

УДК 533.951

## ЭФФЕКТЫ КРАТКОВРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА [OI] 630.0 нм НА ВЫСОТАХ НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ТЕХНОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ

© 2020 г. А. В. Михалёв<sup>1</sup>, \*, Р. В. Васильев<sup>1</sup>, \*\*, А. Б. Белецкий<sup>1</sup>, \*\*\*

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), г. Иркутск, Россия

\*e-mail: mikhalev@iszf.irk.ru

\*\*e-mail: roman\_vasilyev@iszf.irk.ru

\*\*\*e-mail: beletsky@mail.iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 21.01.2019 г.

После доработки 16.05.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Проведено исследование результатов оптических наблюдений, полученных в ходе экспериментов Радар-Прогресс по изучению эффектов (появление обширных слабо светящихся областей и снижение концентрации плазмы), возникающих при выбросе продуктов сгорания топлива из двигателей космических аппаратов в верхнюю атмосферу Земли. Анализ результатов контролируемых экспериментов по инжекции “плазмогасящих” составов в ионосферу на орбитальных высотах позволяет допустить наблюдаемое усиление интенсивности [OI] 630.0 нм в экспериментах Радар-Прогресс как следствие химической модификации ионосферы. Рассмотрен вклад различных компонентов инжектируемого вещества ( $H_2$ , OH,  $H_2O$ , CO и  $CO_2$ ) в усиление интенсивности свечения атомарного кислорода [OI] на длине волны 630.0 нм и в изменение концентрации заряженной компоненты верхней атмосферы. Показано, что изменение интенсивности свечения и концентрации заряженной компоненты обусловлены разными химическими реакциями. Наибольший вклад в увеличение интенсивности свечения вносит инжекция в атмосферу водорода и углекислого газа, а уменьшение концентрации частиц плазмы преимущественно обусловлено инжекцией паров воды. Установлено, что характерные пространственно-временные масштабы возникающих в верхней атмосфере светящихся областей таковы, что их можно регистрировать при помощи современной спектрофотометрической аппаратуры с поверхности Земли без использования дополнительных сведений о моменте включения двигателей космических аппаратов.

DOI: 10.31857/S0016794020010101

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Оптическое свечение атомарного кислорода в атмосфере Земли в красной области видимого спектра (на длине волны 630.0 нм, запрещенный переход  $^1D-^3P$ , далее “[OI] 630.0 нм”) в естественных условиях происходит на высотах 200–300 км, относящихся к нижней термосфере и  $F$ -области ионосферы. В силу высокой корреляции поведения интенсивности [OI] 630.0 нм и концентрации электронов (далее –  $N_e$ ), это излучение часто рассматривается как чувствительный индикатор изменений в верхней атмосфере под воздействием гелиогеофизических возмущений или других масштабных геофизических явлений различной природы – сейсмические события, волновые процессы в атмосфере и пр. В качестве некоторых примеров можно привести исследования пульсаций в полярных сияниях [Eather, 1969], оптических

вспышек [Михалёв и Белецкий, 2000], среднеширотных сияний [Михалёв и др., 2004], перемещающихся ионосферных возмущений в  $F$ -области ионосферы [Adachi et al., 2011]. Было установлено, что кроме естественных процессов на интенсивность [OI] 630.0 нм существенное влияние могут оказывать также и техногенные процессы, происходящие в ионосфере и термосфере. В частности, активные эксперименты по нагреву ионосферы [Шиндин и др., 2017], инжекции “плазмогасящих” смесей при помощи геофизических ракет [Адушкин и др., 2000], запуски космических аппаратов (КА) и работа их двигателей при маневрировании на орбите [Mendillo et al., 1975; Карлов и др., 1980]. Большинство оптических эффектов, связанных с запусками и полетами КА, наиболее ярко наблюдается в тропосфере, стратосфере и мезосфере, при больших (десятки–сотни

килограмм и более) количествах инжектируемых в атмосферу продуктов сгорания топлива, возникающих в результате работы жидкостных реактивных двигателей (далее – “продукты сгорания”). При этом наблюдаемая яркость оптического свечения, связанного с этими событиями, относительно высока [Платов и др., 2003]. В работах [Белецкий и др., 2016; Михалёв и др., 2016] оптические эффекты при работе двигателей КА наблюдались на высотах термосферы, при относительно небольших количествах инжектированных в атмосферу продуктов сгорания (8–9 кг). Интерпретация наблюдаемых оптических эффектов в этих исследованиях была затруднена, поскольку существовала как возможность модификации ионосферы [Mendillo et al., 1975], сопровождающейся снижением  $N_e$  и одновременным усилением интенсивности [OI] 630.0 нм, так и возможность рассеяния солнечного света на дисперсном компоненте продуктов сгорания.

В настоящей работе рассмотрена возможность усиления интенсивности [OI] 630.0 нм в результате химического воздействия продуктов сгорания на компоненты верхней атмосферы в экспериментах Радар-Прогресс. Считается, что основные реакции, приводящие к снижению  $N_e$  (реакции диссоциативной рекомбинации) и усилению интенсивности [OI] 630.0 нм при модификации ионосферы, связаны в основном с инжекцией  $H_2O$ ,  $H_2$  и  $CO_2$ , которые в реакциях перезарядки преобразуются в ионы  $H_2O^+$ ,  $H_2^+$ ,  $CO_2^+$ . Эти ионы быстро рекомбинируют со свободными электронами в ионосфере, причем скорости диссоциативной рекомбинации в реакциях с участием этих ионов (“реакции замещения”) на порядки (до 1000 раз) выше скоростей диссоциативной рекомбинации в реакциях на ионах  $O_2^+$  и  $NO^+$  в естественных условиях.

