perturbations on LEO satellites' nominal aerodynamic drag // 42nd COSPAR Scientific Assembly. 14–22 July 2018, Pasadena, California, USA. 2018. Abstract id. PSD.1-12-18.
- Oppenheim M.M., Dimant Y. Meteor trails in the lower thermosphere: what do large radars really detect? // American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract id.SA41D-02.
- Owens M.J., Scott C.J., Bennett A.J., et al. Lightning as a space-weather hazard: UK thunderstorm activity modulated by the passage of the heliospheric current sheet // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42, N 22. P. 9624–9632. DOI: [10.1002/2015GL066802](https://doi.org/10.1002/2015GL066802).
- Pedatella N.M., Chau J.L., Schmidt H., et al. How sudden stratospheric warming affects the whole atmosphere // Eos. 2018. V. 99. DOI: [10.1029/2018EO092441](https://doi.org/10.1029/2018EO092441).
- Rishbeth H. The effect of winds on the ionospheric F2-peak // J. Atmos. Terr. Phys. 1967. V. 29, N 3. P. 225–238. DOI: [10.1016/0021-9169\(67\)90192-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(67)90192-4).
- Rudawska R., Zender J., Koschny D., et al. A spectroscopy pipeline for the Canary island long baseline observatory meteor detection system // Planetary and Space Sci. 2020. V. 180. 104773.
- Shindin A.V., Klimenko V.V., Kogogin D.A., et al. Spatial characteristics of the 630-nm artificial ionospheric airglow generation region during the SURA facility pumping // Radio-physics and Quantum Electronics. 2018. V. 60, N 11. P. 849–865. DOI: [10.1007/s11141-018-9852-0](https://doi.org/10.1007/s11141-018-9852-0).
- Shiokawa K., Ogawa T., Kamide Y. Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A05202. DOI: [10.1029/2004JA010706](https://doi.org/10.1029/2004JA010706).
- Shiokawa K., Otsuka Y., Oyama S., et al. Development of low-cost sky-scanning Fabry — Perot interferometers for airglow and auroral studies // Earth, Planets and Space. 2012. V. 64. P. 1033–1046. DOI: [10.5047/eps.2012.05.004](https://doi.org/10.5047/eps.2012.05.004).
- Siingh D., Singh R.P., Singh A.K., et al. Solar activity, lightning and climate // Surveys in Geophysics. 2011. V. 32, N 6. P. 659–703. DOI: [10.1007/s10712-011-9127-1](https://doi.org/10.1007/s10712-011-9127-1).
- Tkachev I.D., Vasilyev R.V., Mikhalev A.V., et al. Recording optical flashes in the night atmosphere from CCD

photometer // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 30 November 2017. 1046648. DOI: [10.1117/12.2288293](https://doi.org/10.1117/12.2288293).

Tkachev I.D., Vasilyev R.V., Mikhalev A.V., Podlesny S.V. Simultaneous observations of fast optical events in the Earth's atmosphere by optical devices complex // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 18 December 2019. 112089C. DOI: [10.1117/12.2540839](https://doi.org/10.1117/12.2540839).

Whiter D.K., Gustavsson B., Partamies N., Sangalli L. A new automatic method for estimating the peak auroral emission height from all-sky camera images // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. 2013. V. 2. P. 131–144. DOI: [10.5194/gi-2-131-2013](https://doi.org/10.5194/gi-2-131-2013).

Wu Q., Li H., Wang C. Lightning response during Forbush decrease in the tropics and subtropics // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2019. V. 195, article id. 105134. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.105134](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105134).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

REFERENCES

Astapovich I.O. *Meteornye yavleniya v atmosfere Zemli* [Meteor phenomena in Earth's atmosphere]. Moscow, State Publishing House of Physics–Mathematical Literature 1958, 634 p. (In Russian).

Babadzhanov P.B., Obrubov Yu.V. Meteoroid swarm: formation, evolution, their relation to comets and asteroids. *Astronomicheskii Vestnik* [Astron. Bull.]. 1991, vol. 25, no. 4, p. 3 Moscow, 87. (In Russian).

Beletsky A.B., Mikhalev A.V., Chernigovskaya M.A., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V. Research into possibility of manifestation of tropical cyclone activity in Earth atmosphere proper airglow. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2010, no. 4, pp. 41–49. (In Russian).

Beletsky A.B., Mikhalev A.V., Khakhinov V.V., Lebedev V.P. Optical effects produced by running onboard engines of low-Earth-orbit spacecraft. *Solar-Terrestrial Physics*. 2016, vol. 2, iss. 4, pp. 107–117. DOI: [10.12737/24277](https://doi.org/10.12737/24277).

