
**ОПТИЧЕСКОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ РАБОТЫ БОРТОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ****OPTICAL EFFECTS PRODUCED BY RUNNING ONBOARD ENGINES
OF LOW-EARTH-ORBIT SPACECRAFT**

А.Б. Белецкий*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, beletsky@iszf.irk.ru***А.В. Михалев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mikhalev@iszf.irk.ru***В.В. Хахинов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, khakhin@iszf.irk.ru***В.П. Лебедев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, lebedev@iszf.irk.ru***A.B. Beletsky***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, beletsky@iszf.irk.ru***A.V. Mikhalev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mikhalev@iszf.irk.ru***V.V. Khakhinov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, khakhin@iszf.irk.ru***V.P. Lebedev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, lebedev@iszf.irk.ru*

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты оптических наблюдений в космическом эксперименте (КЭ) «Радар–Прогресс» 17 апреля 2013 г. и 30 июля 2014 г. после включения сближающе-корректирующего двигателя (СКД) транспортных грузовых кораблей (ТГК) «Прогресс М-17М» и «Прогресс М-23М» на высотах термосферы. Во время работы СКД зарегистрированы области свечения повышенной интенсивности, предположительно связанные с рассеянием сумеречного солнечного излучения на продуктах работы СКД на орбите ТГК и, возможно, с появлением дополнительного свечения в эмиссии атомарного кислорода [OI] 630 нм. 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. Максимальная интенсивность области возмущения в сеансе КЭ с «Прогресс М-17М» оценивается величиной, эквивалентной ~40–60 Рл в спектральной полосе 2 нм. В сеансе с «Прогресс М-23М» в ближней и дальней зонах от орбиты ТГК зарегистрированы незначительные возмущения атмосферной эмиссии [OI] 630.0 нм, возможно, связанные с инъекцией выхлопных газов СКД.

Ключевые слова: собственное свечение атмосферы, ионосфера, космические аппараты.

Abstract. This paper presents results of optical observations made during Radar-Progress Experiment performed on April 17, 2013 and July 30, 2014 after the approach-correction engines (ACE) of Progress M-17M and Progress M-23M cargo spacecraft in the thermosphere had been started. A region of enhanced emission intensity was recorded during engine operation. This may have been related to the scatter of twilight solar emission along the cargo spacecraft exhaust and to the emergence of additional atomic oxygen [OI] emission at 630 nm. The maximum size of the observed emission region was ~330–350 km and ~250–270 km along and across the orbit respectively. For the first time after ACE had been started, an expansion rate of emission region was ~7 and ~3.5 km/s along and across the orbit respectively. The maximum intensity of the disturbance area for Progress M-17M is estimated at ~40–60 R at 2 nm. Progress M-23M Space Experiment registered a minor disturbance of atmospheric [OI] 630.0 nm emissions, both in near and in far cargo spacecraft flight path, which might have been associated with the ACE exhaust gas injection.

Keywords: airglow, ionosphere, spacecraft.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические эффекты полетов космических аппаратов (КА) и работы их бортовых жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) в зависимости от механизмов, высот и пространственных масштабов проявления разделяют на несколько типов [Адушкин и др., 2000; Платов и др. 2003]. Механизмы воздействия ЖРД на атмосферу и ионосферу Земли, сопровождаемого оптическими эффектами, связывают

непосредственно с выбросами в атмосферу продуктов сгорания, содержащих газовые и дисперсные компоненты, рассеянием на них солнечного света [Адушкин и др., 2000], модификацией атмосферы и ионосферы продуктами сгорания ЖРД [Mendillo et al., 1975; Карлов и др., 1980], гидродинамическими возмущениями типа акустико-гравитационных волн [Карлов и др., 1980; Михалев и Ермилов, 1997; Mikhalev, 2011] и др. Большинство оптических эффектов наблюдалось на высотах тропо-

стратосферы, когда их яркость относительно высока [Платов и др., 2003].

В настоящей работе представлены результаты оптических наблюдений в сеансах активного космического эксперимента (КЭ) «Радар–Прогресс» 17 апреля 2013 г. и 30 июля 2014 г. после включения сближающе-корректирующего двигателя (СКД) транспортного грузового корабля (ТГК) серии «Прогресс-М» на высотах термосферы.

АКТИВНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «РАДАР–ПРОГРЕСС»

Космический эксперимент «Исследование наземными средствами наблюдения отражательных характеристик плазменных неоднородностей, генерируемых в ионосфере при работе бортовых двигателей ТГК “Прогресс”» (шифр «Радар–Прогресс») проводится с 2007 г. До 2010 г. использовался шифр КЭ «Плазма–Прогресс» [Лебедев и др., 2008; Potekhin et al., 2009; Хахинов и др., 2010, 2012, 2013]. Организации-участники: ФГУП «ЦНИИмаш», Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) и ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева» (РКК «Энергия»).

Космический эксперимент «Радар–Прогресс» проводится на этапах автономных полетов ТГК серии «Прогресс» после выполнения основной миссии по доставке грузов на МКС. Сеанс КЭ выполняется во время пролета ТГК в зоне обзора Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) [Khakhinov et al., 2009]. Включается бортовой жидкостный реактивный СКД. Используются наземные уникальные научные установки и оборудование центра коллективного пользования (ЦКП) «Ангара» ИСЗФ СО РАН [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/html/history.html>].