Интенсивное освоение околоземного космического пространства, сопровождающееся увеличением количества космических аппаратов и их маневрированием, ставит задачи определения вариаций характеристик [OI] 630.0 нм, обусловленных техногенной деятельностью, с целью отделения их от естественных вариаций этого излучения. Основные признаки таких искусственных вариаций – это локализация увеличения интенсивности [OI] 630.0 нм над фоном во времени и пространстве. В работе исследована зависимость между увеличением интенсивности [OI] 630.0 нм, изменениями электронной концентрации и количеством выброшенных продуктов сгорания ( $H_2$ ,  $OH$ ,  $H_2O$ ,  $CO$  и  $CO_2$ ) во время полетов КА на рабочих орбитах в верхней атмосфере Земли. Проведен дополнительный анализ результатов оптических наблюдений, полученных в экспериментах Радар-Прогресс [Белецкий и др., 2016;

Михалёв и др., 2016]. Кроме того, в работе сделаны оценки характерных пространственно-временных масштабов и минимальной пороговой величины интенсивности [OI] 630.0 нм, доступных для наблюдения наземными средствами, под воздействием продуктов сгорания. В работе используются результаты некоторых активных экспериментов по наблюдению контролируемых выбросов химических реагентов на высотах, соответствующих рабочим орбитам КА [Mendillo, 1980; Biondi and Sipler, 1984; Semeter et al., 1996; Белецкий и др., 2016; Михалёв и др., 2016].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭМИССИИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА 630.0 нм И СНИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Результаты ряда экспериментов, проводившихся для исследования вариаций свечения верхней атмосферы и концентрации ионосферной плазмы под воздействием типичных продуктов сгорания топлива космических аппаратов, приведены в табл. 1. Исследователи следили за поведением количества инжектируемого вещества, интенсивностью [OI] 630 нм и концентрацией электронов. К сожалению, в некоторых публикациях по запускам и полетам КА и активным экспериментам одновременно не приводятся характеристики регистрируемых оптических эффектов, количество и состав инжектируемого вещества, величины вариаций  $N_e$ . Более полную информацию по эффектам модификации ионосферы под действием продуктов работы двигателей КА можно найти в работах [Mendillo, 1988; Bernhardt et al., 2012].

В экспериментах RED AIR 1 и RED AIR 2 [Semeter et al., 1996] осуществлялась инжекция равных количеств  $CO_2$  выше и ниже высоты максимума ночного F2-слоя на высотах с одинаковым значением  $N_e$  (во время захода солнца, в безлунных условиях). В этом случае,  $CO_2$  будет взаимодействовать с плазмой, имеющей одинаковую электронную концентрацию, но различные нейтральный состав и плотность. В результате инжекции  $CO_2$  в этих экспериментах регистрировались светящиеся облака [OI] 630 нм, уровни яркости которых регулируются процессами гашения, а размеры облаков определяются диффузией инжектируемого вещества. В эксперименте RED AIR 1, проведенном 3 апреля 1989 г., для инжекции  $CO_2$  использовалась одна ракета, а инжекция вещества осуществлялась на разных точках траектории полета этой ракеты. В эксперименте RED AIR 2 (5 декабря 1991 г.) использовались две ракеты с независимой инжекцией  $CO_2$ , что позволило исключить перекрестное наложение областей

**Таблица 1.** Сведения о экспериментах по исследованию динамики химических реакций продуктов сгорания топлива космических аппаратов

Эксперимент	Масса (кг)	Высота (км)	Состав	$\Delta [OI]$ (Рл)	$\Delta N_e$ (%)	$T$ (мин)	Источник
RED AIR 1	9.1	253	CO <sub>2</sub>	30	≤6	7–10	Semeter et al., 1996
	9.1	379		100	≤6		
RED AIR 2	18.4	248	CO <sub>2</sub>	525	30	~10	Semeter et al., 1996
	18.4	346		340	50		
Проект BIME	42	323	(H <sub>2</sub> O и CO <sub>2</sub> )	400	–	~5	Biondi and Sipler, 1984
КА “Атлас-Кентавр”	20000	>200	(H <sub>2</sub> O и H <sub>2</sub> )	8300	80	~10–20	Mendillo, Report ..., 1980
КА “Титан IV В-30”	283	0–91	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /N <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> и N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3300	50	~12	Mendillo et al., 2008
	140	73–273					
	32	273–494					
Радар-Прогресс КА “Прогресс М-17М”	9	412	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CO	50	–	~2–3	Михалёв и др., 2016;
Радар-Прогресс КА “Прогресс М-23М”	8	352	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CO	50	–	~2–3	Белецкий и др., 2016

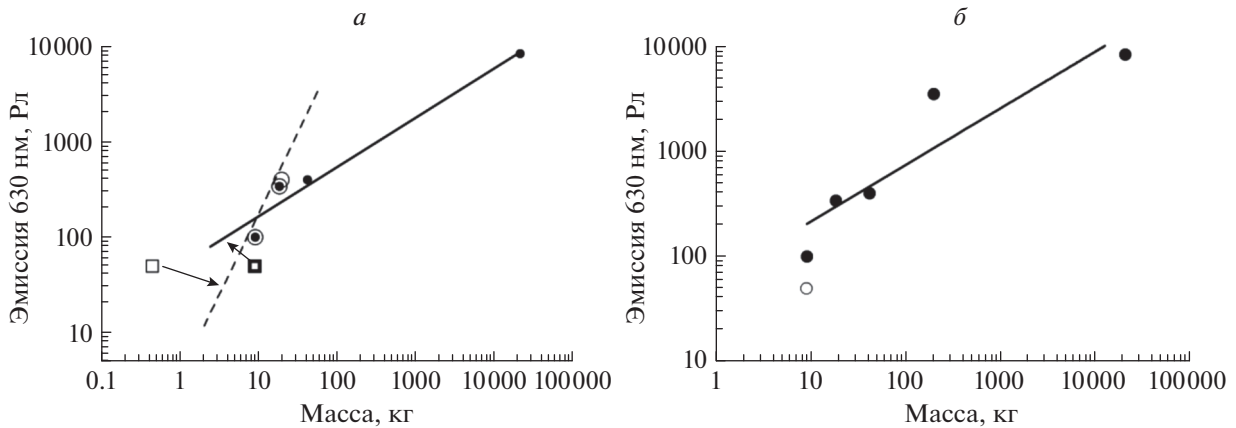
возмущений и увеличить вдвое массу инжектируемого вещества. Несмотря на четко выраженные оптические эффекты при инъекции CO<sub>2</sub>, сопутствующие уменьшения  $N_e$  были меньше вариаций, обнаруживаемых радаром некогерентного рассеяния, задействованным в эксперименте RED AIR 1 (менее шести процентов). Это послужило основанием для утверждения авторами работы [Semeter et al., 1996], что хотя CO<sub>2</sub> и не является оптимальным выбором для создания ионосферных дыр, фотохимические скорости возбуждения [OI] 630 нм в реакциях диссоциативной рекомбинации ионов углекислого газа делают этот процесс высокоэффективным источником свечения. В то же время, судя по представленной в работе иллюстрации, в эксперименте RED AIR 2 отмечается уменьшение  $N_e$  на локальных высотах инъекции от ~30% (248 км) до ~50% (346 км) и отсутствие значительных изменений  $N_e$  в максимуме F2-слоя.