Bernhardt P.A., Wong M., Huba J.D., Fejer B.J., Wagner L.S., Goldstein J.A., Selcher G.A., Frolov V.L., Sergeev E.N. Optical remote sensing of the thermosphere with HF pumped artificial airglow. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A5, pp. 10657–10671.

Biondi A.A., Sipler D.P., Hake R.D. Optical ($\lambda 6300$) detection of radio frequency heating of electrons in the F region. *J. Geophys. Res.* 1970, vol. 75, no. 31, pp. 6421. DOI: [10.1029/JA075i031p06421](https://doi.org/10.1029/JA075i031p06421).

Borovička J., Spurný P., Keclíková J. A new positional astrometric method for all-sky cameras. *Astronomy and Astrophysics Supplement*. 1995, vol. 112, pp. 173–178.

Chapman S. *Geomagnetismus*. Oxford, 1940, vol. 1-2, 149 p.

Clemesha B.R., de Medeiros A.F., Gobbi D., Takahashi H., Batista P.P., Taylor M.J. Multiple wavelength optical observations of a long-lived meteor trail. *Geophys. Res. Lett.* 2001, vol. 28, no. 14, pp. 2779–2782. DOI: [10.1029/2000GL012605](https://doi.org/10.1029/2000GL012605).

Cooray V. *An Introduction to Lightning*. Springer 2015. 386 p.

Ermilov S.Yu., Mikhalev A.V. Optical manifestation of microbursts of electron fluxes. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1991, vol. 53, no. 11/12, pp. 1157–1160.

Ermilov S.Yu., Mikhalev A.V. Fast variations in mid-latitude sky optical radiation. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1989, vol. 84, pp. 119–125. (In Russian).

Fabre F., Marini A., Sidler T., Morancais D., Fongy G., Vidal Ph. A demonstrator for an incoherent Doppler wind lidar receiver. *Proc. SPIE*. 2018, vol. 10570, 1057005.

Gavrilova L.A. Diffuse transmission of upper-layer night airglow by the atmosphere. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 1987, vol. 23, no. 10, pp. 817–820.

Gorelyi K.I., Degtyarev V.I., Kurilov V.A. The origin of fluctuations of the ratio of basic auroral emissions during substorms. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1977, iss. 43, pp. 86–89. (In Russian).

Issledovanie radiatsionnykh kharakteristik aerolya v Aziatskoi chasti Rossii [Research into radiative characteristics of aerosol in Asian part of Russia]. Ed. S.M. Sakerin. Tomsk, IOA SB RAS Publ., 2012, 484 p.

Ivanov K.I., Komarova E.S., Vasilyev R.V., Eselevich M.V., Mikhalev A.V. Meteor trail drift research based on baseline observations. *Solar-Terrestrial Physics*. 2019, vol. 5, iss. 1, pp. 77–81. DOI: [10.12737/stp-51201911](https://doi.org/10.12737/stp-51201911).

Kelley M.C., Gardner C., Drummond J., Armstrong T., Liu A., Chu X., Papen G., Kruschwitz C., Loughmiller P., Grime B., Engelman J. First observations of long-lived meteor trains with resonance lidar and other optical instruments. *Geophys. Res. Lett.* 2000, vol. 27, no. 13, pp. 1811–1814. DOI: [10.1029/1999GL011175](https://doi.org/10.1029/1999GL011175).

Komarova E.S., Mikhalev A.V. Manifestation of Leonids meteor activity in the Earth's upper atmosphere radiation. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space]. 2014, vol. 11, iss. 2, pp. 277–287. (In Russian).

Kouahla M.N., Moreels G., Faivre M., Clairemidi J., Meriwether J.W., Lehmacher G.A., Vidal E., Veliz O. 3D Imaging of the OH mesospheric emissive layer. *Adv. Space Res.* 2010, vol. 45, pp. 260–267.

Lu M.-R., Chen P.-Y., Kuo C.-L., Chou C.-C., Wu B.-X., Shinsuke A., Su H.-T., Hsu R.-R., Wang S.-H., Lin N.-H., Lee L.-C. Recent work on sprite spectrum in Taiwan. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.* 2017, vol. 28, no. 4. DOI: [10.3319/TAO.2016.08.26.02](https://doi.org/10.3319/TAO.2016.08.26.02).

Ma J., Xue X., Dou X., Chen T., Tang Y., Jia M., Zou Z., Li T., Fang X., Cheng X., Sun Sh. Large-scale horizontally enhanced sodium layers coobserved in the midlatitude region of China. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019, vol. 124, no. 9, pp. 7614–7628.

Martynenko V.V. *Zadachi i metody lyubitelskikh nablyudenií meteorov* [Tasks and Methods of Amateur Meteor Observations]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 77 p. (In Russian).

McKinley D. *Metody meteoroi astronomii* [Methods of meteor astronomy]. Moscow, Mir Publ., 1964, 383 p.