Во время или сразу после сеанса КЭ определяются гелиогеофизические и метеорологические условия: солнечная активность, состояние геомагнитного поля, фоновые параметры ионосферы, условия освещенности (зенитный угол Солнца), облачность.

Заранее планируются управляемые условия каждого сеанса КЭ: высота орбиты, направление вектора скорости выхлопных струй, тип и длительность работы ЖРД. Последние определяют массу сжигаемого топлива или количество инжектируемых в ионосферу продуктов сгорания. Используемый СКД сжигает 1 кг жидкого топлива в секунду. При длительности включения СКД до 11 с выхлопные продукты от сгорания 11 кг топлива инжектируются в ионосферу на дуге орбиты ТГК длиной более 80 км. Такие слабые воздействия на ионосферную плазму, сравнимые по мощности с естественными источниками возмущений, и планируемые условия каждого сеанса являются отличительной особенностью проводимого КЭ.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Условия сеанса КЭ, проведенного 17 апреля 2013 г. (ТГК «Прогресс-М-17 М»). Гелиогеофизическая обстановка: состояние геомагнитного поля очень спо-

койное, индекс солнечной активности $F10.7=107.1$, максимум электронной концентрации $5.87 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ находился на высоте 301 км. Метеорологические условия удовлетворяли проведению фотометрических измерений. Расчетные условия: высота орбиты ТГК — 412 км, длительность работы СКД — 9 с (13:24:38–13:24:47 UT), что соответствует сгоранию 9 кг топлива; направление выхлопных струй — навстречу радиолучу ИРНР. Оптическая аппаратура размещена в 120 км от ИРНР в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E).

Условия сеанса КЭ 30 июля 2014 г. (ТГК «Прогресс-М-23М»). Гелиогеофизическая обстановка: состояние геомагнитного поля спокойное, индекс солнечной активности $F10.7=157$, максимум электронной концентрации $2.8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ находился на высоте 352 км. Метеорологические условия удовлетворяли проведению фотометрических измерений. Расчетные условия: высота орбиты ТГК — 418 км, длительность работы СКД — 8 с (18:11:10–18:11:18 UT), что соответствует сгоранию 8 кг топлива; направление выхлопных струй — на ГФО.

Предполагаемый молекулярный состав выхлопных газов:

- $\text{H}_2\text{O}=2.932 \cdot 10^{-1}$, $\text{N}_2=2.676 \cdot 10^{-1}$, $\text{CO}=1.932 \cdot 10^{-1}$,
- $\text{H}_2=1.877 \cdot 10^{-1}$, $\text{CO}_2=4.946 \cdot 10^{-2}$, $\text{H}=8.524 \cdot 10^{-3}$,
- $\text{NO}=3.392 \cdot 10^{-4}$, $\text{OH}=2.853 \cdot 10^{-5}$, $\text{O}_2=2.744 \cdot 10^{-5}$,
- $\text{O}=1.391 \cdot 10^{-5}$, $\text{N}=5.376 \cdot 10^{-8}$.
- скорость газов $\sim 2.8 \text{ км/с}$,
- плотность $\sim 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$,
- температура $\sim 590 \text{ К}$.

В работе использовалась следующая оптическая аппаратура: спектрограф САТИ-1М [<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/spectr>], широкоугольная цветная ПЗС-камера [<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/color>], широкоугольная оптическая система КЕО Sentinel, предназначенная для регистрации пространственного распределения интенсивности эмиссии атомарного кислорода [OI] 630 нм. В сеансе 30 июля 2014 г. дополнительно использовался светосильный монохроматор МДР-2, оснащенный электронно-оптическим усилителем (ЭОП) и ПЗС-камерой.

Спектрограф САТИ-1М собран на основе спектрографа ИСП-51 (разработка ЛОМО) и цветной ПЗС-матрицы SONY ICX285AQ (камера «Видеоскан-285», разработка НПО «Видеоскан», [<http://videoscan.ru>]). Для согласования размеров матрицы и размеров спектров в фокальной плоскости в качестве камерного объектива установлен объектив «Гелиос-40» ($F=85 \text{ мм}$, 1:1.5). Для освещения входной щели спектрографа используется объектив «Юпитер-3» ($F=50 \text{ мм}$, 1:1.5). Рабочий спектральный диапазон спектрографа — 400–700 нм, время экспозиции спектра — 260 с, оптическая ось спектрографа САТИ-1М ориентирована на север с зенитным углом $\sim 67^\circ$.

Камера «Филин-1С» собрана на основе охлаждаемой цветной ПЗС-матрицы Kodak KAI-11002 (камера «Видеоскан-11002», разработка НПО «Видеоскан», [<http://videoscan.ru>]). В качестве входного объектива используется объектив «Мир-20» (фокусное расстояние 20 мм, относительное отверстие 1:3.5). Камера помещена в кожух с термостабилизацией, установлена на поворотной турели и ориентиро-

вана в северную часть небосвода в область полюса мира. Угловое поле зрения камеры «Филин-1С» составляет $\sim 90^\circ$, время экспозиции — 300 с, разрешение матрицы — 4004×2671 пикселей.