В проекте BIME [Biondi and Sipler, 1984] на высоте 323 км было инжектировано  $7.4 \times 10^{26}$  молекул H<sub>2</sub>O и  $2.7 \times 10^{26}$  молекул CO<sub>2</sub> (19.7 кг). Примерно через 2 мин после инъекции вещества образовалось светящееся облако [OI] 630 нм с интенсивностью в центральной части ~400 Рл и диаметром ~250 км. Данных о поведении  $N_e$  в этом эксперименте не приводится.

При запуске космического аппарата “Атлас-Кентавр” на высоте более 200 км было выпущено  $\sim 7 \times 10^{29}$  молекул H<sub>2</sub>O и H<sub>2</sub>. Уменьшение  $N_e$  вблизи траектории достигло ~80%. Размеры области возмущения составили 2000–3000 км вдоль следа и 600–1000 км – поперек. Интенсивность [OI] 630 нм в максимуме области возмущения соста-

вила 8300 Рл. Максимум интенсивности наблюдался через несколько минут, и через 10–20 мин интенсивность упала до фонового значения [Mendillo, 1980].

На рисунке 1 представлены зависимости интенсивности [OI] 630 нм (здесь и далее идет речь о величине вариаций интенсивности над фоном) от количества инжектированного вещества для различных экспериментов. Результаты экспериментов показывают, что для исследуемого явления существует тенденция роста интенсивности по мере увеличения количества инжектируемого вещества. Видно, что увеличение интенсивности с учетом только CO<sub>2</sub> происходит гораздо быстрее. Данные результатов экспериментов Радар-Прогресс, изображенные на рис. 1 для сравнения с другими экспериментами, позволяют сделать некоторые предварительные выводы. Сопоставление учета инъекции только молекул CO<sub>2</sub> в эксперименте с результатами экспериментов RED AIR 1–2 и BIME не позволяет обеспечить наблюдаемое увеличение интенсивности [OI] 630 нм в эксперименте Радар-Прогресс (рис. 1а). Однако сопоставление полных инжектируемых масс (без учета их состава) во всех рассматриваемых выше экспериментах, допускает интерпретацию наблюдаемого увеличения интенсивности как модификацию ионосферы в этом эксперименте. Иными словами, выброс продуктов сгорания, приведет к увеличению количества положительно заряженных молекулярных ионов, которые в процессе диссоциативной рекомбинации будут снижать концентрацию электронов и увеличивать концентрацию возбужденных атомов кислорода. На основании результатов экспериментов по инъекции “плазмогасящих” смесей можно



**Рис. 1.** (а) – Сопоставление полной инжектируемой массы и  $\text{CO}_2$  с увеличением эмиссии 630 нм. Черные окружности и сплошная линия (интерполяция) – полная масса (4 эксперимента RED AIR 1, RED AIR 2, проект ВІМЕ и запуск КА “Атлас-Кентавр”). Светлые окружности и штриховая линия (интерполяция) – масса  $\text{CO}_2$  в экспериментах RED AIR 1, RED AIR 2, проект ВІМЕ. Темный квадрат – полная масса, светлый квадрат – только масса  $\text{CO}_2$  в экспериментах Радар-Прогресс. (б) – Сопоставление полной инжектируемой массы с увеличением эмиссии 630 нм. Темные окружности и сплошная линия (интерполяция) – полная масса (4 эксперимента RED AIR 1, RED AIR 2, проект ВІМЕ и КА “Атлас-Кентавр” и “Титан IV В-30”). Светлая окружность – эксперименты Радар-Прогресс.

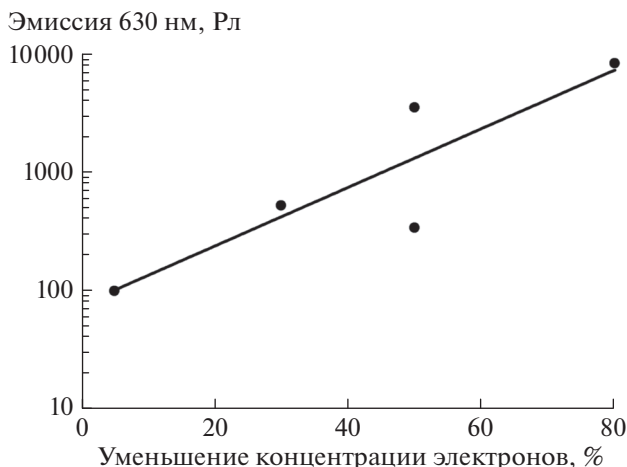
оценить ожидаемое снижение концентрации электронов в экспериментах Радар-Прогресс в зависимости от величины усиления интенсивности [OI] 630 нм. Выражение, связывающее вариацию интенсивности с вариацией электронной концентрации на основе экспериментальных данных, приведенных в табл. 1,

$$\ln(\Delta I_{630}) = 0.057\Delta N_e + 4.33, \quad (1)$$

график регрессии, приведен на рис. 2.

