
ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ВЫСОТАХ НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ

OPTICAL EFFECTS OF RUNNING SPACECRAFT ENGINES IN THE LOWER THERMOSPHERE

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

Аннотация. На основе данных наблюдений в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН проводится краткий обзор оптических эффектов, вызванных работой бортовых двигателей космических аппаратов (КА) на высотах нижней термосферы. Представлены результаты наблюдений возмущений свечения ночной атмосферы в период работы корректирующих двигателей КА на высотах F2-области ионосферы в космическом эксперименте «Радар–Прогресс». При массе продуктов сгорания, инжектируемых корректирующими двигателями КА, ~10 кг наблюдается увеличение интенсивности эмиссии атомарного кислорода [OI] 630.0 нм. Представлены наблюдаемые в дальней зоне от места старта оптические эффекты, обусловленные стартами с космодрома «Байконур» и пролетами тяжелых ракет-носителей «Энергия» с КА «Скиф-ДМ» 15 мая 1987 г и «Протон-М» с КА «Ямал-601» 30 мая 2019 г. Рассмотрена возможность усиления атмосферной эмиссии [OI] 557.7 нм за счет химической модификации ионосферы в E-области ионосферы при полете космической системы «Энергия».

Ключевые слова: собственное свечение атмосферы, запуски космических аппаратов, ионосфера, модификация ионосферы.

Abstract. This paper provides a brief overview on optical effects during operation of spacecraft (SC) onboard engines in the lower thermosphere according to observational data from the ISTP SB RAS Geophysical Observatory. We present the results of detected disturbances in the night airglow during operation of SC vernier engines in the F2-region of the ionosphere in the “Radar–Progress” space experiment. With weights of combustion products of ≤ 10 kg injected by SC vernier engines, the atmospheric emission of [OI] 630.0 nm atomic oxygen is enhanced. We also show optical effects from the launches and passages of heavy launch vehicles “Energiya” from the Skif-DM spacecraft on May 15, 1987 and “Proton-M” from the Yamal-601 spacecraft on May 30, 2019 from Baikonur in the zone far from the launch site. We explore the possibility of enhanced [OI] 557.7 nm atmospheric emission due to chemical modification of the ionosphere in the E-region during the flight of the Energiya space system.

Keywords: airglow, spacecraft launches, ionosphere, ionospheric modification.

ВВЕДЕНИЕ

Возмущения в верхней атмосфере и ионосфере Земли, возникающие при полете ракеты с работающими двигателями, их различные аспекты и особенности исследуются достаточно давно. Наиболее часто рассматриваются химическая модификация ионосферы при запусках космических аппаратов (КА) [Mendillo et al., 1975, 1993; Mendillo, Baumgardner, 1982] и проведении активных космических экспериментов [Biondi, Sipler, 1984; Semeter et al., 1996; Хахинов и др., 2013], физическая природа эффектов,

связанных с модификации химического состава атмосферы и, в частности, приводящих к усилению интенсивностей некоторых эмиссий верхней атмосферы [Mendillo, 1980; Dressler et al., 1991; Платов и др., 2002], классификация и динамика ионосферных и газопылевых образований в верхней атмосфере, связанных с выбросами ракетными двигателями продуктов сгорания топлива [Карлов и др., 1980; Ветчинкин и др., 1993; Платов и др., 2003], экологические проблемы загрязнения атмосферы продуктами сгорания ракетного топлива [Крестников, 2018;

Адушкин и др., 2000]. Формирование искусственных ионосферных образований зависит от многих гелиогеофизических условий, в которых они реализуются и регистрируются (высоты инжекции, состав и количество инжектируемого вещества, уровни солнечной и геомагнитной активности и др.) [Шпынев и др., 2017].

В настоящей работе на основе данных наблюдений в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН проводится краткий обзор оптических эффектов, вызванных работой бортовых двигателей космических аппаратов (КА) на высотах нижней термосферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Оптические эффекты, наблюдаемые в период работы корректирующих двигателей КА на орбитальных высотах в F2-области