Широкоугольная оптическая система на линию атомарного кислорода [OI] 630 нм KEO Sentinel произведена компанией KEO Scientific Ltd [<http://keoscientific.com/space-science-imagers.php#SENTINEL>]. Поле зрения оптической системы — 145° , полуширина интерференционного фильтра (630 нм) — ~ 2 нм, оптическая система направлена в зенит, время экспозиции — 30 с, биннинг — 4. Кадры снимаются непрерывно, один за другим. Техническая пауза между кадрами — ~ 1 с.

Спектрограф на базе светосильного монохроматора МДР-2 (спектрограф МДР-2), ЭОП и ПЗС-матрицы предназначен для регистрации спектрального состава излучения верхней атмосферы Земли с высоким временным разрешением. Основное назначение — исследование возмущений в основных эмиссионных линиях и полосах OI 557.7, OI 630.0, NaI 589.0–589.6 нм и др., континуума и отдельных слабых эмиссий при гелиогеофизических возмущениях различной природы. Направление визирования — зенит, поле зрения — $\sim 10^\circ$, время экспозиции — 10 с, кадры снимаются непрерывно.

Зенитный угол Солнца во время работы ЖРД во время КЭ 17 апреля 2013 г. составлял величину $\sim -100^\circ$, т. е. наблюдения велись в условиях навигационных сумерек.

Для КЭ 30 июля 2014 г. эта величина составила $\sim -109^\circ$, т. е. наблюдения велись в условиях, близких к астрономическим сумеркам.

Орбиты ТГК «Прогресс М-17М» и «Прогресс М-23М» не попадали в поле зрения спектрографа САТИ-1М и широкоугольной цветной ПЗС-камеры. Эти приборы используются для проведения патрульных наблюдений естественного (фоновое) свечения ночного неба и мониторинга гелиогеофизических возмущений, требующих фиксированных ориентаций этих приборов. В настоящей работе они использовались для контроля прозрачности атмосферы, динамики основных эмиссионных линий верхней атмосферы и возможности регистрации возмущений в дальних областях атмосферы от места инъекции продуктов ТГК «Прогресс М-17М» и «Прогресс М-23М».

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Оптические наблюдения (оптическая система KEO Sentinel)

Эксперимент 17 апреля 2013 г. Во время работы СКД высота в зените нижней границы атмосферы, еще освещенной Солнцем, составляла ~ 140 км. Таким образом, ТГК и окружающая его область освещались прямым солнечным излучением, что благоприятствовало реализации механизма рассеяния света на газовых и дисперсных компонентах выхлопных струй СКД. С другой стороны, указанные условия уже позволяли выделять собственное излучение верхней атмосферы для оценки оптических эффектов, которые могут наблюдаться при модификации ионосферы [Mendillo, Baumgardner, 1982], в частности,

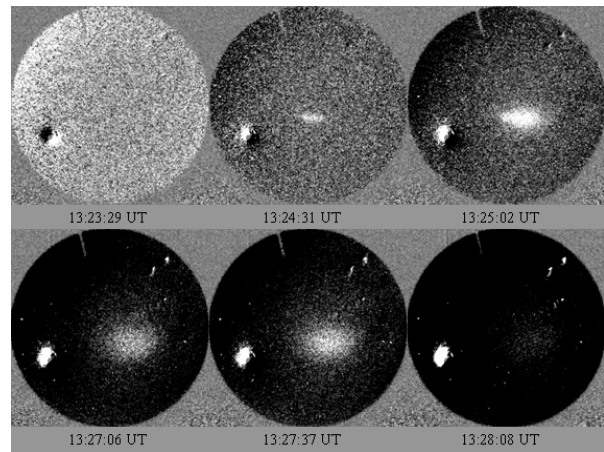


Рис. 1. Последовательность обработанных кадров изображений оптической системы KEO Sentinel в эмиссии 630 нм 17 апреля 2013 г. Время работы СКД — 13:24:38–13:24:47 UT.

в эмиссионных линиях атомарного кислорода 557.7 и 630 нм.

На рис. 1 показаны данные наблюдений камерой всего неба в линии 630 нм в период работы СКД. Указано время начала экспозиции соответствующих кадров. Изображения получались путем вычитания из текущих кадров опорного кадра, зарегистрированного непосредственно перед включением СКД. Яркое пятно в нижней левой части снимков представляет собой изображение Луны, уширенное вследствие эффекта блуминга. Более подробно методика обработки описана в работе [Михалев и др., 2016].

Начиная с кадра со временем начала экспозиции 13:24:31 UT, включающей время работы СКД, юго-восточнее центра изображений (зенита) отмечается область свечения повышенной интенсивности, которая в последующие моменты времени расширяется вдоль и поперек траектории полета ТГК. Общее время наблюдения области составило ~ 5 мин. По предварительным оценкам при высоте орбиты ТГК ~ 400 км скорость расширения области свечения в первые 60 с после включения СКД составила ~ 7 км/с вдоль орбиты ТГК и ~ 3.5 км/с поперек. Максимальные наблюдаемые размеры области были зарегистрированы через ~ 120 – 150 с составили ~ 350 км вдоль орбиты и ~ 250 км поперек.