При значениях  $\Delta I_{630} = 80$  Рл (зарегистрировано 40–60 Рл) полученное выражение дает для  $\Delta N_e$  значение  $\leq 1\%$ . Таким образом, если природа увеличения интенсивности [OI] 630 нм, наблюдае-

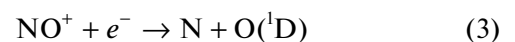
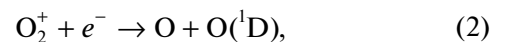
мая в экспериментах Радар-Прогресс совпадает с природой этого явления в других подобных экспериментах, то регистрация вариаций концентрации электронов под воздействием работы маневровых двигателей космических аппаратов должна быть затруднительна, а наиболее подходящим для дистанционного мониторинга этого процесса будет наблюдение вариаций [OI] 630 нм. Однако результаты, изложенные в работе [Шпынёв и др., 2017] показывают, что снижение  $N_e$  в этих экспериментах достигает 20–30% от фонового значения. Это указывает на то, что снижение электронной концентрации и увеличение интенсивности свечения, по всей видимости, происходят вследствие различных химических реакций.



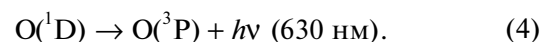
**Рис. 2.** Зависимость между наблюдаемым усилением эмиссии 630 нм и снижением электронной концентрации (в %) в экспериментах, приведенных в табл. 1.

### 3. ОЦЕНКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭМИССИИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА 630.0 НМ ПО РЕАКЦИЯМ С УЧАСТИЕМ МОЛЕКУЛ $\text{H}_2$ , $\text{OH}$ , $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}$ , $\text{CO}_2$

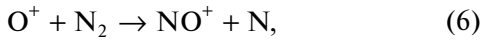
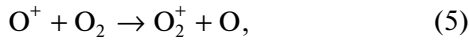
В естественных условиях заселение спектрального уровня атомарного кислорода  $\text{O}(^1\text{D})$  в основном осуществляется в результате реакций диссоциативной рекомбинации ионов молекулярного кислорода  $\text{O}_2^+$  и окиси азота  $\text{NO}^+$ :



с последующим спонтанным излучением кванта света с длиной волны 630 нм:



Ионы  $O_2^+$  и  $NO^+$  образуются в реакциях перезарядки:



константы скорости этих реакций:

$$K_2 = 1.95 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.7},$$

$$K_3 = 4.2 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.85},$$

$$K_5 = 3.2 \times 10^{-12} \exp[3.7(300/T_i) - 1.9(300/T_i)^2],$$

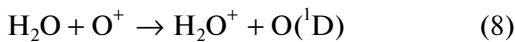
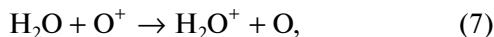
$$K_6 = 2.8 \times 10^{-13} \exp[3.1(300/T_i) - 0.6(300/T_i)^2]$$

соответственно [Mendillo et al., 1993], где  $T_e$  – температура электронов, а  $T_i$  – температура ионов. Ночью на средних широтах в невозмущенных условиях интенсивность [OI] 630 нм имеет значения 30–100 Рл.

При химических выбросах в верхней атмосфере к естественному фоновому излучению [OI] 630 нм добавляется излучение на этой длине волны, обусловленное другими химическими реакциями. В литературе приводятся несколько реакций, приводящих к дополнительному заселению уровня атомарного кислорода  $O(^1D)$  и усилению интенсивности [OI] 630.0 нм при инжекции молекул  $H_2$ ,  $OH$ ,  $H_2O$ ,  $CO$  и  $CO_2$ , входящих в состав продуктов сгорания ракетного топлива или образующихся в атмосфере в процессе его догорания.

### 3.1. Реакции с участием молекул воды и гидроксила ( $H_2O$ и $OH$ )

Согласно существующим в настоящее время представлениям, молекулы воды на высотах, соответствующих рабочим орбитам космических аппаратов, могут участвовать в реакциях перезарядки, в частности, с положительным ионом кислорода [Dressler et al., 1991; Mendillo et al., 1993]:

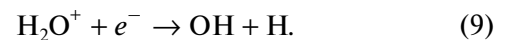


с последующим излучением фотона 630.0 нм в соответствии с (4).

Константа скорости реакции (7):  $K_7 = 3.2 \times 10^{-9}$  [Mendillo et al., 1993]. Анализ кинетической энергии ионов реакции (8) предполагает, что она может быть небольшим дополнительным источником [OI] 630 нм. Увеличение интенсивности будет результатом прямого возбуждения  $O(^1D)$  в реакции перезарядки. Но эта реакция имеет порог энергии столкновения 0.97 эВ [Dressler et al., 1991]. Вероятность этой ветви существенно ниже (7), а коэффициент ветвления реакций (7) и (8) точно не известен. Оценки, приведенные в работе [Zinn

et al., 1980], дают для реакции (8) величину 5% от реакции (7). В этом случае заселение возбужденного уровня  $^1D$  (и как следствие увеличение интенсивности [OI] 630 нм) может зависеть от относительной скорости движения молекул воды и ионов кислорода. Для молекулы  $H_2O$ , набегающей на условно неподвижный ион  $O^+$ , порог энергии столкновения 0.97 эВ соответствует скорости ~3.2 км/с. Скорость расширения области свечения в первые секунды после инжекции в эксперименте вдоль орбиты КА “Прогресс М-17М” и “Прогресс М-23М”, составила 6–7 км/с, а поперек 3–3.5 км/с. Однако свечение по длительности продолжалось несколько минут, и оценка средних скоростей расширения светящихся областей до максимальных размеров (~250 км) дает величины ~1 км/с (для эксперимента с КА “Прогресс М-23М”) и ~1.4 км/с (КА “Прогресс М-17М”). На основе этого можно сказать, что значительного вклада реакции (8) в интенсивность [OI] 630 нм в экспериментах Радар-Прогресс нет, или он не существен, и реализуется только в первые секунды после включения двигателей космического аппарата. Интересно, что в эксперименте ВИМЕ, описанном в работе [Biondi and Sipler, 1984], после выброса на высоте 323 км в ионосферу  $2.7 \times 10^{26}$  молекул  $CO_2$  и  $7.4 \times 10^{26}$  молекул  $H_2O$  образовалась светящаяся область [OI] 630 нм. Через две минуты после выброса увеличение интенсивности свечения достигло 400 Рл, а через три минуты область с повышенной интенсивностью свечения достигла 250 км в диаметре. В этом случае средняя скорость расширения области свечения (~1.4 км/с) и характерный размер области свечения имеют значения, близкие к полученным в экспериментах Радар-Прогресс. В связи с этим, дополнительным аргументом в пользу незначительного вклада реакции (8) в интегральную интенсивность [OI] 630 нм в рассматриваемых экспериментах, может служить сопоставление экспериментов RED AIR 2 и ВИМЕ (см. табл. 1). В этих экспериментах при инжекции сопоставимых масс  $CO_2$  (18.4 и 19.8 кг) отклик в [OI] 630 нм также был сопоставим, несмотря на то, что в эксперименте ВИМЕ дополнительно осуществлялась инжекция  $H_2O$  (22.2 кг).