Этот тип оптических эффектов регистрировался во время проведения контролируемого космического эксперимента «Радар–Прогресс» [Хахинов и др., 2013] при работе сближающе-корректирующих двигателей транспортных грузовых кораблей (ТГК) серии «Прогресс» на орбитальных высотах. Во время экспериментов с ТГК «Прогресс М-17М» 17 апреля 2013 г. и «Прогресс М-23М» 30 июля 2014 г. камерой КЕО Sentinel были зарегистрированы протяженные области повышенной яркости в полосе пропускания интерференционного фильтра на эмиссию [OI] 630.0 нм [Белецкий и др., 2016; Михалев и др., 2016]. В обоих экспериментах масса сгоревшего топлива составляла ~8–9 кг, время работы сближающе-корректирующих двигателей ~8–9 с, высота орбит ТГК — 412–418 км, химический состав выхлопных газов — H_2O , N_2 , CO , H_2 , CO_2 , H , NO , OH , O_2 , O , N [Адушкин и др., 2000]. Длительности регистрации областей повышенной яркости составили ~5–15 мин. Характерные пространственные размеры областей повышенной интенсивности оценивались ~250–350 км.

На рис. 1 приведен пример регистрации области повышенной яркости камерой КЕО Sentinel в эмиссии 630 нм в эксперименте с ТГК «Прогресс М-17М» 17 апреля 2013 г. через 3 мин после включения сближающе-корректирующего двигателя. Яркое пятно в левой части кадра является переэкспонированным изображением Луны.

Оптические эффекты, наблюдаемые в период запусков КА в дальней зоне от места старта

Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН находится на расстоянии ~3000 км к востоку от космодрома «Байконур». После организации оптических наблюдений собственного излучения верхней атмосферы Земли в ИСЗФ СО РАН предпринимались отдельные попытки обнаружения возмущений в излучении атмосферы, аналогичных так называемым ионосферным дырам, регистрируемым при стартах больших космических систем (КС) [Mendillo, Baumgardner, 1982; Mendillo, 1988].

Первой такой попыткой можно считать наблюдение возмущений эмиссии атомарного кислорода [OI] 557.7 нм при старте и полете КС «Энергия» 15 мая

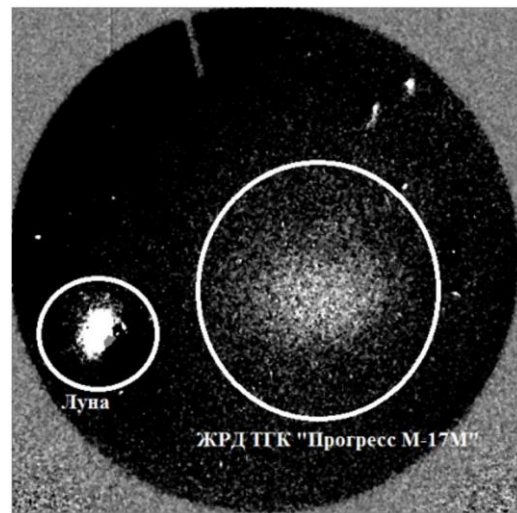


Рис. 1. Область повышенной яркости, зарегистрированная камерой КЕО Sentinel в эксперименте с ТГК «Прогресс М-17М» 17 апреля 2013 г. Время регистрации 13:27:37 UT

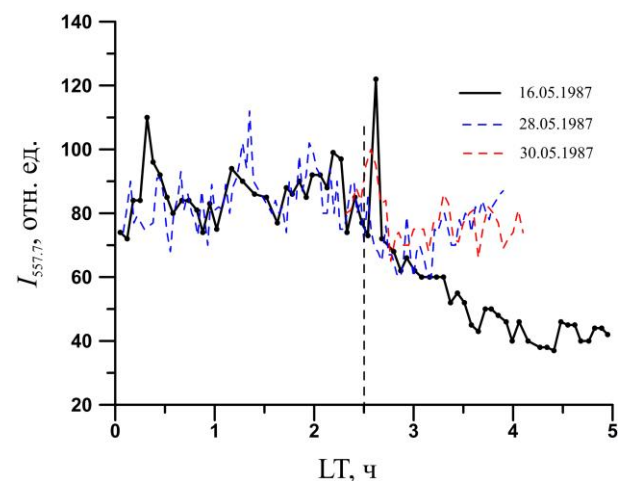


Рис. 2. Вариации интенсивности эмиссии [OI] 557.7 нм при полете КС «Энергия» [Михалев, Ермилов, 1997]. Вертикальной штриховой линией отмечен момент старта

