

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ЭМИССИИ 630.0 НМ В ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ

© 2022 г. Ж. В. Дашкевич¹, *, В. Е. Иванов¹¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

* zhanna@pgia.ru

Поступила в редакцию 18.04.2022 г.

После доработки 02.05.2022 г.

Принята к публикации 04.05.2022 г.

Рассмотрена роль всех известных потенциальных источников возбуждения 1D терма атомарного кислорода в полярных сияниях и величина их относительных вкладов в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм в интервале высот 100–300 км. Основное внимание уделено роли слабых источников возбуждения 1D терма, таких как: столкновительные взаимодействия между компонентами атмосферных газов $N(^2D) + O$, $N(^2D) + O_2$, $N(^2P) + O_2$, $N^+ + O_2$, прямой электронный удар $O_2 + e^*$ и радиационный переход $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu_{557.7}$. Показано, что несмотря на небольшие парциальные вклады этих источников в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм их суммарный вклад может быть достаточно весомым. Суммарная эффективность данных источников варьируется в диапазоне от 66 до 6% при увеличении высоты от 100 до 300 км и является значимой на высотах ниже 200 км. Показано, что влияние процесса дезактивации $O_2^+ + NO$ приводит к тому, что в области высот ~ 110 –150 км совокупность реакций столкновительных взаимодействий компонент ионосферной плазмы $N(^2D) + O$, $N(^2D) + O_2$, $N(^2P) + O_2$ и $N^+ + O_2$ становится вторым по эффективности источником, вносящим вклад в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм.

DOI: 10.31857/S0023420622050016

ВВЕДЕНИЕ

Исследование механизмов возбуждения красной эмиссии атомарного кислорода 630.0 нм, являющейся следствием перехода $O(^1D \rightarrow ^3P)$, представляет собой источник информации, полезной в задачах восстановления характеристик потока высыпающихся электронов и диагностики параметров возмущенной ионосферной плазмы в области полярных сияний по данным наземных и спутниковых авроральных наблюдений. Данному вопросу было посвящено большое количество работ [1–6], результаты которых проанализированы в обзорной работе [6]. Традиционно в качестве основных каналов возбуждения 1D терма атома кислорода в теоретических моделях рассматривались два “классических” механизма, а именно: прямой электронный удар $O + e^*$ и реакция диссоциативной рекомбинации с термальными электронами $O_2^+ + e_{th}$. Однако, анализ экспериментальных результатов координированных ракетно-спутниковых наблюдений [3, 7], показал, что механизмов прямого электронного удара и реакции диссоциативной рекомбинации явно недостаточно для объяснения наблюдаемой в экспе-

рименте [3] интенсивности излучения эмиссии 630.0 нм. Этот факт привел к поиску дополнительных источников возбуждения 1D терма в полярных сияниях. В [4] для объяснения интенсивности излучения эмиссии 630.0 нм был привлечен процесс столкновительного взаимодействия $N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O(^1D)$, ранее предложенный в [8]. Однако, для того, чтобы реакция $N(^2D) + O_2$ играла значительную роль и смогла улучшить согласие результатов модельных расчетов интенсивности излучения эмиссии 630.0 нм с экспериментальными данными [3], авторами [4] было сделано предположение о высоком квантовом выходе $O(^1D)$ до величины порядка 100%. В свою очередь, данное предположение не согласовывалось с результатами анализа ракетных и лабораторных экспериментов [9–11], из которых следовало, что квантовый выход $O(^1D)$ в реакции $N(^2D) + O_2$ не может превышать 10%. Детальный анализ “за” и “против” реакции $N(^2D) + O_2$ как третьего по значимости источника возбуждения эмиссии 630.0 нм, проведенный в [6], позволил прийти к заключению, что предположение о высоком квантовом выходе $O(^1D)$ в реакции $N(^2D) + O_2$, сделанное в работе [4], является сомнительным и

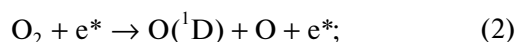
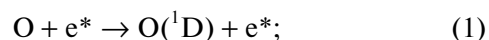
этот выход следует полагать равным 10%. В работе [6] сделано заключение о том, что основными источниками возбуждения эмиссии 630.0 нм по прежнему остаются процесс прямого электронного удара $O + e^*$ и реакция диссоциативной рекомбинации с термальными электронами $O_2^+ + e_{th}$, а реакцию $N(^2D) + O_2$ следует отнести к разряду незначительных источников. К разряду незначительных источников возбуждения 1D терма априори в [6] также были отнесены: прямой электронный удар $O_2 + e^*$, реакции столкновительных взаимодействий $N(^2D) + O$, $N(^2P) + O_2$, $N^+ + O_2$ и радиационный переход $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu_{557.7}$. Однако количественные оценки вкладов малых источников в возбуждение эмиссии 630.0 нм в работе [6] не приводились. Основанием к заключению о незначительности перечисленных выше источников в работе [6] послужили величины сечений возбуждения 1D и 1S термов прямым электронным ударом в процессах $O_2 + e^* \rightarrow O(^3P) + O(^1D) + e^*$ и $O + e^* \rightarrow O(^1S) + e^*$ и малые значения констант скоростей соответствующих столкновительных реакций. Не рассматривался в работе [6] и суммарный вклад малых источников в возбуждение эмиссии 630.0 нм, который может оказаться существенным в области высот 100–120 км, где концентрации молекулы кислорода достаточно высоки.