Ион  $H_2O^+$  в дальнейшем участвует в реакции рекомбинации



Константа скорости реакции (9):  $K_9 = 6.5 \times 10^{-7} \times (300/T_e)^{0.5}$  [Mendillo et al., 1993]. По всей видимости, именно эта реакция вызывает значительное снижение  $N_e$  в области ее протекания (см. табл. 1, эксперимент Атлас-Кентавр). Следует отметить, что снижение концентрации электронной плотности в экспериментах Радар-Прогресс

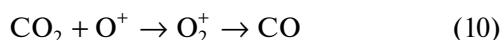
доходят до 20–30% от фонового уровня [Шпынёв и др., 2017], а время жизни возмущенной области составляет десятки минут, в то время как время жизни светящихся образований – не более десяти минут [Белецкий и др., 2016; Михалёв и др., 2016]. Такое различие между временем жизни возмущения в концентрации плазмы и возмущения в фоновом свечении [OI] 630 нм также указывает на то, что к снижению электронной концентрации и увеличению интенсивности свечения [OI] 630 нм в экспериментах Радар-Прогресс приводят различные химические реакции.

Излучение вращательных уровней возбужденной молекулы гидроксила в полосе (9-3), рождающейся в результате этой реакции, в принципе, может давать вклад в наблюдаемое увеличение оптического излучения. Линия P<sub>2</sub>(3) этой полосы лежит вблизи линии 630.0 нм (629.8 нм), и использование интерференционных светофильтров с полосой ~2 нм в проводимых исследованиях допускает возможность смешивания излучения от двух источников и “маскировки” излучения гидроксила под излучение кислорода. Однако-максимальная интенсивность свечения гидроксила реализуется в полосах, расположенных в ближнем ИК-диапазоне, поэтому основной вклад реакции (9) в [OI] 630 нм будет мал, а основного отклика на работу двигателей космического аппарата в этом случае следует ожидать в инфракрасном свечении атмосферы.

Учитывая вышеизложенное можно сказать, что вклады реакций (8) и (9) в интегральную интенсивность [OI] 630 нм, по всей видимости, незначительны, но реакция (9) является основным источником снижения концентрации электронов. Косвенные сведения, указывающие на возможность реализации эндотермического протекания реакции перезарядки молекул воды на положительно заряженных ионах атомарного кислорода, и гипотетическая возможность просачивания свечения гидроксила через полосовой светофильтр регистрирующего устройства, оставляют вопрос количественного вклада реакций (8) и (9) в интегральную интенсивность [OI] 630 нм открытым, и требуют проведения дополнительных исследований.

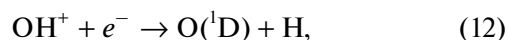
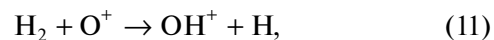
### 3.2. Реакции с участием молекул водорода и двуокиси углерода (H<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>)

Молекулярный водород и углекислый газ, инжектированные в верхнюю атмосферу двигателем космического аппарата, будут давать вклад в усиление [OI] 630 нм посредством процесса (4). Необходимый для этого атомарный кислород в возбужденном состоянии будет рождаться в последовательностях реакций с углекислым газом:



(константа скорости  $K_{10} = 9.4 \times 10^{-10}$ ), и далее ион молекулярного кислорода будет участвовать в диссоциативной рекомбинации (2).

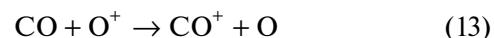
Молекулярный водород будет участвовать в ионообменном процессе с образованием положительно заряженного иона гидроксила, распадающегося посредством диссоциативной рекомбинации на атомарный водород и кислород:



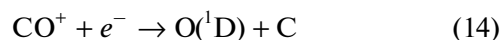
константы скорости этих реакций:  $K_{11} = 1.7 \times 10^{-9}$  и  $K_{12} = 7.5 \times 10^{-8}(300/T_e)^{0.5}$  соответственно [Mendillo et al., 1993].

### 3.3. Реакции с участием молекул монооксида углерода и гидроксила (CO и OH)

Ионообменного взаимодействия между ионом атомарного кислорода и монооксидом углерода:

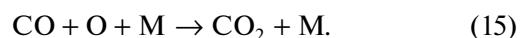


по указанным в литературе сведениям не происходит. В работе [Anicich, 1993] дана оценка максимальной величины константы скорости для этой реакции  $K_{13} < 10^{-13}$ . Процесс диссоциативной рекомбинации иона угарного газа является экзотермическим:



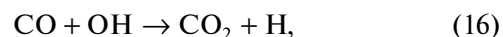
[Rosen et al., 1998], константа скорости  $K_{14} = 2.75 \times 10^{-7}(300/T_e)^{0.55}$ , вероятность этой ветви составляет ~10%. Последовательность реакций (13) → (14), в случае ее реализации, приведет к увеличению интенсивности [OI] 630 нм.

Основным механизмом потерь CO для высот выше 100 км считается реакция рекомбинации через тройное соударение [Lee et al., 2018]:



При этом среднее время жизни монооксида углерода на этих высотах составляет десятки дней, что указывает на несоизмеримо медленную скорость протекания (15) по сравнению со скоростью протекания других реакций.