Увеличение яркости возмущенной части изображения в максимуме относительно окружающего фона составило $\sim 20\%$. Учитывая, что обычно естественная интенсивность атмосферной эмиссии в зените в начале ночи составляет 200–300 Рл (это согласуется с данными измерений интенсивности эмиссии 630 нм спектрографом САТИ-1М в северной части небосвода, приведенными на рис. 3), можно оценить эквивалентную максимальную интенсивность возмущения величиной ~ 40 – 60 Рл в спектральной полосе пропускания интерференционного фильтра 2 нм.

Эксперимент 30 июля 2014 г.

На рис. 2 показана последовательность кадров, аналогичная рис. 1. Начиная с кадра со временем начала экспозиции 18:11:19 UT (рис. 2), зарегистрированного сразу после выключения СКД (18:11:18 UT),

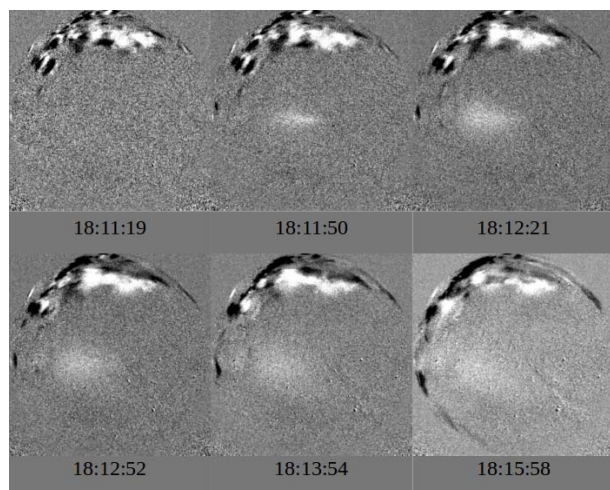


Рис. 2. Последовательность обработанных кадров изображений оптической системы KEO Sentinel в эмиссии 630 нм 30 июля 2014 г. Время работы СКД — 18:11:10–18:11:18 UT

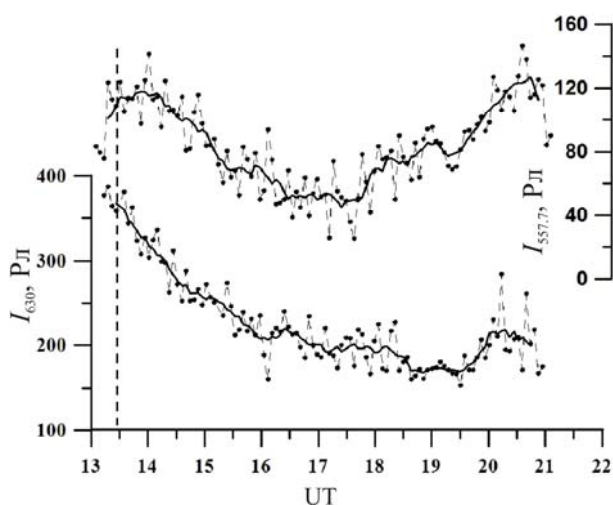


Рис. 3. Вариации интенсивности эмиссионных линий [OI] 557.7 и 630.0 нм в течение ночи 17/18 апреля 2013 г. Вертикальной штриховой линией указан временной интервал работы СКД

отмечается область свечения повышенной интенсивности, которая в последующие моменты времени расширяется вдоль и поперек траектории полета ТКГ. По предварительным оценкам скорость расширения, максимальные наблюдаемые размеры и общее время наблюдения области подобны значению, полученным для сеанса КЭ 17 апреля 2013 г.

Спектральные наблюдения (спектрографы САТИ-1М и МДР-2)

Эксперимент 17 апреля 2013 г.

На рис. 3 приведены данные наблюдений интенсивности собственного излучения верхней атмосферы в эмиссионных линиях атомарного кислорода [OI] 557.7 нм (высоты высвечивания ~85–115 км) и [OI] 630.0 нм (~180–300 км) в течение ночи 17/18 апреля 2013 г. по данным спектрографа САТИ-1М. Эти линии являются доминирующими эмиссиями, которые обычно регистрируются в экспериментах по модификации ионосферы во время работы ЖРД КА [Mendillo, Baumgardner, 1982]. Область регистрации естественного излучения верхней атмосферы располагалась на расстояниях ~235 км (для высоты мак-

симума высвечивания эмиссии 557.7 нм) и ~600 км (630.0 нм) к северу от зенита. На рис. 3 вертикальной штриховой линией указан временной интервал работы СКД. Предварительный анализ вариаций интенсивностей эмиссий 557.7 и 630 нм не позволяет выделить возмущения, связанные с включением СКД, существенно превышающие естественные вариации этих эмиссий. Это позволяет сделать предварительный вывод об отсутствии крупномасштабной модификации ионосферы в этом сеансе КЭ.