1987 г. [Михалев, Ермилов, 1997]. На рис. 2 представлено поведение интенсивности эмиссии [OI] 557.7 нм при полете КС «Энергия». Основные особенности наблюдаемых возмущений собственного излучения верхней атмосферы: через 7–8 мин после старта КС «Энергия» отмечались вначале кратковременное увеличение интенсивности эмиссии [OI] 557.7 нм (до 50%), затем в течение ~30 мин снижение уровня вариаций излучения и следующие 2.5 ч общее снижение интенсивности излучения. Позднее в ГФО исследовалось поведение эмиссий [OI] 557.7 и 630.0 нм при запусках КА «Союз-4ТМ» 21 декабря 1987 г., «Прогресс-35» 23 марта 1988 г., «Фобос-2» 12 июля 1988 г., и «Союз-7ТМ» 26 ноября 1988 г. Эффекта, аналогичного по амплитуде эффекту от полета КС «Энергия», выявлено не было, но было отмечено изменение временного спектра вариаций оптического излучения в послестартовые периоды (диапазон периодов десятки–сотни секунд). Характерное время между стартом КА и появлением тенденции к изменению временного спектра эмиссии 557.7 нм составляло 7–25 мин.

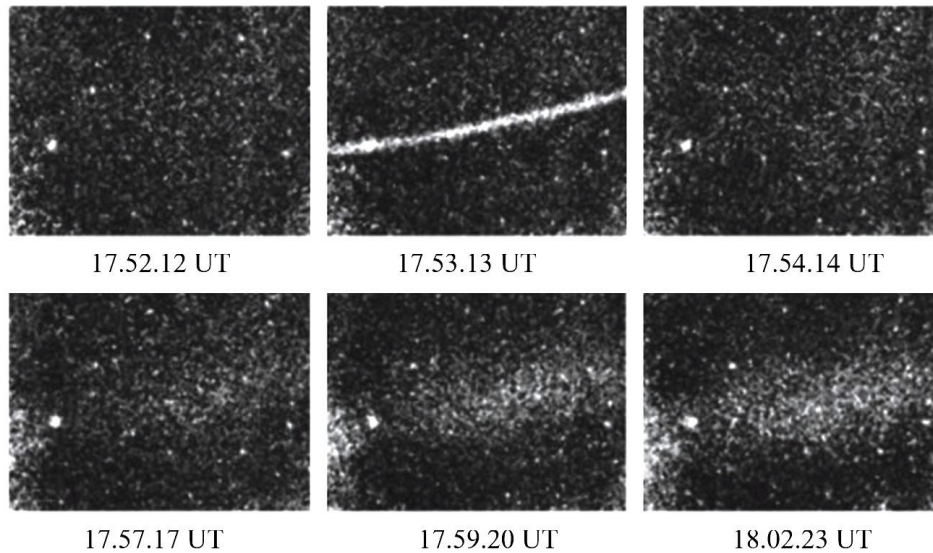


Рис. 3. Фрагменты изображений, полученных камерой KEO Sentinel в эмиссии [OI] 630.0 нм 30 мая 2019 г.

Второе событие, при котором было достаточно надежно зарегистрировано возмущение в излучении верхней атмосферы в послестартовые моменты, связано со стартом и полетом ракеты-носителя «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М» и КА «Ямал-601» 30 мая 2019 г. [Михалев и др., 2022]. Задержка между стартом ракеты-носителя «Протон-М» с космодрома «Байконур» и временем регистрации ее пролета над ГФО составила ~11 мин. Спустя ~2–4 мин после пролета ракеты-носителя над ГФО сформировалась протяженная область свечения вдоль траектории КА, которая сохранялась ~20 мин. Регистрация осуществлялась с помощью камеры всего неба KEO Sentinel в эмиссии [OI] 630.0 нм. На рис. 3 приведены изображения, полученные при пролете ракеты-носителя «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М» над ГФО.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

В средних широтах в спокойных геомагнитных условиях заселение спектрального уровня атомарного кислорода $O(^1D)$, ответственного за излучение эмиссии [OI] 630.0 нм на высотах ~200–300 км, в основном осуществляется в результате реакций диссоциативной рекомбинации ионов молекулярного кислорода O_2^+ и окиси азота NO^+ [Шефов и др., 2006; Meneses et al., 2008].