Целью данной работы является исследование эффективности вкладов малых источников возбуждения эмиссии 630.0 нм на разных высотах в диапазоне высот 100–300 км для потоков выпасающихся электронов со средними энергиями, лежащими в интервале 0.5–20 кэВ. Отдельное внимание в работе будет уделено роли окиси азота NO в процессах возбуждения 1D терма атомарного кислорода. Окись азота является основным гасителем иона молекулярного кислорода O_2^+ , от величины концентрации которого зависит эффективность вклада реакции диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{th}$ в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм. Более того, из-за большого времени жизни NO может накапливаться в ионосфере и концентрация этого элемента в конкретном полярном сиянии будет зависеть от продолжительности и интенсивности авроральной активности, предшествующей исследуемому событию. В связи с этим представляется актуальным исследование влияния концентрации NO на эффективность вклада реакции диссоциативной рекомбинации в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм.

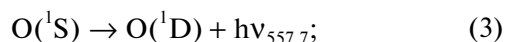
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭМИССИИ 630.0 НМ

Излучение эмиссии 630.0 нм в полярных сияниях является следствием радиационного перехода $O(^1D) \rightarrow ^3P$. При высыпании авроральных электронов возбуждение 1D терма атома кислорода происходит как за счет прямого электронного удара, так и в процессах столкновительных взаимодействий между компонентами атмосферных газов. В настоящее время известно восемь основных источников возбуждения 1D терма атомарного кислорода:

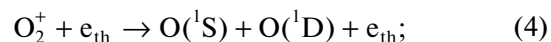
1) прямой удар авроральных электронов e^* с атомами и молекулами кислорода:



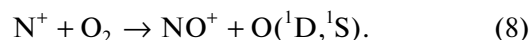
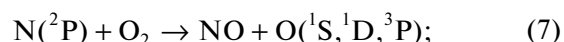
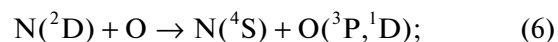
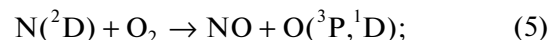
3) спонтанное излучение с 1S уровня возбужденного атомарного кислорода



2) дезактивация иона молекулярного кислорода (диссоциативная рекомбинация) термальными электронами e_{th}



4) столкновительные реакции с возбужденными компонентами нечетного азота



Коэффициенты скоростей реакций, соответствующие каналам возбуждения 1D уровня атома кислорода (3)–(8), приведены в табл. 1.

Поскольку терм $O(^1D)$ является метастабильным с временем жизни порядка 110 с, то его дезактивация происходит не только за счет спонтанного излучения на основной уровень атомарного кислорода, но и в результате столкновительных реакций с составляющими атмосферных газов и термальными электронами:

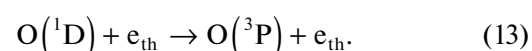
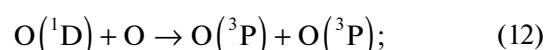
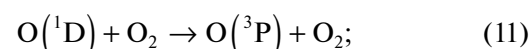
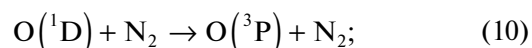
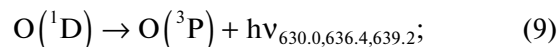


Таблица 1. Реакции возбуждения атомов O(¹D) в столкновительных реакциях

Реакция	Коэффициент	Ссылка
$O_2^+ + e \rightarrow O(^1S) + O(^1D)$	$k_6 = 1.9 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T_e)^{0.5} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[12]
	$f_{iD} = 1.2, f_{iS} = 0.1$	[13]
$O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu$	$A_{34} = 1.06 \text{ с}^{-1}$	[14]
$N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O(^3P, ^1D)$	$k_{40} = 6 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
	$f_{iD} = 0.1$	[16]
$N(^2D) + O \rightarrow N(^4S) + O(^3P, ^1D)$	$k_{41} = 6.9 \cdot 10^{-13} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[17]
	$f_{iD} = 0.1$	
$N(^2P) + O_2 \rightarrow NO + O(^1S, ^1D, ^3P)$	$k_{46} = 3.5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]
	$f_{iS^1D^3P} = 0.33$	
$N^+ + O_2 \rightarrow NO^+ + O(^1D, ^1S)$	$k_{53} = 2.6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[19]
	$f_{iD} = 0.7, f_{iS} = 0.01$	

Таблица 2. Реакции гашения возбужденных атомов O(¹D)

Реакция	Коэффициент	Ссылка
$O(^1D) + N_2 \rightarrow O + N_2$	$k = 2 \cdot 10^{-11} \cdot \exp(107.8/T_n) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[20]
$O(^1D) + O_2 \rightarrow O + O_2$	$k = 2.9 \cdot 10^{-11} \cdot \exp(67.5/T_n) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[20]
$O(^1D) + O \rightarrow O + O$	$k = 8 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[21]
$O(^1D) \rightarrow O + h\nu$	$A = 9.3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$	[22]
$O(^1D) + e \rightarrow O + e$	$k = 1.6 \cdot 10^{-12} \cdot T_e^{0.91} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[23]

Коэффициенты скоростей реакций, соответствующие каналам гашения ¹D терма атома кислорода, приведены в табл. 2.