Более быстрым механизмом химической потери CO в присутствии рождаемого в (9) и содержащегося в продуктах сгорания двигателей КА гидроксила будет [Ryan et al., 2018]:

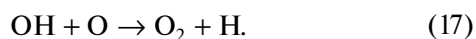


константа скорости реакции  $K_{16} = 1.5 \times 10^{-13}$  [Nair et al., 1994]. Молекулярный состав вещества, используемого в эксперименте Радар-Прогресс – КА “Прогресс М-17М” [Михалёв и др., 2016] позволяет оценить массу и количество молекул для OH, инжектируемого в атмосферу. Эти величины со-

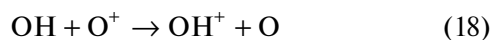
**Таблица 2.** Состав инжектируемого вещества в экспериментах Радар-Прогресс

Вещество	Процентное содержание (%)	Вес (кг)	АЕМ	Количество молекул (шт)	Концентрация в области свечения ( $\text{м}^{-3}$ )
$\text{H}_2\text{O}$	$2.93 \times 10^{-1}$	2.6388	18	$8.83 \times 10^{25}$	$2.52 \times 10^4$
$\text{N}_2$	$2.68 \times 10^{-1}$	2.4084	28	$5.18 \times 10^{25}$	$1.48 \times 10^4$
$\text{CO}$	$1.93 \times 10^{-1}$	1.7388	28	$3.74 \times 10^{25}$	$1.07 \times 10^4$
$\text{H}_2$	$1.88 \times 10^{-1}$	1.6893	2	$5.09 \times 10^{26}$	$1.45 \times 10^5$
$\text{CO}_2$	$4.95 \times 10^{-2}$	0.44514	44	$6.09 \times 10^{24}$	$1.74 \times 10^3$
$\text{H}$	$8.52 \times 10^{-3}$	0.076716	1	$4.62 \times 10^{25}$	$1.32 \times 10^4$
$\text{NO}$	$3.39 \times 10^{-4}$	0.0030528	30	$6.13 \times 10^{22}$	$1.75 \times 10^1$
$\text{OH}$	$2.85 \times 10^{-5}$	0.00025677	17	$9.10 \times 10^{21}$	$2.60 \times 10^0$
$\text{O}_2$	$2.74 \times 10^{-5}$	0.00024696	32	$4.65 \times 10^{21}$	$1.33 \times 10^0$
$\text{O}$	$1.39 \times 10^{-5}$	0.00012519	16	$4.71 \times 10^{21}$	$1.35 \times 10^0$
$\text{N}$	$5.38 \times 10^{-8}$	0.00000048	14	$2.08 \times 10^{19}$	$5.95 \times 10^{-3}$

ставляют соответственно  $2.6 \times 10^{-4}$  кг или  $9.1 \times 10^{21}$  молекул соответственно. Кроме этого гидроксил образуется в реакции (9) из 2.6 кг или  $8.8 \times 10^{25}$  молекул воды. Вклад этих источников и оценка объема  $V$  наблюдаемой светящейся области как цилиндра диаметром 300 км и высотой 50 км ( $V = 3.5 \times 10^{21}$  см<sup>3</sup>), дают оценку концентрации гидроксила в этом объеме  $\sim 2.5 \times 10^4$  см<sup>-3</sup> при сопоставимой концентрации  $\text{CO} - 1.07 \times 10^4$  (табл. 2). Поэтому некоторое количество углекислого газа, рождающегося в результате последовательности (7)  $\rightarrow$  (9)  $\rightarrow$  (16), в принципе должно давать вклад в увеличение интегральной интенсивности [OI] 630 нм посредством (10)  $\rightarrow$  (2). Сопоставление абсолютных значений концентрации атомарного кислорода ( $10^9$ – $10^{10}$ ), гидроксила и углекислого газа говорит о том, что этот процесс будет очень слаб вследствие убывания гидроксила посредством реакции



Выше уже упоминалось о косвенном указании отсутствия увеличения интенсивности [OI] 630 нм под воздействием только инжектированной воды. Поскольку именно вода была основным источником OH в соответствии с (7)  $\rightarrow$  (9) при включении двигателей в экспериментах Радар-Прогресс, то для гидроксила процессы, схожие с уже описанной последовательностью перезарядки на ионе атомарного кислорода и дальнейшей диссоциативной рекомбинацией продукта:



и далее (12) или



и далее (2), гипотетически вносящие вклад в увеличение интенсивности – значительно подавлены.

#### 4. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ КРАТКОВРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА 630.0 нм

Опубликованные в работах [Mendillo, 1980; Biondi and Sipler, 1984; Semeter et al., 1996; Mendillo et al., 2008; Михалёв и др., 2016; Белецкий и др., 2016] данные о динамике [OI] 630 нм показывают достаточно быстрый (1–2 мин) рост интенсивности после инъекции вещества и относительно медленное (5–20 мин) ее снижение. В табл. 1 приводится характерное время снижения интенсивности [OI] 630 нм до половины ее максимальной величины ( $T_{1/2}$ ) после инъекции вещества и достижения максимума свечения. Считается, что размеры области повышенного свечения определяются диффузией инжектируемого вещества [Semeter et al., 1996]. Минимальные размеры области повышенного свечения [OI] 630 нм в анализируемых работах составили 250–270 км, что соответствует достаточно большим видимым угловым размерам в 35–40 град. (для высот высвечивания 300–400 км). Оцененная в работах [Михалёв и др., 2016; Белецкий и др., 2016] вариация интенсивности [OI] 630 нм в 40–60 Рл (с поперечным размером 250–350 км, при инъекции 9 кг вещества двигателя КА) является сопоставимой с естественным уровнем этого свечения в ночной период на средних широтах в спокойных геомагнитных условиях. Регистрация вариаций [OI] 630 нм в пределах 10–20% от ее естественного уровня в хороших метеоусловиях является нормой, а современные специализированные опти-

**Таблица 3.** Сравнение вклада различных процессов в вариацию интенсивности свечения атомарного кислорода на длине волны 630.0 нм и концентрации плазмы