Оптические эффекты, наблюдаемые в период работы корректирующих двигателей КА на орбитальных высотах в F2-области ионосферы

Оптические эффекты, зарегистрированные во время космического эксперимента «Радар–Прогресс», первоначально связывались с рассеянием сумеречного солнечного и лунного света на продуктах сгорания топлива на орбите ТГК [Платов и др., 2003; Платов и др., 2011] и/или с появлением дополнительного свечения в эмиссии атомарного кислорода [OI] 630 нм в результате химической модификации ионосферы [Mendillo, Baumgardner, 1982; Mendillo,

1988]. В случае эффектов рассеяния солнечного и лунного света оптический спектр зарегистрированных областей повышенной интенсивности в большей степени должен отражать спектральный состав излучения Солнца. В случае модификации ионосферы в спектре свечения ночного неба должны наблюдаться усиления интенсивностей эмиссий [OI] 557.7 и 630.0 нм. Во время эксперимента с ТГК «Прогресс М-23М» 30 июля 2014 г. было получено незначительное усиление интенсивности эмиссии [OI] 630.0 нм [Белецкий и др., 2016]. Позднее в работе [Михалев и др., 2020] при анализе опубликованных результатов контролируемых экспериментов по инжекции «плазмогасящих» веществ на высотах нижней термосферы была показана возможность модификации ионосферы, приводящей к усилению интенсивности эмиссии [OI] 630.0 нм, в экспериментах «Радар–Прогресс» с малым количеством вещества, инжектируемого корректирующими двигателями КА. В указанной работе был рассмотрен вклад компонентов вещества (H_2 , OH, H_2O , CO и CO_2), инжектируемого в экспериментах «Радар–Прогресс», в усиление интенсивности эмиссии [OI] 630.0 нм. Показано, что для усиления эмиссии [OI] 630.0 нм наиболее эффективной является инжекция в атмосферу молекул водорода H_2 и углекислого газа CO_2 .

Еще одним аргументом в пользу модификации ионосферы в экспериментах «Радар–Прогресс» могут служить наблюдаемые в отдельные сеансы понижения электронной плотности (рис. 4) длительностью до ~10–20 мин [Хахинов и др., 2013, Шпынев и др., 2017], которые совпадают с характерными временами существования возмущений в интенсивности эмиссии 630 нм (~5–15 мин) [Белецкий и др., 2016].

Оптические эффекты, наблюдаемые в период запусков КА в дальней зоне от места старта

В работе [Михалев, Ермилов, 1997] детальное обсуждение результатов наблюдения кратковременного увеличения интенсивности излучения эмиссии [OI] 557.7 нм не проводилось в связи с отсутствием на тот период траекторных характеристик КС «Энер-

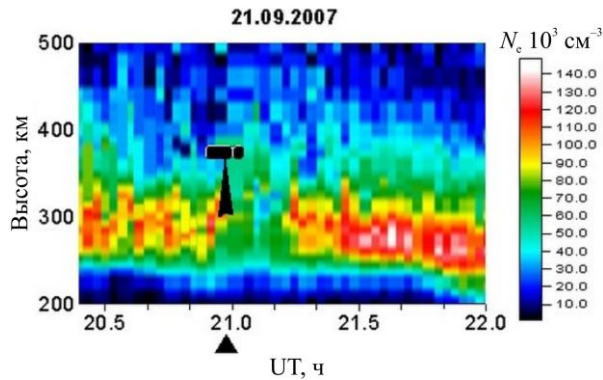


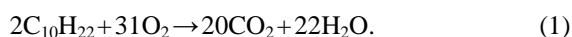
Рис. 4. Пример динамики формирования области пониженной концентрации электронов N_e после включения двигателей КА (▲)

гия». Было лишь отмечено, что оптические эффекты, связанные с увеличением интенсивностей запрещенных эмиссий атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630.0 нм, ранее отмечались при запусках ракет-носителей типа Atlas-Centaur и др. на высотах более 200 км [Ruscroft, 1982]. Увеличение интенсивностей эмиссий [OI] 557.7 и 630.0 нм связывается с химическими реакциями продуктов сгорания — молекул H_2 , H_2O , CO_2 и др. — с ионом O_2^+ , приводящими к ускорению процесса диссоциативной рекомбинации в 100–1000 раз (модификация ионосферы) с образованием атомарного кислорода в возбужденных состояниях.