Объемная интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм определяется следующим выражением:

$$I_{630.0}(h) = A_{iD} N_{iD}(h),$$

где: $I_{630.0}$ – интенсивности эмиссии, A_{iD} – коэффициент Эйнштейна, $N_{iD}(h)$ – концентрации атома кислорода в ¹D состоянии, h – высота.

Концентрация $N_{iD}(h)$ находится из решения системы балансных уравнений вида:

$$\frac{d}{dt} N_{iD}(h) = Q_{iD}(h) + A_{iS} N_{iS}(h) + \sum_{i,j} k_{i,j} N_i(h) N_j(h) - A_{iD} N_{iD}(h) - \sum_i k_i N_{iD}(h) N_i(h),$$

где: $Q_{iD}(h)$ – скорости возбуждения ¹D терма прямым ударом, реакции (1)–(2); второй член – скорости возбуждения за счет спонтанных переходов с ¹S терма, реакция (3); третий член – скорости

возбуждения ¹D терма в столкновительных взаимодействиях ионосферных составляющих сорта i с составляющими сорта j , реакции (4)–(8); четвертый член – дезактивация терма ¹D за счет радиационного перехода, реакция (9); пятый член – дезактивация термов ¹D в результате столкновительных взаимодействий с составляющими ионосферы сорта i , реакции (10)–(13); $k_{i,j}$ – константы скоростей реакций; A_{iD} и A_{iS} – коэффициенты Эйнштейна для спонтанных переходов с соответствующего уровня; $N_{i,j}$ – концентрации ионосферных составляющих сорта i или j .

Скорость образования атомов O(¹D) в результате столкновений атома и молекулы кислорода с авроральными электронами может быть рассчитана по формуле [24]:

$$Q_{iD}(h) = \left(\frac{P_{O_2}(h)}{\varepsilon_{iD}^O} + \frac{P_{O_2}(h)}{\varepsilon_{iD}^{O_2}} \right) \rho(h) \times \int_E \frac{EF(E)[1 - T_E(E)] \lambda \left(E, \frac{z(h)}{R(E)} \right) dE}{R(E)},$$

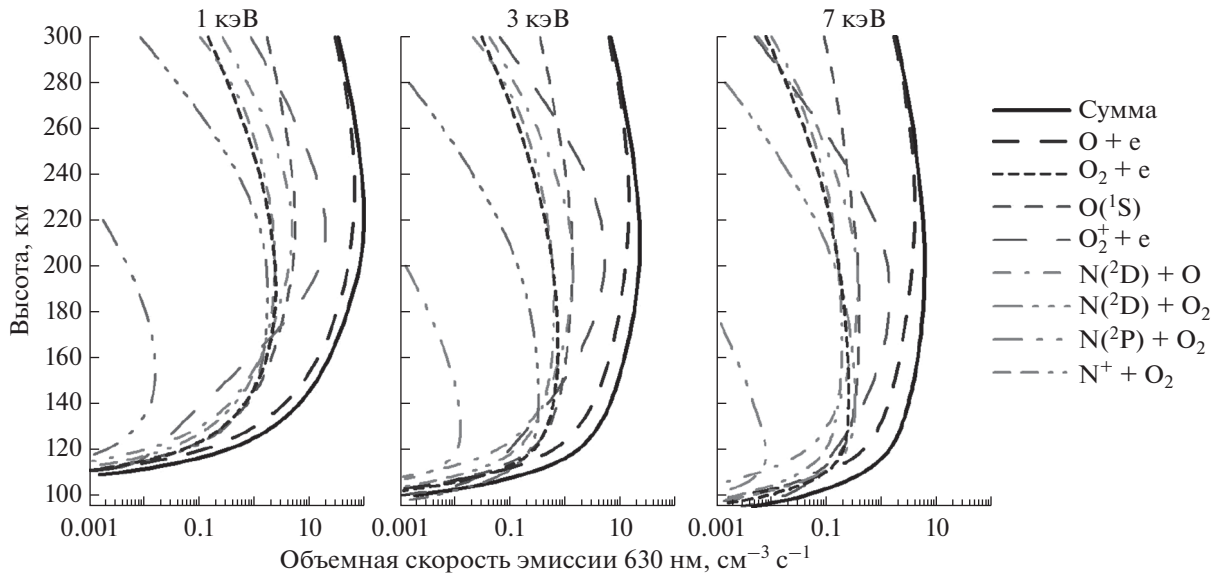


Рис. 1. Высотные профили объемной интенсивности излучения, соответствующие восьми каналам возбуждения эмиссии 630.0 нм. Сплошная линия – суммарный вклад всех каналов.

где: $P_O(h), P_{O_2}(h)$ – относительная доля энергии, пошедшая на возбуждение соответственно атома или молекулы кислорода на высоте h , $\rho(h)$ – плотность нейтральной атмосферы, ϵ_{1D}^O и $\epsilon_{1D}^{O_2}$ – “энергетические цены” возбуждения 1D уровня прямым электронным ударом атома или молекулы кислорода соответственно; $z(h)$ – масса, проходящая электроном до высоты h , $R(E)$ – интегральная длина пробега, λ – безразмерная функция диссипации энергии, $T(E)$ – величина альbedo, $F(E)$ – энергетический спектр высыпавшихся электронов, E – энергия высыпавшихся электронов.