Эксперимент 30 июля 2014 г.

В эксперименте 30 июля 2014 г. использовались спектрограф САТИ-1М и спектрограф МДР-2, который был ориентирован в околоразенитную часть небосвода, близкую к орбите ТКГ «Прогресс М-23М». В связи с этим появлялась возможность сравнения поведения интенсивности эмиссии 630 нм в первые минуты после работы СКД двумя спектральными приборами, ориентированными в разных направлениях.

На рис. 4 показаны вариации интенсивности эмиссии 630 нм по данным наблюдений спектрографов САТИ-1М и МДР-2. СКД включался во второй половине ночи на фоне естественного уменьшения интенсивности эмиссии 630 нм. В отличие от спектрографа САТИ-1М со временем накопления сигнала 260 с время накопления сигнала спектрографа МДР-2 составляло 10 с. Вероятно, этим можно объяснить достаточно большие вариации сигнала по каналу спектрографа МДР-2. Тем не менее, используя сглаживание исходных данных (усреднение по 5 точкам для данных МДР-2 и по 3 точкам для САТИ-1), удастся выделить тенденции незначительных увеличений интенсивностей эмиссий 630 нм после работы СКД по обоим приборам. Максимумы интенсивностей наблюдались через 7–12 мин для данных спектрографа МДР-2 и 14–18 мин для данных спектрографа САТИ-1М.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Геофизические условия наблюдений, характерные времена жизни и пространственные размеры наблюдаемых оптических образований позволяют предварительно рассматривать два механизма наблюдаемых оптических эффектов.

Первый механизм может быть связан с рассеянием солнечного света на продуктах работы СКД [Адушкин и др., 2000; Платов и др., 2003]. В работе [Платов и др., 2011] отмечается, что наиболее важным фактором, определяющим интенсивность таких эффектов, является наличие дисперсных частиц. Дисперсные частицы образуются в результате конденсации паров воды и углекислого газа в выхлопной струе двигателей.

Второй механизм связан с модификацией ионосферы и появлением дополнительного излучения в эмиссии атомарного кислорода [OI] 630 нм [Mendillo, Baumgardner, 1982]. Анализ данных пространственного распределения интенсивности эмиссии [OI] 630 нм, полученных с помощью широкоугольной оптической системы KEO Sentinel во время работы

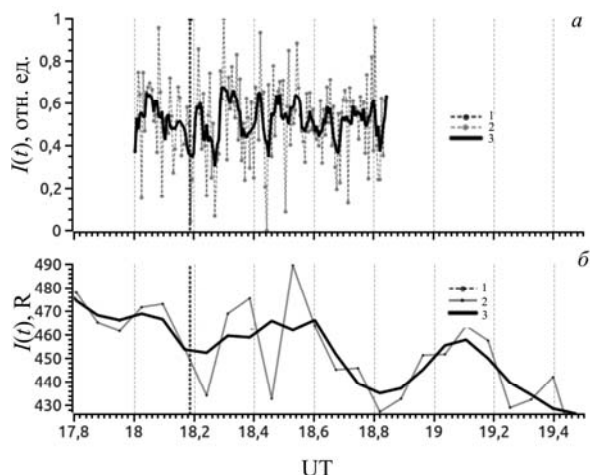


Рис. 4. Вариации интенсивности эмиссии 630 нм по данным наблюдений спектрографов МДР-2 (а) и САТИ-1М (б). Линии 1 — временной интервал работы СКД, 2 — исходные данные, 3 — усредненные данные (5 точек для данных МДР-2 (а) и 3 точки для данных САТИ-1М (б))

СКД ТГК «Прогресс М-17М» и «Прогресс М-23М», позволяет достаточно надежно выделить области свечения повышенной интенсивности. Максимальные наблюдаемые размеры области составили ~330–350 км вдоль орбиты и ~250–270 км поперек. Скорость расширения области свечения в первые моменты времени после начала работы СКД составила ~6–7 км/с вдоль орбиты и ~3–3.5 км/с поперек.

Сверхзвуковые скорости (~1–4 км/с) расширения оптических образований в верхней атмосфере при работе ЖРД отмечались и ранее [Ветчинкин и др., 1993; Tagirov et al., 1995]. Считается, что одним из механизмов распространения продуктов сгорания ЖРД на высотах верхней атмосферы является диффузия. В области, захваченной процессом диффузии, продукты инъекции ЖРД, кроме обычного процесса смешивания с атмосферой, могут приводить и к изменениям аэрономических процессов на высотах инъекции и сопровождаться модификацией ионосферы, включая изменения собственного излучения верхней атмосферы в основных эмиссионных линиях и полосах [Адушкин и др., 2000].

Данные, полученные с помощью оптической системы KEO Sentinel, не позволяют разделить эффекты рассеяния света на продуктах работы СКД и модификации ионосферы (увеличение эмиссии 630 нм). В связи с этим представляют интерес данные спектральных наблюдений в эксперименте с ТГК «Прогресс М-23М» и результаты, полученные ранее другими авторами в активных экспериментах с инъекцией больших масс.