В настоящее время известно, что КС «Энергия» несла макетный образец КА «Скиф-ДМ» массой 80 т. Маршевые двигатели ракеты-носителя «Энергия» были отключены через 467.8 с после старта КС «Энергия», а через 15 с произошло отделение КА «Скиф-ДМ». КА «Скиф-ДМ» после разделения со второй ступенью КС «Энергия» должен был с помощью собственных двигателей выполнить поворот на 180° по направлению полета для выведения на круговую околоземную орбиту. Однако из-за нештатной работы бортовых систем последующее автоматическое включение маршевой двигательной установки КА «Скиф-ДМ» было выполнено на вращающемся КА, что не позволило вывести его на круговую околоземную орбиту [Губанов, 1998].

Наблюдаемое 15 мая 1987 г. в ГФО кратковременное увеличение интенсивности излучения эмиссии [OI] 557.7 нм через 7–8 мин (420–480 с) после старта КС «Энергия» можно связать с последними секундами ($T \sim 467.8$ с) работы двигателей второй ступени КС «Энергия». Это позволяет допустить прохождение КС «Энергия» в близкой зоне от ГФО, предположительно на высотах E-области ионосферы ~ 100 – 120 км.

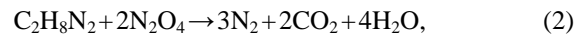
Космическая станция «Энергия» была оборудована кислородно-керосиновым двигателем, топливом служил керосин ~ 350 т (средняя формула — $C_{10}H_{22}$), а в качестве окислителя использовался жидкий кислород ~ 1500 т. При окислении керосина кислородом выделяется водяной пар (H_2O) и диоксид углерода (CO_2) по стехиометрической формуле [Портола и др., 2012]



При запуске КА «Ямал-601» компоненты топлива разгонного блока «Бриз» состояли из тетраоксида азота N_2O_4 (окислитель) и горючего несим-

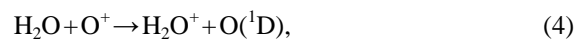
метричного диметилгидразина $C_2H_8N_2$ (НДМГ) [<https://www.roscosmos.ru/450>].

В реакции окисления горючего НДМГ тетраоксидом азота



так же как и при окислении керосина кислородом, образуются молекулы углекислого газа CO_2 и воды H_2O .

При модификации ионосферы в результате инъекции в верхнюю атмосферу продуктов сгорания топлива водяной пар H_2O и диоксид углерода CO_2 обычно рассматриваются как одни из основных компонентов в реакциях диссоциативной рекомбинации, сопровождающихся снижением электронной концентрации и одновременным усилением интенсивностей эмиссий [OI] 557.7 и 630.0 нм [Mendillo et al., 1975, 1993; Dressler et al., 1991]:



Не исключено, что реакции (3)–(5) с участием паров воды H_2O вносят основной вклад в снижение электронной концентрации в области их протекания, а реакция (6) с участием диоксида углерода CO_2 , в которой ион молекулярного кислорода может впоследствии участвовать в реакции диссоциативной рекомбинации, является одной из основных реакций, обеспечивающих усиление интенсивностей эмиссий [OI] 557.7 и 630.0 нм [Михалев и др., 2020].

Естественно, что усиление интенсивностей эмиссий [OI] 557.7 и 630.0 нм будет зависеть от высотного распределения электронной концентрации, атомарных и молекулярных ионов O_2^+ , O^+ , и других атмосферных составляющих на высотах инъекции продуктов сгорания топлива КА. Так, электронная концентрация, имея максимум на высотах 270–350 км (F2-область ионосферы), может иметь в отдельные часы ночного времени существенные значения ($\sim 10^3$ – 10^4 cm^{-3}) на высотах ~ 110 км (E-, E_s-слои ионосферы) [Миртов, Старкова, 1976; Энциклопедия..., 2008]. Это касается и атомарных и молекулярных ионов O_2^+ , O^+ [Данилов, Власов, 1973; Мишин и др., 1989]. Вероятно, при интерпретации оптических эффектов полета КС «Энергия» не следует исключать возникновение ударных волн и модуляцию эмиссионного слоя 557.7 нм, учитывая орбитальные скорости и рекордные массы КС «Энергия» (2400 т) и полезной нагрузки макетного образца КА «Скиф-ДМ» (80 т) [Губанов, 1998]. Например, подобный эффект модуляции и искривления эмиссионного слоя 557.7 нм, предположительно связанный с падением крупного метеороида [Авакян и др., 1991], визуально наблюдался с международной космической станции «Мир».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе [Дмитриев и др., 1991] была выполнена количественная оценка усиления эмиссии [OI] 630.0 нм за счет инъекции в верхнюю атмосферу (высоты F2-области ионосферы) диоксида углерода