Высотные профили концентраций возбужденного атомарного кислорода N_{1D} и N_{1S} , а также концентрации ионосферных компонент рассчитывались в рамках физико-химической модели возбужденной полярной ионосферы [25], которая позволяет рассчитывать высотные профили концентрации 17-ти основных возбужденных и ионизированных компонент атмосферных газов и электронную концентрацию в области авроральных высыпаний. Входными параметрами в этой модели являются энергетический спектр высыпавшихся электронов на верхней границе ионосферы и модель нейтральной атмосферы. Перераспределение энергии, выделившейся вследствие высыпаний электронов, описывают 56 физико-химических реакций.

Расчеты проводились в модели нейтральной атмосферы MSIS-E-90 [26]. “Энергетические цены”, интегральная длина пробега и функция диссипации энергии были взяты из работы [24], в которой они были получены на основе результатов

статистического моделирования процесса переноса электронов в атмосфере Земли. Коэффициенты Эйнштейна и коэффициенты скоростей реакций взяты из работы [25]. Концентрация окиси азота в максимуме ее высотного профиля [NO_{max}] полагалась равной 10^8 см^{-3} , что соответствует средним значениям концентрации NO в полярных сияниях, полученных в экспериментах [27, 28]. Энергетический спектр потока высыпавшихся электронов задавался в виде максвелловского распределения, что обычно характерно для потоков, формирующих полосы и дуги полярных сияний: $F(E) = N_0 E E_0^{-2} \exp(-E/E_0)$, где N_0 – величина потока высыпавшихся электронов, E_0 – характеристическая энергия потока высыпавшихся электронов.

Распределение по питч-углам задавалось изотропным в нижней полусфере. Средняя энергия дифференциального потока высыпавшихся электронов, равная $E_{cp} = 2E_0$, варьировалась в диапазоне 0.5–20 кэВ, который является типичным для авроральных электронов, возбуждающих полярные сияния [29]. Поток энергии задавался равным $1 \text{ эрг/см}^2 \text{ с}$.

На рис. 1 приведены результаты расчета высотных профилей объемной интенсивности излучения эмиссии 630.0 нм, соответствующие восьми каналам возбуждения 1D терма атомарного кислорода (1)–(8) для средних энергий E_{cp} , равных 1, 3 и 7 кэВ.

Из рис. 1 можно видеть, что на высотах $h > 110 \text{ км}$ доминирующим каналом возбуждения эмиссии

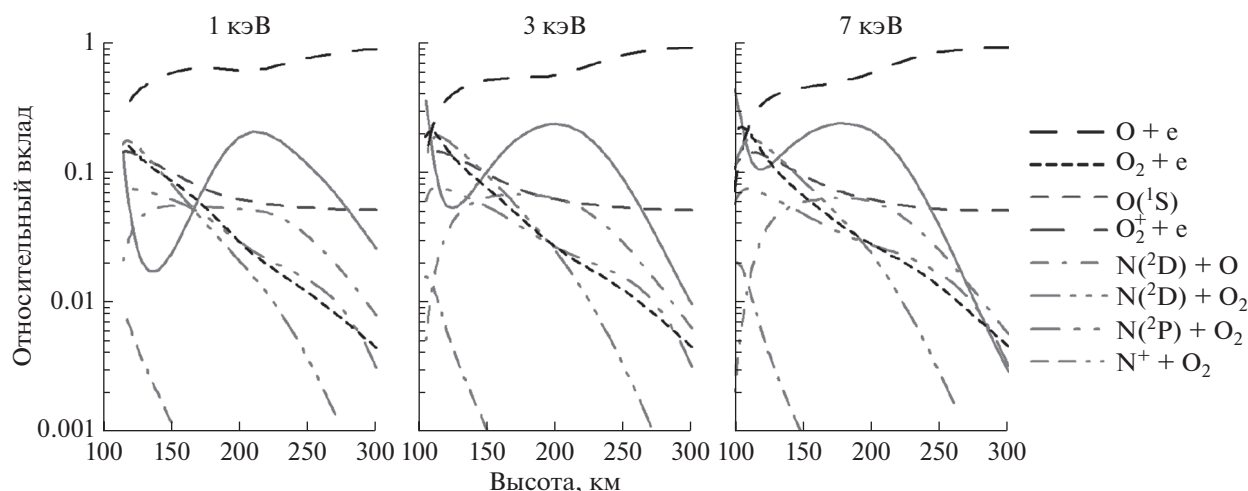


Рис. 2. Высотная зависимость относительных вкладов каналов возбуждения 1D уровня атомарного кислорода в объемную интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм.

630.0 нм является прямой электронный удар $O + e^*$. Вторым по значимости каналом является реакция диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{th}$. В диапазоне высот 100–180 км реакции (2), (3), (5), (6) и (8) вносят сравнительные по величине вклады. Незначительным источником возбуждения эмиссии 630.0 нм во всем диапазоне высот является лишь реакция $N(^2P) + O_2$.

ВКЛАДЫ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭМИССИИ λ 630.0 НМ

Рассмотрим высотные зависимости относительных вкладов источников (1)–(8) в возбуждение эмиссии 630.0 нм, принимая величину суммарной интенсивности излучения на высоте h за единицу. Рассчитанные высотные зависимости относительных вкладов рассматриваемых каналов представлены на рис. 2.