Так, согласно [Biondi, Simpler, 1984], после выброса на высоте ~323 км в ионосферу $\sim 2.7 \cdot 10^{26}$ молекул CO_2 и $7.4 \cdot 10^{26}$ молекул H_2O образовалась светящаяся возмущенная зона. Через 2 мин после выброса увеличение эмиссии 630 нм достигло 400 Рл, а через 3 мин зона повышенной эмиссии достигла 250 км в диаметре.

В эксперименте, описанном в [Bernhardt et al., 1986], осуществлялась инъекция 18 кг SF_6 на высоте ~350 км, что привело к появлению светящейся зоны размером 56 км. Излучение ОI в линиях

777.4 и 630 нм превышало фон на 150 и 15 Рл соответственно, максимум интенсивностей наблюдался через 2 мин после инъекции.

В работах [Mendillo, 1980; Mendillo et al., 1981] описаны результаты исследования воздействия на ионосферу запуска КА НЕАО-С. При запуске КА в атмосферу ракетой было выброшено $7 \cdot 10^{29}$ молекул H_2O и H_2 , что вызвало образование ионосферной дыры, влияние которой прослеживалось на площади $(1 \div 3) \cdot 10^6 \text{ км}^2$. Дыра располагалась по следу КА на 2000–3000 км к востоку от места старта, протяженность в поперечном направлении составила 600–1000 км. В центре дыры в первые две минуты исчезло более 80 % электронов и ионов. Интегральное вертикальное свечение на длине волны 630 нм в дыре составило 8300 Рл (до запуска КА — 100 Рл). Эмиссия в линии 557.7 нм возросла с 300 до 900 Рл. Максимум интенсивностей наблюдался через несколько минут после старта КА, а через 10–20 мин интенсивности вернулись к исходным значениям. Аналогичный результат отмечался в [Mendillo, Baumgardner, 1982] при запуске КА NOAA-C, когда наблюдался всплеск эмиссии 630 нм в максимуме до 9 кРл.

По результатам приведенных выше работ для нас принципиально важными оказываются характерные размеры светящихся областей и динамика оптических образований и атмосферных эмиссий.

Так, согласно опубликованным данным, поперечные к траектории движения КА размеры области возмущений могут достигать 600–1000 км, что сопоставимо с удаленностью от зенитного направления в эмиссии 630 нм спектрографом САТИ-1М (~600 км). В нашем случае при регистрируемых скоростях возмущений поперек траектории полета ТГК ~3 км/с время достижения возмущений рабочей зоны спектрографа САТИ-1М составляет ~3 мин или более (в случае снижения скорости распространения).

По опубликованным данным максимум свечения в зоне инъекции достигался через несколько (от двух и более) минут после инъекции продуктов. Характерное время существования областей повышенного свечения в эмиссии 630 нм составляет единицы–десятки минут.

Зарегистрированные 30 июля 2014 г. временные задержки максимумов интенсивностей эмиссии 630 нм (7–12 мин для ближней зоны и 14–18 мин для дальней зоны) и характерное время существования возмущения в интенсивности эмиссии 630 нм (~5–15 мин) оказываются по порядкам величин сопоставимы с опубликованными данными при аналогичных экспериментах по инъекции больших объемов химических продуктов в верхнюю атмосферу и модификации ионосферы.

При интерпретации данных спектральных наблюдений важным является еще один экспериментальный факт, связанный с тем, что в части экспериментов «Радар–Прогресс» регистрировалось снижение электронной плотности [Хахинов и др., 2013], характерное для модификации ионосферы. Это связывают с реакцией диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов (H_2O^+ , O_2^+ , OH^+), ко-

торые могут образовываться в результате инжекции молекул H_2O , H_2 , CO_2 и OH , входящих в состав выхлопных газов ЖРД.

В связи с изложенным можно отметить, что характер наблюдаемых особенностей вариаций эмиссии ОI 630 нм при спектральных наблюдениях 30 июля 2014 г. не исключает их возможной связи с инжекцией выхлопных газов при работе СКД. Для подтверждения этого результата, безусловно, требуются дополнительные исследования, связанные с выяснением наиболее благоприятных геофизических условий реализации этого эффекта и, в частности, требующее интерпретации отсутствие подобного эффекта 17 апреля 2013 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ данных оптических наблюдений во время сеансов с участием ТГК «Прогресс М-17М» 17 апреля 2013 г. и «Прогресс М-23М» 30 июля 2014 г. позволяет сделать следующие выводы.

1. Во время работы СКД зарегистрированы области свечения повышенной интенсивности, предположительно связанные с рассеянием сумеречного солнечного излучения на продуктах работы СКД на орбите ТГК или с появлением дополнительного свечения в эмиссии атомарного кислорода [OI] 630 нм. Максимальные наблюдаемые размеры области свечения составили ~ 330–350 км вдоль орбиты и ~250–270 км поперек. Скорость расширения области свечения в первые моменты времени после начала работы СКД составила ~6–7 км/с вдоль орбиты и ~3–3.5 км/с поперек. Максимальная интенсивность области возмущения для ТГК «Прогресс М-17М» оценивается величиной, эквивалентной ~40–60 Рл в спектральной полосе 2 нм.