CO₂, кислорода O₂ и водорода H₂, образующихся при работе ракетных двигателей. Было получено, что для усиления эмиссии [OI] 630.0 нм в 10 раз необходима инжекция указанных газов в количестве CO₂ — 100 т, O₂ — 100 т, H₂ — 0.063 т. Анализ оптических эффектов, наблюдавшихся в активном космическом эксперименте «Радар–Прогресс» при работе корректирующих двигателей ТГК на высотах F2-ионосферы, позволил скорректировать минимальную массу (≤10 кг) инжектируемых продуктов сгорания топлива, при которой становятся доступны их обнаружение и регистрация в наземных оптических наблюдениях. В этом случае ожидаемое возрастание интенсивности эмиссии [OI] 630.0 нм над фоновым значением может достигать ~10–50 Рл, характерные размеры светящихся областей — десятки и сотни километров, а времена жизни этих образований — десятки–сотни секунд, в зависимости от массы инжектируемого вещества.

Представлены особенности и условия полета КС «Энергия» с КА «Скиф-ДМ», при котором в дальней зоне от места старта отмечалось кратковременное усиление интенсивности эмиссии [OI] 557.7 нм. Рассмотрена возможность усиления эмиссии [OI] 557.7 нм за счет химической модификации ионосферы в E-области ионосферы при полете КС «Энергия». С учетом регистрации оптических эффектов, вызванных полетом КА «Ямал-601» полезной массой 20 т, можно предположить, что, вероятно, географическое местоположение ГФО позволяет достаточно надежно регистрировать в дальней зоне от места старта оптические эффекты стартов и пролетов тяжелых ракет-носителей с космодрома «Байконур».

Представленные в настоящей работе результаты могут быть использованы при создании эмпирической модели вариаций атмосферных эмиссий [OI] 557.7 и 630.0 нм при химической модификации ионосферы продуктами сгорания ракетного топлива, которая дополнит список существующих эмпирических моделей вариаций атмосферных эмиссий верхней атмосферы [Шефов и др., 2006].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/ЦЗ569/278) и РФФИ (грант № 20-05-00580). В работе использовались данные оптического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авакян С.В., Евлашин Л.С., Коваленок В.В. и др. *Наблюдения полярных сияний из космоса*. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 229 с.

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

Белецкий А.Б., Михалев А.В., Хахинов В.В. и др. 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).

Ветчинкин Н.В., Границкий Н.В., Платов Ю.В., Шейхет А.И. Оптические явления в околоземной среде при работе двигательных установок ракет и спутников. I. Наземные и спутниковые наблюдения искусственных

образований при запусках ракет. *Космические исследования*. 1993. Т. 31, вып. 1. С. 93–100.

Губанов Б.И. *Триумф и трагедия «Энергии»: размышления главного конструктора*. Т. 3: «Энергия» — «Буран». Нижний Новгород: Изд-во НИЭР, 1998. 432 с.

Данилов А.Д., Власов М.Н. Фотохимия ионизованных и возбужденных частиц в нижней ионосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 190 с.

Дмитриев А.Н., Плаксин А.А., Семенов А.И., Шефов Н.Н. Техногенная стимуляция свечения верхней атмосферы. *Оптика атмосферы и океана*. 1991. Т. 4, № 5. С. 546–552.

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

Крестников И.Ф. Экологические аспекты космической деятельности. *Гелиогеофизические исследования*. 2018. Вып. 17. С. 93–99.

Миртов Б.А., Старкова А.Г. Высотное распределение суточных вариаций электронной концентрации в слое атмосферы 100–200 км (средние широты). *Физика ионосферы (Краткие сообщения)*. М.: Наука, 1976. С. 77–78.

Михалев А.В., Ермилов С.Ю. Наблюдение возмущений эмиссионных ионосферных слоев, возникающих при полете космических систем. *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. Изд-во СО РАН, 1997. Вып. 107. С. 206–217.

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. *Космические исследования*. 2016. Т. 54, № 2. С. 113–118. DOI: [10.7868/S0023420616020035](https://doi.org/10.7868/S0023420616020035).

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 аэронаука*. 2020. Т. 60, № 1. С. 116–125. DOI: [10.31857/S0016794020010101](https://doi.org/10.31857/S0016794020010101).