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Vasilyev R.V., Artamonov M.F. Method for determining neutral wind velocity vectors using measurements of internal gravity wave group and phase velocities. *Atmosphere*. 2019, vol. 10, no. 9. DOI: [10.3390/atmos10090546](https://doi.org/10.3390/atmos10090546).

Medvedeva I., Ratovsky K. Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, iss. 6, pp. 5151–5159. DOI: [10.1002/2015JA021289](https://doi.org/10.1002/2015JA021289).

Medvedeva I.V., Ratovsky K.G. Solar activity influence on the mesopause temperature and F2 peak electron density. *2019 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS - SPRING)*. 2019, pp. 3958–3964.

Medvedeva I.V., Semenov A.I., Pogoreltsev A.I., Tatarnikov A.V. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 187, pp. 22–32. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.005).

Mikhalev A.V. Mid-latitude Airglow During Heliogeophysical Disturbances. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011, vol. 51, no. 7, pp. 974–978.

Mikhalev A.V., Popov M.S., Kazimirovsky E.S. The manifestation of seismic activity in 557.7 nm emission variations

of the Earth's upper atmosphere. *Adv. Space Res.* 2001, vol. 27, no. 6-7, pp. 1105–1108.

Mikhalev A.V. The Earth's upper atmosphere radiation in [OI] 557.7 nm emission during seismic events in Baikal Rift Zone. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2016, vol. 29, iss. 12, pp. 1068–1072. (In Russian).

Mikhalev A.V., Tashchilin M.A. Some problems in solar-terrestrial physics related to formation and dynamics of atmospheric aerosol. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2007, vol. 20, no. 6, pp. 555–558. (In Russian).

Mikhalev A.V., Khakhinov V.V., Beletsky A.B., Lebedev V.P. Optical effects of functioning of Progress M17-M on-board engine at thermospheric heights. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2016, vol. 54, no. 2, pp. 113–118. (In Russian).

Mikhalev A.V., Beletsky A.B., Vasilyev R.V., Podlesny S.V., Tashchilin M.A., Artamonov M.F. Spectral and photometric characteristics of mid-latitude auroras during the magnetic storm of March 17, 2015. *Solar-Terr. Physics.* 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 42–47. DOI: [10.12737/stp-44201806](https://doi.org/10.12737/stp-44201806).

Mikhalev A.V., Tashchilin M.A., Sakerin S.M. Atmospheric aerosol effect on results of ground-based observations of the upper atmosphere radiation. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2019, vol. 32, no. 3, pp. 202–207. (In Russian).

Mikhalev A.V., Vasilyev R.V., Beletsky A.B. Effects of short-duration increase in intensity of atomic oxygen [OI] 630.0 nm emission at lower thermosphere heights caused by technogenetics activity. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2020, vol. 60, no. 1, pp. 116–125. (In Russian).

Nicoll K.A. Space weather influences on atmospheric electricity. *Weather.* 2014, vol. 69, no. 9, pp. 238–241. DOI: [10.1002/wea.2323](https://doi.org/10.1002/wea.2323).

Nwankwo V., Chakrabarti S., Weigel B. The effect of solar forcing induced atmospheric perturbations on LEO satellites' nominal aerodynamic drag. *42nd COSPAR Scientific Assembly.* 14–22 July 2018, Pasadena, California, USA. 2018. Abstract id. PSD.1-12-18.

Oppenheim M.M., Dimant Y. Meteor trails in the lower thermosphere: what do large radars really detect? // American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract id.SA41D-02.

Owens M.J., Scott C.J., Bennett A.J., Thomas S.R., Lockwood M., Harrison R.G., Lam M.M. Lightning as a space-weather hazard: UK thunderstorm activity modulated by the passage of the heliospheric current sheet. *Geophys. Res. Lett.* 2015, vol. 42, no. 22, pp. 9624–9632. DOI: [10.1002/2015GL066802](https://doi.org/10.1002/2015GL066802).

Pedatella N.M., Chau J.L., Schmidt H., Goncharenko L.P., Stolle C., Hocke K., Harvey V.L., Funke B., Siddiqui T.A. How sudden stratospheric warming affects the whole atmosphere. *Eos.* 2018, vol. 99. DOI: [10.1029/2018EO092441](https://doi.org/10.1029/2018EO092441).

Rishbeth H. The effect of winds on the ionospheric F2-peak. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1967, vol. 29, no. 3, pp. 225–238. DOI: [10.1016/0021-9169\(67\)90192-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(67)90192-4).

Rudawska R., Zender J., Koschny D., Smit H., Lohle S., Zander F., Eberhart M., Meindl A., Latorre I. A spectroscopy pipeline for the Canary island long baseline observatory meteor detection system. *Planetary and Space Science.* 2020, vol. 180, 104773.