2. В сеансе с «Прогресс М-23М» 30 июля 2014 г. зарегистрированы незначительные возмущения атмосферной эмиссии [OI] 630.0 нм в ближней и дальней зонах от траектории полета корабля, возможно, связанные с инжекцией выхлопных газов СКД.

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН и в рамках гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В.В., С.И. Козлов, А.В. Петров. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду: Справочное пособие. М.: Изд. Анкил, 2000. 638 с.

Ветчинкин Н.В., Границкий Н.В., Платов Ю.В., Шейчуе А.И. Оптические явления в околоземной среде при работе двигательных установок ракет и спутников. I. Наземные и спутниковые наблюдения искусственных образований при запусках ракет // Косм. иссл. 1993. Т. 31, вып. 1. С. 93–100.

Карлов В.Д., Козлов С.И., Ткачев Г.Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем (обзор) // Косм. иссл. 1980. Т. 18, вып. 2. С. 266–277.

Лебедев В.П., Хахинов В.В., Габдуллин Ф.Ф. и др. Исследование методами радиозондирования характеристик плазменного окружения низкоорбитальных космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 50 (1). С. 51–60.

Михалев А.В., Ермилов С.Ю. Наблюдение возмущений эмиссионных ионосферных слоев, возникающих при полете космических систем // Иссл. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Новосибирск: СО РАН, 1997. Вып. 107. С. 206–217.

Михалев А.В., Хахинов В.В., Белецкий А.Б. и др. Оптические эффекты работы бортового двигателя космического аппарата «Прогресс М-17М» на высотах термосферы // Косм. иссл. 2016. Т. 54, № 2. С. 113–118.

Платов Ю.В., Куликова Г.Н., Черноус С.А. Классификация газопылевых образований в верхней атмосфере, связанных с выбросами продуктов сгорания ракетных двигателей // Косм. иссл. 2003. Т. 41, № 2. С. 168–173.

Платов Ю.В., Семенов А.И., Филиппов Б.П. Конденсация продуктов сгорания в выхлопной струе ракетных двигателей в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэронаука. 2011. Т. 51, № 4. С. 556–562.

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Радиофизические методы диагностики ионосферных возмущений, генерируемых бортовыми двигателями ТГК «Прогресс»: алгоритмы, инструменты и результаты // Журнал радиоэлектроники. 2010. С. 555–571.

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Результаты дистанционного зондирования ионосферных возмущений в активных космических экспериментах «Радар-Прогресс» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 199–208.

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Некоторые результаты активных космических экспериментов «Плазма-Прогресс» и «Радар-Прогресс» // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. Спец. вып. 2013. № 5 (51). С. 160–163.

Bernhardt P.A., Weber E.J., Moore J.G., et al. Excitation of oxygen permitted line emissions by SF injection into the F region // J. Geophys. Res. 1986. V. A91, N 8. P. 8937–8946.

Biondi Manfred A., Simpler Dwight P. Studies of equatorial 630 nm airglow enhancements produced by a chemical release in F region // Planet and Space Sci. 1984. V. 32, N 12. P. 1605–1610.

Khakhinov V.V., Lebedev V.A., Medvedev A.V., Rastovsky K.G. Capabilities of the Irkutsk incoherent scattering radar for space debris studies // Proc. 5th European Conf. on Space Debris. ESA SP-672. Darmstadt, Germany, 2009.

Mendillo M.J., Hawkins G.S., Klobuchar J.A. A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab // J. Geophys. Res. 1975. V. 80, N 16. P. 2217–2218.

Mendillo M.J. Report on investigations of atmospheric effects due to HEAO-C launch // AIAA Pap. 1980, no. 888. pp. 1–5.

Mendillo M., Rote D., Bernhardt P.A. Preliminary report on the HEAO hole in the ionosphere // EOS Trans. Amer. Geophys. Union. 1981. V. 61, N 28. P. 529–530.

Mendillo M., Baumgardner J. Optical signature of ionospheric hole // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9, N 3. P. 215–218.

Mikhalev A.V. Midlatitude airglow during heliogeophysical disturbances // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. V. 51, N 7. P. 974–978.

Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., et al. Active space experiments with the use of the transport spacecraft Progress and Irkutsk IS Radar // PIERS Proc. Moscow, 2009. P. 223–227.

Tagirov V.R., Arinin V.A., Ismagilov V.V., Klimenko V.V. Unusual optical emission in the atmosphere caused by human activity // 22nd European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods. Finland, Nurmijarvi. 1995. P. 7.

URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru/html/history.html> (дата обращения 5 сентября 2016 г.).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/spectr> (дата обращения 5 сентября 2016 г.).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/color> (дата обращения 5 сентября 2016 г.).

URL: <http://videoscanner.ru> (дата обращения 5 сентября 2016 г.).

URL: <http://keoscientific.com/space-science-imagers.php#SENTINEL> (дата обращения 5 сентября 2016 г.).

REFERENCES

Adushkin V.V., Kozlov S.I., Petrov A.V. Ecological problems and risks of space-rocket hardware effect on environment Moscow: Ankil Publ., 2000. 638 p. (In Russian).