Из рис. 2 хорошо видно, что среди всех рассмотренных каналов возбуждения 1D уровня, вносящий вклад в объемную интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм, только один канал $N(^2P) + O_2$ можно считать незначительным. В интервале высот 100–110 км его вклад не превышает 2% с последующим быстрым убыванием с увеличением высоты. Вклад прямого электронного удара $O + e^*$ демонстрирует плавное возрастание от 6 до 93% в области высот 100–300 км. На высотах свыше 150 км он составляет более 50%. Для вклада прямого электронного удара $O_2 + e^*$ характерно постепенное уменьшение от 20 до 0.5% в интервале высот 100–300 км. Парциальные вклады в возбуждение 1D уровня атомарного кислорода столкновительных реакций (5)–(8) и радиационного перехода с 1S терма (3) не столь значительны и не пре-

вышают 18% в области высот 100–300 км, однако их суммарный вклад в объемную интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм может оказаться достаточно существенным. Обращает на себя внимание характер высотной зависимости относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{th}$, график которой демонстрирует наличие минимума, локализованного в области высот 120–140 км, где происходит максимальное выделение энергии высыпавшихся электронов.

Каналы возбуждения 1D состояния атома кислорода можно условно разбить на две основные группы. К первой группе отнесем возбуждение 1D терма прямым электронным ударом: $O + e^*$ и $O_2 + e^*$. Во второй группе объединим процессы столкновительных взаимодействий атома и молекулы кислорода с нечетным азотом: $N(^2D) + O$; $N(^2D) + O_2$; $N(^2P) + O_2$; $N^+ + O_2$. Отдельно рассмотрим радиационный переход с 1S терма $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu_{557.7}$ и реакцию диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{th}$. На рис. 3 представлены высотные зависимости относительных вкладов сгруппированных каналов в объемную интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм.

Из рис. 3 видно, что суммарный вклад прямых электронных ударов $O + e^*$ и $O_2 + e^*$ демонстрирует непрерывный рост от 40 до 90% в диапазоне высот 100–300 км. Суммарный вклад столкновительных взаимодействий $N(^2D) + O$; $N(^2D) + O_2$; $N(^2P) + O_2$; $N^+ + O_2$ и вклад радиационного перехода с 1S терма сравнимы по величине и демонстрируют уменьшение с увеличением высоты с 28 до 1% и с 18 до 5% соответственно. Суммарная эффективность столкновительных и радиационного каналов варьируется в диапазоне 46–6% в

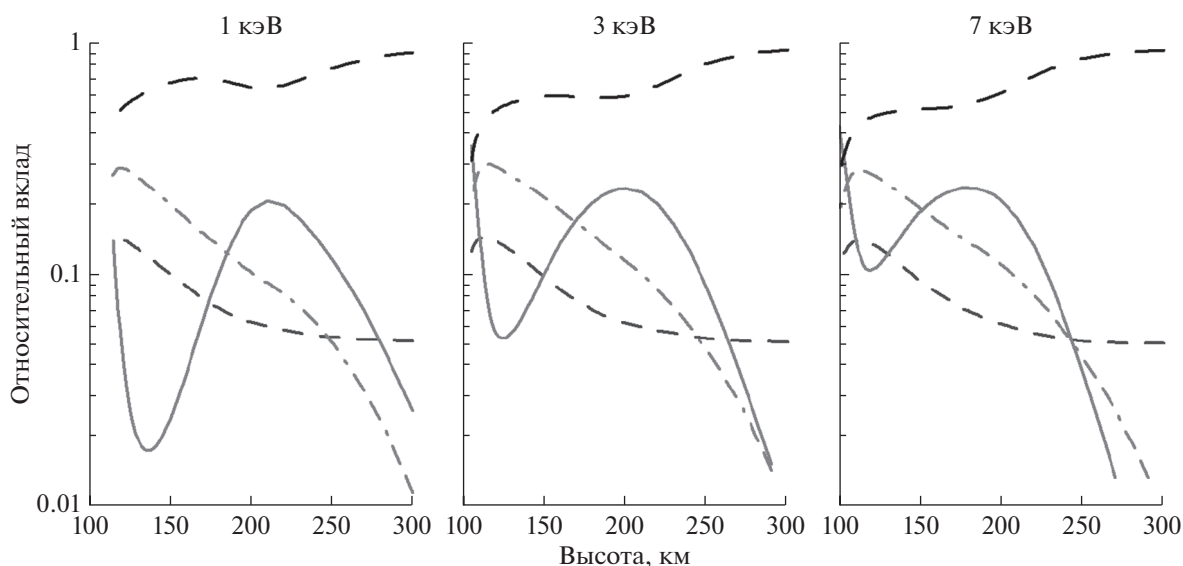


Рис. 3. Высотные распределения относительных вкладов в объемную интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм сгруппированных каналов возбуждения 1D терма, а именно: суммы прямых электронных ударов (длинный штрих); суммы каналов столкновительных реакций с нечетным азотом (два штриха и точка), радиационного перехода (короткий штрих) и реакции диссоциативной рекомбинации (сплошная линия).

интервале высот 100–300 км и является существенной на высотах ниже 200 км.