Параметр	O <sub>2</sub> -(естественные условия)	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	ОН
[OI] 630.0 нм	$K_4K_2 \sim 6 \times 10^{-19}$ $k = 1$	$K_8 - ?$ $k - ?$ (незначительно)	$K_{10}K_2 \sim$ $\sim 1.8 \times 10^{-16}$ $k \sim 300$	$K_8K_9 \sim$ $\sim 1.3 \times 10^{-16}$ $k \sim 220$	$K_{13}K_{14} \sim 10^{-20}$ $k \sim 0.1$ $K_{16}K_{10}K_2 \sim 10^{-29}$ $k \sim 10^{-10}$	$K_{18} - ?$ $k - ?$ (незначительно) $K_{19} - ?$ $k - ?$ (незначительно)
$N_e$	$K_4K_2 \sim 6 \times 10^{-19}$ $k = 1$	$K_7K_9 \sim 2.1 \times 10^{-15}$ $k \sim 3500$	$K_{10}K_2 \sim$ $\sim 1.8 \times 10^{-16}$ $k \sim 300$	$K_8K_9 \sim$ $\sim 1.3 \times 10^{-16}$ $k \sim 220$	$K_{13}K_{14} \sim 10^{-20}$ $k \sim 0.1$	$K_{18} - ?$ $k - ?$ (незначительно) $K_{19} - ?$ $k - ?$ (незначительно)

ческие системы способны регистрировать изменения свечения в линии 630 нм в единицы Рл. Следовательно, можно ожидать возможность регистрации работы двигателей космических аппаратов в свечении атмосферы и при меньших массах инжектируемого вещества, чем были рассмотрены в данной работе. При этом ожидаемые интенсивности свечения, размеры области свечения и характерные времена свечения [OI] 630 нм могут быть существенно меньше и составлять соответственно единицы Рэлей, десятки километров и десятки секунд.

В таблице 3 приведены условные значения эффективности рассмотренных выше процессов для возбуждения (дополнительного усиления) [OI] 630 нм, и снижения  $N_e$  по сравнению с естественными условиями. Условная эффективность определялась перемножением соответствующих констант скоростей реакций. Индексом  $k$  показана эффективность соответствующих реакций по сравнению с естественными условиями, для которых  $k$  принято за 1.

Естественно, что ожидаемые эффекты усиления [OI] 630 нм и снижения  $N_e$  зависят от количества и состава инжектируемого вещества, от высоты инжекции и других геофизических факторов. Следует также отметить, что для этих двух эффектов определяющие реакции могут быть различными. Так, например, из табл. 3 следует, что эффект снижения концентрации плазмы среди рассматриваемых молекул обусловлен реакциями с участием молекул воды H<sub>2</sub>O, в то время как для усиления [OI] 630 нм определяющими являются реакции с участием молекул CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>. При этом CO будет давать не очень значительный вклад в увеличение интенсивности через взаимодействие с инжектируемым и порождаемым водой ОН.

В таблице 2 приведена информация о химическом составе вещества, используемого в экспериментах Радар-Прогресс. При сопоставимых эф-

фективностях реакций усиления интенсивности [OI] 630.0 нм молекулами CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>, количество инжектируемых молекул H<sub>2</sub> существенно (по крайней мере, в несколько раз) превышает суммарное количество молекул H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, ОН. Это позволяет предположить, что определяющими в усилении [OI] 630 нм в экспериментах Радар-Прогресс являются реакции (11) и (12) с участием молекул H<sub>2</sub>. Остальные процессы хоть и будут давать вклад в увеличение интенсивности, но на фоне действия водорода он будет незначителен.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных исследований определена взаимосвязь между увеличением интенсивности [OI] 630 нм, снижением концентрации электронов и массой выбросов (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CO и CO<sub>2</sub>) при инжекции продуктов сгорания топлива во время включения двигателей космических аппаратов на высотах их рабочих орбит. Проведен дополнительный анализ оптических результатов в экспериментах Радар-Прогресс с малым количеством инжектируемого вещества [Белецкий и др., 2016; Михалёв и др., 2016]. Выполнены оценки минимальной пороговой величины интенсивности [OI] 630 нм, доступной для наблюдения наземными средствами, и ожидаемых характерных пространственно-временных масштабов свечения при инжекции продуктов работы двигателей космических аппаратов на высотах термосферы. В частности, были получены следующие предварительные результаты.

1. Проведенный анализ результатов экспериментов по инжекции "плазмогасящих" составов в ионосферу на высотах рабочих орбит космических аппаратов позволяет рассматривать наблюдаемое усиление интенсивности [OI] 630.0 нм в экспериментах Радар-Прогресс как результат химических реакций в верхней атмосфере, приво-



дящих к увеличению концентрации атомарного кислорода в состоянии  $O(^1D)$ .

2. Оценка сравнительной эффективности усиления интенсивности [OI] 630.0 нм по реакциям с участием молекул  $H_2$ ,  $H_2O$ , CO и  $CO_2$  показала, что в экспериментах Радар-Прогресс наблюдаемое усиление интенсивности [OI] 630.0 нм преимущественно было обусловлено реакциями с участием молекул  $H_2$  (11) и (12). Наиболее эффективное снижение электронной концентрации в этих экспериментах происходит в реакциях с участием молекул  $H_2O$  (7) и (9).

3. При работе корректирующих двигателей КА на околоземных орбитах или инъекции “плазмогасящих” смесей на высотах нижней термосферы с общей массой инжектируемого вещества  $\leq 10$  кг возможно усиление интенсивности [OI] 630.0 нм до 10–50 Рл над фоновым значением. Характерные размеры светящихся областей достигают десятков и сотен километров, а времена жизни этих образований — десятки и сотни секунд. Указанные параметры говорят о доступности этих событий для регистрации наземными средствами наблюдений.

Полученные результаты будет полезно учитывать при исследованиях быстрых оптических явлений в атмосфере Земли (см., например, [Михалёв и Белецкий, 2000; Yair et al., 2005; Yang et al., 2014]).