Bernhardt P.A., Weber E.J., Moorc J.G., Baumgardner J., Mendillo M. Excitation of oxygen permitted line emissions by SF injection into the F region. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. A91, no. 8, pp. 8937–8946.

Biondi Manfred A., Simpler Dwight P. Studies of equatorial 630 nm airglow enhancements produced by a chemical release in F region. *Planet and Space Sci.* 1984, vol. 32, no. 12, pp. 1605–1610.

Karlov V.D., Kozlov S.I., Tkachev G.N. Large-scale ionospheric disturbances during the rocket flight with working engine (Overview). *Kosmicheskie issledovaniya*. [Cosmic Research]. 1980, vol. 18, iss. 2, pp. 266–277. (In Russian).

Khakhinov V.V., Lebedev V.A., Medvedev A.V., Ratovsky K.G. Capabilities of the Irkutsk Incoherent Scattering Radar for space debris studies. Proc. 5th European Conf. on Space Debris. ESA SP-672. Darmstadt, Germany, 2009.

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Shpynev B.G., Zarudnev V.E., Alsatkin S.S., Ratovskii K.G., Podlesnyi A.V., Bryn'ko I.G. Radiophysical methods of diagnostics of ionospheric disturbances generated by cargo spacecraft "Progress" on-board engines: Algorithms, instruments and results. *Zhurnal Radio-elektroniki* [J. of Radio Electronics]. 2010, pp. 555–571. (In Russian).

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Alsatkin S.S., Ratovskii K.G., Kushnarev D.S., Tverdokhlebova E.M., Kurshakov M.Yu., Manzhelai A.I., Timofeeva N.I. Results of remote sounding of ionospheric disturbances during active space experiments "Radar-Progress". *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2012, vol. 9, no. 3, pp. 199–208. (In Russian).

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Kushnarev D.S., Alsatkin S.S. Some results of active space experiments "Plasma-Progress" and "Radar-Progress". *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*. [Bull. of Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev]. 2013, iss. 5 (51), pp. 160–163. (In Russian).

Lebedev V.P., Khakhinov V.V., Gabdullin F.F., Korsun A.G., Tverdokhlebova E.M., Laletina E.A., Manzhelai A.I. Studying characteristics of plasma surroundings of low-orbit spacecraft. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering]. 2008, no. 50 (1), pp. 51–60. (In Russian).

Mendillo M.J., Hawkins G.S., Klobuchar J.A. A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab. *J. Geophys. Res.* 1975, vol. 80, no. 16, pp. 2217–2218.

Mendillo M.J. Report on investigations of atmospheric effects due to HEAO-C launch // AIAA Pap. 1980, no. 888, pp. 1–5.

Mendillo M., Rote D., Bernhardt P.A. Preliminary report on the HEAO hole in the ionosphere. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*. 1981, vol. 61, no. 28, pp. 529–530.

Mendillo M., Baumgardner J. Optical signature of ionospheric hole. *Geophys. Res. Lett.* 1982, vol. 9, no. 3, pp. 215–218.

Mikhalev A.V. Midlatitude airglow during heliogeophysical disturbances. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011, vol. 51, no. 7, pp. 974–978.

Mikhalev A.V., Ermilov S.Yu. Observation of disturbances of ionospheric emission layers during spacecraft flights. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. Novosibirsk: SB RAS Publ. 1997, iss. 107, pp. 206–217. (In Russian).

Mikhalev A.V., Khakhinov V.V., Beletskii A.B., Lebedev V.P. Optical effects of the working onboard engine of the spacecraft "Progress M-17M" at thermosphere heights. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 2016, vol. 54, no. 2, pp. 113–118. (In Russian).

Platov Yu.V., Kulikova G.N., Chernous S.A. Classification of gas-dust formations in the upper atmosphere caused by exhausts of combustion products from rocket engines. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 2003, vol. 41, no. 2, pp. 168–173. (In Russian).

Platov Yu.V., Semenov A.I., Filippov B.P. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2011, vol. 51, no. 4, pp. 556–562. (In Russian).

Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., Shpynev B.G. Active Space Experiments with the use of the Transport Spacecraft "Progress" and Irkutsk IS Radar. *PIERS Proc.* Moscow, Russia, 2009, pp. 223–227.

Tagirov V.R., Arinin V.A., Ismagilov V.V., Klimenko V.V. Unusual optical emission in the atmosphere caused by human activity. *22nd European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods*. Finland, Nurmijarvi. 1995, p. 7.

Vetchinkin N.V., Granitskii N.V., Platov Yu.V., Sheichue A.I. Optical phenomena in near-Earth space during operation of rocket and satellite engines. I. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 1993, vol. 31, iss. 1, pp. 93–100. (In Russian).

URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru/html/history.html> (accessed September 5, 2016).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/spectr> (accessed September 5, 2016).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/color> (accessed September 5, 2016).

URL: <http://videoscanner.ru> (accessed September 5, 2016).

URL: <http://keoscientific.com/space-science-imagers.php#SENTINEL> (accessed September 5, 2016).