В отличие от других каналов, для диссоциативной рекомбинации характерно наличие в высотной зависимости ее вклада в возбуждение 1D терма локального минимума в интервале высот

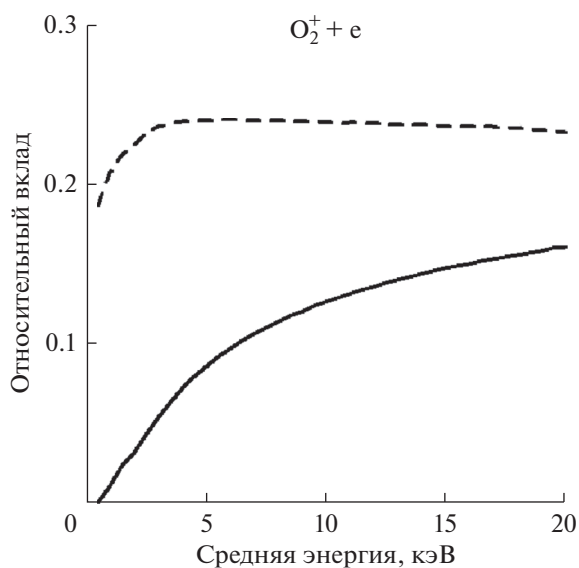


Рис. 4. Эффективность вклада реакции диссоциативной рекомбинации в возбуждение эмиссии 630.0 нм в областях минимума (сплошная линия) и максимума (пунктирная линия) в зависимости от средней энергии потока высыпавшихся электронов.

110–150 км и максимума, локализованного в интервале 180–220 км. Для рассматриваемых средних энергий потока высыпавшихся электронов 1, 3 и 7 кэВ эффективность относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации в объемную интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм лежит в диапазоне 38–59% в районе 100 км, уменьшается в области высот 110–150 км до 2–14%, а затем опять увеличивается в области высот 180–220 км до 15–24%. Наличие минимума в кривой высотного распределения относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации приводит к тому, что в области высот 110–150 км вторым по эффективности механизмом возбуждения эмиссии 630.0 нм становится совокупность каналов столкновительных взаимодействий и радиационного перехода с 1S терма. Зависимости величины вкладов реакции диссоциативной рекомбинации в локальном минимуме и локальном максимуме от средней энергии потока высыпавшихся электронов приведены на рис. 4.

Из рисунка видно, что величина вклада реакции диссоциативной рекомбинации в области максимума испытывает слабую зависимость от средней энергии потока высыпавшихся электронов. Однако величина вклада в области минимума зависит средней энергии и возрастает от 1 до 16% при увеличении средней энергии от 0.5 до 20 кэВ. Возможными причинами формирования минимума в высотном распределении относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации в объемную интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм могут являться столкновительные реак-

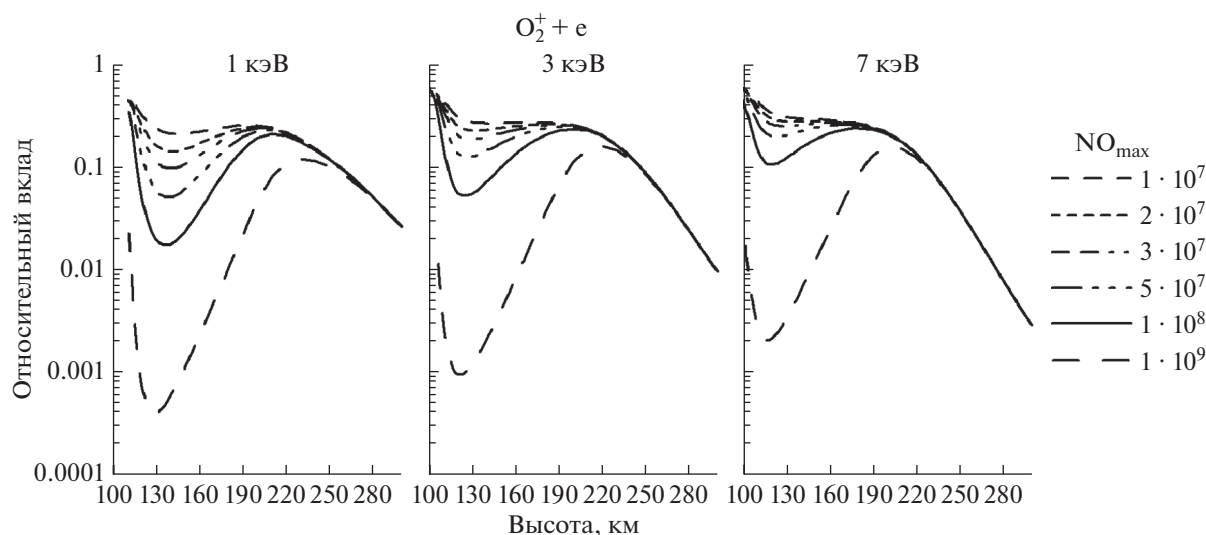


Рис. 5. Высотное распределение величины относительного вклада реакции $O_2^+ + e_{th}$ в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм в зависимости от концентрации NO в максимуме ее высотного профиля $[NO]_{max}$.