Михалев А.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П. и др. Оптические эффекты полета ракеты-носителя «Протон-М» со спутником Ямал-601 в дальней от места старта зоне. *Космические исследования*. 2022. Т. 60, № 2. С. 125–133. DOI: [10.31857/S0023420622020054](https://doi.org/10.31857/S0023420622020054).

Мишин Е.В., Ружин Ю.Я., Телегин В.А. *Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой*. М.: Гидрометеоиздат, 1989. 264 с.

Платов Ю.В., Семенов А.И., Шефов Н.Н. Увеличение интенсивности эмиссии гидроксила в мезопаузе, обусловленное выбросом продуктов сгорания ракетных двигателей. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2002. Т. 42, № 4. С. 522–528.

Платов Ю.В., Куликова Г.Н., Черноус С.А. Классификация газопылевых образований в верхней атмосфере, связанных с выбросами продуктов сгорания ракетных двигателей. *Космические исследования*. 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.

Портола В.А., Луговцова Н.Ю., Торосян Е.С. Расчет процессов горения и взрыва: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 108 с.

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*. 2013. № 5 (51). С. 160–162.

Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. *Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики*. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.

Шпынев Б.Г., Алсаткин С.С., Хахинов В.В., Лебедев В.П. Исследование реакции ионосферы на продукты горения топлива при работе двигателей транспортных грузовых кораблей серии «Прогресс» по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 1. С. 88–96.

Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Ионосферная плазма. Часть I. М.: ЯНУС-К, 2008. 508 с.

Biondi M.A., Sipler D.P. Studies of equatorial 630.0 nm airglow enhancements produced by a chemical release in the F-region. *Planet. Space Sci.* 1984. Vol. 32, no. 12. P. 1605–1610.

Dressler R.A., Gardner J.A., Cooke D.L., Mirad E. Analysis of ion densities in the vicinity of space vehicles' non-neutral chemical kinetics. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, no. A8. P. 13795–13806. DOI: [10.1029/91JA01410](https://doi.org/10.1029/91JA01410).

Mendillo M.J. Report on investigations of atmospheric effects due to HEAO-C launch. *AIAA Meeting Pap.* 1980. No. 888. P. 1–5. DOI: [10.2514/6.1980-888](https://doi.org/10.2514/6.1980-888).

Mendillo M. Ionospheric holes: a review of theory and recent experiment. *Adv. Space Res.* 1988. Vol. 8, no. 1. P. 51–62. DOI: [10.1016/0273-1177\(88\)90342-0](https://doi.org/10.1016/0273-1177(88)90342-0).

Mendillo M., Baumgardner J. Optical signature of ionospheric hole. *Geophys. Res. Lett.* 1982. Vol. 9, no. 3. P. 215–218. DOI: [10.1029/GL009i003p00215](https://doi.org/10.1029/GL009i003p00215).

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. P. 2217–2218. DOI: [10.1029/JA080i016p02217](https://doi.org/10.1029/JA080i016p02217).

Mendillo M., Semeter J., Noto J. Finite element simulation (FES): A computer modeling technique for studies of chemical modification of the ionosphere. *Adv. Space Res.* 1993. Vol. 13, no. 10. P. 55–64. DOI: [10.1016/0273-1177\(93\)90050-L](https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90050-L).

Meneses F.C., Muralikrishna P., Clemesha B.R. Height profiles of OI 630 nm and OI 557.7 nm airglow intensities measured via rocket-borne photometers and estimated using electron density data: comparison. *Geofisica Internacional*. 2008. Vol. 47, no. 3. P. 161–166.

Rycroft M.J. Ionospheric hole caused by rocket engine. *Nature*. 1982. Vol. 297. P. 537. DOI: [10.1038/297537a0](https://doi.org/10.1038/297537a0).

Semeter J., Mendillo M., Baumgardner J., et al. A study of oxygen 6300 airglow production through chemical modification of the nighttime ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, no. A9. P. 19683–19699. DOI: [10.1029/96JA01485](https://doi.org/10.1029/96JA01485).

URL: <https://www.roscosmos.ru/450> (дата обращения 27 июня 2022 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 27 июня 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Михалев А.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П., Хахинов В.В. Оптические эффекты работы двигателей космических аппаратов на высотах нижней термосферы. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 4. С. 77–82. DOI: [10.12737/szf-84202207](https://doi.org/10.12737/szf-84202207).