Shefov N.N., Semenov A.I., Khomich V.Yu. *Izluchenie verkhnei atmosfery — indikator ee struktury i dinamiki* [The upper atmosphere radiation as an indicator of its structure and dynamics]. Moscow, GEOS Publ., 2006, 741 p. (In Russian).

Shindin A.V., Klimentov V.V., Kogogin D.A., Beletsky A.B., Grach S.M., Nasyrov I.A., Sergeev E.N. Spatial Characteristics of the 630-nm Artificial Ionospheric Airglow Generation Region During the Sura Facility Pumping. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2018, vol. 60, no. 11, pp. 849–865. DOI: [10.1007/s11141-018-9852-0](https://doi.org/10.1007/s11141-018-9852-0).

Shiokawa K., Ogawa T., Kamide Y. Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, pp. A05202. DOI: [10.1029/2004JA010706](https://doi.org/10.1029/2004JA010706).

Shiokawa K., Otsuka Y., Oyama S., Nozawa S., Satoh M., Katoh Y., et al. Development of low-cost sky-scanning Fabry — Perot interferometers for airglow and auroral studies. *Earth, Planets and Space.* 2012, vol. 64, pp. 1033–1046. DOI: [10.5047/eps.2012.05.004](https://doi.org/10.5047/eps.2012.05.004).

Siingh D., Singh R.P., Singh A.K., Kulkarni M.N., Gautam A.S., Singh A.K. Solar activity, lightning and climate. *Surveys in Geophysics.* 2011, vol. 32, no. 6, pp. 659–703. DOI: [10.1007/s10712-011-9127-1](https://doi.org/10.1007/s10712-011-9127-1).

Tashchilin M.A., Beletsky A.B., Mikhalev A.V., Xu Jiayao, Yuan We. Some results of observation of spatial inhomogeneities in hydroxyl emission. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2010, iss.15, pp. 131–134. (In Russian).

Tkachev I.D., Vasilyev R.V., Mikhalev A.V., Podlesny S.V., Setov A.G. Recording optical flashes in the night atmosphere from CCD photometer. *Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 30 November 2017.* 1046648. DOI: [10.1117/12.2288293](https://doi.org/10.1117/12.2288293).

Tkachev I.D., Vasilyev R.V., Mikhalev A.V., Podlesny S.V. Simultaneous observations of fast optical events in the Earth's atmosphere by optical devices complex. *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 18 December 2019.* 112089C. DOI: [10.1117/12.2540839](https://doi.org/10.1117/12.2540839).

Toroshelidze T.I., Fishkova L.M. Analysis of oscillations of the middle and upper atmosphere night airglow preceding earthquakes. *Doklady AN SSSR* [Doklady Earth Sciences]. 1988, vol. 302, no. 2, pp. 313–316. (In Russian).

Vasilyev R.V., Artamonov M.F., Beletsky A.B., Zherentsov G.A., Medvedeva I.V., Mikhalev A.V., Syrenova T.E. Registering upper atmosphere parameters in East Siberia with Fabry—Perot Interferometer KEO Scientific “Arinae”. *Solar-Terrestrial Physics.* 2017, vol. 3, iss. 3, pp. 61–75. DOI: [10.12737/stp-33201707](https://doi.org/10.12737/stp-33201707).

Vasilyev R.V., Artamonov M.F., Merzlyakov E.G. Comparative statistical analysis of neutral wind in mid-latitude mesosphere / lower thermosphere based on meteor radar and Fabry—Perot interferometer data. *Solar-Terrestrial Physics.* 2018, vol. 4, iss. 2, pp. 49–57. DOI: [10.12737/stp-42201808](https://doi.org/10.12737/stp-42201808).

Vorontsov-Velyaminov V.A. *Ocherki o vseleinoi. Khimicheskii sostav Zemli i meteoritov* [Essays about the Universe. Chemical Composition of Earth and Meteorites]. Moscow, Nauka Publ., 1969, vol. 1, 476 p.

Whiter D.K., Gustavsson B., Partamies N., Sangalli L. A new automatic method for estimating the peak auroral emission height from all-sky camera images. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems.* 2013, vol. 2, pp. 131–144. DOI: [10.5194/gi-2-131-2013](https://doi.org/10.5194/gi-2-131-2013).

Wu Q., Li H., Wang C. Lightning response during Forbush Decrease in the tropics and subtropics. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 195, article id. 105134. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.105134](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105134).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (accessed 30 September 2019).

Как цитировать эту статью:

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., Ташилин М.А., Ткачев И.Д. Научные задачи оптических инструментов Национального геофизического комплекса. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 2. С. 105–122. DOI: [10.12737/szf-62202008](https://doi.org/10.12737/szf-62202008).