ции иона молекулярного кислорода O_2^+ с нечетным азотом $N(^4S)$, $N(^2D)$ и NO. Константы скоростей реакций $O_2^+ + N(^4S)$, $O_2^+ + N(^2D)$ и $O_2^+ + NO$ сравнимы между собой [31–32], тогда как концентрации $N(^4S)$ и $N(^2D)$ в полярных сияниях на порядки меньше концентраций NO. Поэтому можно считать, что основным процессом дезактивации иона O_2^+ является реакция $O_2^+ + NO$. Исследуем динамику высотного распределения величины относительного вклада реакции $O_2^+ + e_{th}$ в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм в зависимости от концентрации NO в максимуме ее высотного профиля $[NO]_{max}$. На рис. 5 приведены результаты расчетов высотного распределения вклада диссоциативной рекомбинации для $[NO]_{max}$, лежащих в диапазоне 10^7 – 10^9 см $^{-3}$, что соответствует результатам оценок окиси азота в полярных сияниях [27, 28, 33].

Из рис. 5 видно как сильно изменяется величина вклада реакции диссоциативной рекомбинации в области локального минимума в зависимости от концентрации окиси азота. При концентрациях $[NO]_{max}$ порядка 10^9 см $^{-3}$ вклад реакции диссоциативной рекомбинации составляет величину меньшую 1%. С уменьшением концентрации $[NO]_{max}$ до величин порядка 10^7 см $^{-3}$ вклад реакции диссоциативной рекомбинации возрастает до 20–30%. Таким образом относительный вклад реакции диссоциативной рекомбинации в интенсивность эмиссии 630.0 нм в области высот

110–150 км зависит от содержания окиси азота в полярной атмосфере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматривается роль всех известных потенциальных источников возбуждения 1D терма атомарного кислорода и величина их относительных вкладов в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм в интервале высот 100–300 км. Основное внимание уделено роли слабых источников возбуждения 1D терма таких как: столкновительные взаимодействия между компонентами атмосферных газов $N(^2D) + O$, $N(^2D) + O_2$, $N(^2P) + O_2$, $N^+ + O_2$, прямой электронный удар $O_2 + e^*$ и радиационный переход $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu_{557.7}$. Ранее в работах [5, 6] данные источники были отнесены к разряду незначительных и их вклады в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм не рассматривались. Результаты, полученные в данной работе, свидетельствуют о том, что несмотря на небольшие парциальные вклады слабых источников в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм их суммарный вклад может быть достаточно существенным. Суммарная эффективность данных источников варьируется в диапазоне от 66 до 6% при увеличении высоты от 100 до 300 км и является значимой на высотах ниже 200 км.

Отдельное внимание в работе уделено исследованию роли окиси азота NO в процессах возбуждения 1D терма атомарного кислорода. Окись