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты наблюдений получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 17-05-00492, и в рамках базового финансирования программы фундаментальных научных исследований ФНИ И.16.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Козлов С.И., Петров А.В. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду: Справочное пособие. М.: Анкил, 638 с. 2000.
- Белецкий А.Б., Михалёв А.В., Хахинов В.В., Лебедев В.П. Оптическое проявление работы бортовых двигателей низкоорбитальных космических аппаратов // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 4. С. 85–91. 2016. <https://doi.org/10.12737/21169>
- Карлов В.Д., Козлов С.И., Ткачев Г.Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем // Космич. исслед. Т. 18. № 2. С. 266–277. 1980.
- Михалёв А.В., Белецкий А.Б. Характеристики оптических вспышек в излучении ночной атмосферы по данным мультиспектральных фотометрических и телевизионных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. Т. 13. № 4. С. 338–341. 2000.
- Михалёв А.В., Белецкий А.Б., Костылева Н.В., Черниговская М.А. Среднеширотные сияния на юге Восточной Сибири во время больших геомагнитных бурь 29–31 октября и 20–21 ноября 2003 г. // Космич. исслед. Т. 42. № 6. С. 616–621. 2004.
- Михалёв А.В., Хахинов В.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П. Оптические эффекты работы бортового двигателя космического аппарата “Прогресс М-17М” на высотах термосферы // Космич. исслед. Т. 54. № 2. С. 113–118. 2016.
- Платов Ю.В., Куликова Г.Н., Черноус С.А. Классификация газопылевых образований в верхней атмосфере, связанных с выбросами продуктов сгорания ракетных двигателей // Космич. исслед. Т. 41. № 2. С. 168–173. 2003.
- Шиндин А.В., Клименко В.В., Когогин Д.А., Белецкий А.Б., Грач С.М., Насыров И.А., Сергеев Е.Н. Пространственные характеристики области генерации искусственного свечения ионосферы в линии 630 нм при воздействии радиоизлучением станда “Сура” // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 60. № 11. С. 949–966. 2017.
- Шпынёв 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. Т. 3. № 1. С. 88–96. 2017. <https://doi.org/10.12737/22812>
- Adachi T., Otsuka Y., Yamaoka M., Yamamoto M., Shiokawa K., Chen B., Hsu R. First satellite-imaging observation of medium-scale traveling ionospheric disturbances by FORMOSAT-2/ISUAL // Geophys. Res. Lett. V. 38. L04101. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010GL046268>
- Anicich V.G. Evaluated bimolecular ion-molecule gas phase kinetics of positive ions for use in modeling planetary atmospheres, cometary comae, and interstellar clouds // J. Phys. Chem. Ref. Data. V. 22. № 1469. 1993. <https://doi.org/10.1063/1.555940>
- Bernhardt P.A., Ballenthin J.O., Baumgardner J.L. et al. Ground and space-based measurement of rocket engine burns in the ionosphere // IEEE Trans. Pl. Sci. V. 40. № 5. P. 1267–1285. 2012.
- 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. V. 32. № 12. P. 1605–1610. 1984.
- 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. V. 96. № A8. P. 13795–13806. 1991.
- Eather R.M. Short-period auroral pulsations in 6300 Å OI // J. Geophys. Res. V. 74. № 21. P. 4998–5004. 1969.
- Lee J.N., Wu D.L., Ruzmaikin A., Fontenla J. Solar cycle variations in mesospheric carbon monoxide // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 170. P. 21–34. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.02.001>

- *Mendillo M.J., Hawkins G.S., Klobuchar J.A.* A sudden vanishing of the ionospheric *F* region due to the launch of Skaylab // *J. Geophys. Res.* V. 80. № 16. P. 2217–2218. 1975.
- *Mendillo M.J.* Report on investigations of atmospheric effects due to HEAO-C launch // *AIAA Pap.* № 888. P. 1–5. 1980.  
<https://doi.org/10.2514/6.1980-888>
- *Mendillo M.* Ionospheric holes: a review of theory and recent experiment // *Adv. Space Res.* V. 8. № 1. P. 51–62. 1988.
- *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.* V. 13. № 10. P. 55–64. 1993.
- *Mendillo M., Smith S., Coster A., Erickson P., Baumgardner J., Martinis C.* Man-made space weather // *Space Weather.* V. 6. № 9. S09001. 2008.  
<https://doi.org/10.1029/2008SW000406>
- *Nair H., Allen M., Anbar A.D., Yung Y.L., Clancy R.T.* A Photochemical model of the Martian atmosphere // *Icarus.* V. 111. № 1. P. 124–150. 1994.  
<https://doi.org/10.1006/icar.1994.1137>
- *Rosen S., Peverall R., Larsson M., Padellec A., Semaniak J., Larson A., Stromholm C., Zande W.J., Danared H., Dunn G.H.* Absolute cross sections and final-state distributions for dissociative recombination and excitation of  $\text{CO}^+(v=0)$  using an ion storage ring // *Phys. Rev. A.* V. 57. № 6. P. 4462–4471. 1998.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.57.4462>
- *Ryan N.J., Kinnison D.E., Garcia R.R., Hoffmann C.G., Palm M., Raffalski U., Notholt J.* Assessing the ability to derive rates of polar middle-atmospheric descent using trace gas measurements from remote sensors // *Atmos. Chem. Phys.* V. 18. P. 1457–1474. 2018.  
<https://doi.org/10.5194/acp-18-1457-2018>
- *Semeter J., Mendillo M., Baumgardner J., Holt J., Hunton D.E., Eccles V.A.* Study of oxygen 6300 airglow production through chemical modification of the nighttime ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 101. № A9. P. 19683–19699. 1996.
- *Yair Y., Price C., Ziv B. et al.* Space shuttle observation of an unusual transient atmospheric emission // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. L02801. 2005.  
<https://doi.org/10.1029/2004GL021551>
- *Yang J., Lu G., Du J., Pan W.* Ground-based observations of unusual atmospheric light emissions // *J. Meteor. Res.* V. 28. № 4. P. 624–633. 2014.  
<https://doi.org/10.1007/s13351-014-3086-7>
- *Zinn J., Sutherland C.D., Stone S.N., Duncan L.M., Behnke R.* Ionospheric effects of rocket exhaust products (HEAO-C, Skylab and SPS-HLLV) // *DOE/ NASA Satellite Power System Concept Development and Evaluation Program.* DOE/ER-0082. P. 1–32. 1980.