азота является основным гасителем иона молекулярного кислорода O_2^+ , от концентрации которого зависит эффективность реакции диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{th} \rightarrow O(^1D) + O$ как источника эмиссии 630.0 нм. Показано, что для распределения величины относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации характерен ярко выраженный минимум в области высот ~ 110 – 150 км, который формируется благодаря процессу дезактивации иона молекулярного кислорода окисью азота $O_2^+ + NO$. При этом величина относительного вклада в области минимума зависит от концентрации окиси азота в максимуме ее высотного профиля, демонстрируя увеличение от 1 до 20–30% при уменьшении концентрации окиси азота в максимуме высотного профиля $[NO]_{max}$ от 10^9 до 10^7 см $^{-3}$. Влияние процесса дезактивации $O_2^+ + NO$ приводит к тому, что в области высот 110–150 км совокупность реакций столкновительных взаимодействий компонент ионосферной плазмы $N(^2D) + O$, $N(^2D) + O_2$, $N(^2P) + O_2$ и $N^+ + O_2$ становится вторым по эффективности источником, вносящим вклад в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rees M.H., Walker J.C.G., Dalgarno A.* Auroral excitation of the forbidden lines of atomic oxygen // *Planet. Space Sci.* 1967. V. 15. № 7. P. 1097–1110.
2. *Rees M.H., Roble R.G.* Observations and theory of the formation of stable auroral red arcs // *Rev. Geophys.* 1975. V. 16. № 1. P. 201–242.
3. *Sharp W.E., Rees M.H., Stewart A.I.* Coordinated rocket and satellite measurements of an event. 2. The rocket observations and analysis // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. № A5. P. 1977–1985.
4. *Rees M.H., Roble R.G.* Excitation of $O(^1D)$ atoms in aurorae and emission of the OI 6300A line // *Can. J. Phys.* 1987. V. 64. P. 1608–1613.
5. *Solomon S.C., Hays P.B., Abreu V.J.* The auroral 6300 A emission: Observations and modeling // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. № A9. P. 9867–9882.
6. *Meier R.R., Strickland D.J., Hecht J.H. et al.* Deducing composition and incident electron spectra from ground-based auroral optical measurements: A study of auroral red line processes // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № A10. P. 13541–13552.
7. *Rees M.H., Stewart A.I., Sharp W.E. et al.* Coordinated rocket and satellite measurements of an auroral event. 1. Satellite observations and analysis // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. № 16. P. 2250–2261.
8. *Rusch D.W., Gerard J.C., Sharp W.E.* The reaction of $N(^2D)$ with O_2 as source $O(^1D)$ atoms in aurorae // *Geophys. Res. Lett.* 1978. V. 5. № 12. P. 1043–1046.
9. *Link R.* A rocket observation of the 6300A/5200A intensity ratio in dayside aurora: Implications for the production of $O(^1D)$ via the reaction $N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O(^1D)$ // *Geophys. Res. Lett.* 1983. V. 10. № 3. P. 225–228.
10. *McDade I.C., Llewellyn E.J., Harris F.A.* A rocket measurement of the $O_2(b^1\Sigma_g-X^3\Sigma_g)$ (0–0) atmospheric band in a pulsating aurora // *Can. J. Phys.* 1985. V. 63. № 10. P. 1322–1329.
11. *Kennealy J.P., Del Greco F.P., Caledonia G.E. et al.* Nitric oxide chemiexcitation occurring in the reaction between metastable nitrogen atoms and oxygen molecules // *J. Chem. Phys.* 1978. V. 69. № 4. P. 1574–1584.
12. *Mul P.M., McGowan J.W.* Merged electron-ion beam experiments. III. Temperature dependence of dissociative recombination of atmospheric ions NO^+ , O_2^+ and N_2^+ // *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* 1979. V. 12. № 9. P. 1591–1601.
13. *Abreu V.J., Solomon S.C., Sharp W.E. et al.* The dissociative recombination of O_2^+ : The quantum yield of $O(^1S)$ and $O(^1D)$ // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. № A5. P. 4140–4144.
14. *Kernahan J.H., Pang H.L.* Experimental determination of absolute A coefficients for ‘forbidden’ atomic oxygen lines. // *Can. J. Phys.* 1975. V. 53. № 5. P. 455–458.
15. *Lin C.-L., Kaufman F.* Reactions of metastable nitrogen atoms // *J. Chem. Phys.* 1971. V. 55. № 8. P. 3760–3769.
16. *Link R.* A rocket observation of 6300A/5200A intensity ratio in the dayside aurora: Implications for the production of $O(^1D)$ via the reaction $N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O(^1D)$ // *Geophys. Res. Lett.* 1983. V. 10. № 3. P. 225–228.
17. *Fell C., Steinfeld J.I., Miller S.* Quenching of $N(^2D)$ by $O(^3P)$ // *J. Chem. Phys.* 1990. V. 92. № 8. P. 4768–4777.
18. *Gerard J.-C.* Thermospheric ODD nitrogen // *Planet. Space Sci.* 1992. V. 40. № 2/3. P. 337–353.
19. *Langford A.O., Bierbaum V.M., Leone S.R.* Auroral implications of recent measurements on $O(^1S)$ and $O(^1D)$ formation in the reaction of N^+ with O_2 // *Planet. Space Sci.* 1985. V. 33. № 10. P. 1225–1228.
20. *Streit G.E., Howard C.J., Schmeltekopf A.L. et al.* Temperature dependence of $O(^1D)$ rate constants for reactions with O_2 , N_2 , CO_2 , O_3 , and H_2O // *J. Chem. Phys.* 1976. V. 65. № 11. P. 4761–4764.
21. *Abreu V.J., Yee J.H., Solomon S.C. et al.* The quenching rate of $O(^1D)$ by $O(^3P)$ // *Planet. Space Sci.* 1986. V. 34. № 11. P. 1143–1146.
22. *Fisher C.F., Saha H.P.* Multiconfiguration Hartree-Fock results with Briet-Pauli corrections for forbidden transitions in the $2p^4$ configuration // *Phys. Rev. A.* 1983. V. 28. № 6. P. 3169–3178.
23. *Berrington K.A., Burke P.G.* Effective collision strengths for forbidden transitions in e-N and e-O scattering // *Planet. Space Sci.* 1981. V. 29. № 3. P. 377–380.

24. *Иванов В.Е., Козелов Б.В.* Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли. Апатиты: Кольский научный центр, 2001.
25. *Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И. и др.* Физико-химическая модель авроральной ионосферы // *Космич. исслед.* 2017. Т.55. № 2. С. 94–106. (Cosmis Research. P. 88–100).
26. *Hedin A.E.* Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 1159–1172.
27. *Swider W., Narcisi R.S.* Auroral E-region: Ion composition and nitric oxide // *Planet. Space Sci.* 1977. V. 25. № 2. P. 103–116.
28. *Sharp W.E.* NO₂ continuum in aurora // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. № A9. P. 4373–4376.
29. *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V.* Auroral precipitation model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2013. V. 102. P. 157–171.
30. *Fensenfeld F.C.* The reaction of O₂⁺ with atomic nitrogen and NO⁺·H₂O and NO₂⁺ with atomic oxygen // *Planet. Space Sci.* 1977. V. 25. № 2. P. 195–196.
31. *Goldan P.D., Schmeltekopf A.L., Fehsenfeld F.C. et al.* Thermal energy ion-neutral reaction rates. II. Some reactions of ionospheric interest // *J. Chem. Phys.* 1966. V. 44. № 11. P. 4095–4103.
32. *Lindinger W., Ferguson E.E.* Laboratory investigation of the ionospheric O₂⁺(X²Π_g, v = 0) reaction with NO // *Planet. Space Sci.* 1983. V. 31. № 10. P. 1181–1182.
33. *Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.* Оценка содержания окиси азота в полярных сияниях по данным наземных фотометрических наблюдений // *Солнечно-Земная физика.* 2019. Т. 5. № 1. С. 77–81.