

ИНФРАКРАСНОЕ СВЕЧЕНИЕ ОКИСИ АЗОТА В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ В СОБЫТИЯХ GLE 23-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

© 2023 г. А. С. Кириллов¹ *, В. Б. Белаховский¹ **, Е. А. Маурчев^{1, 2},
Ю. В. Балабин¹, А. В. Германенко¹, Б. Б. Гвоздевский¹

¹Полярный геофизический институт (ПГИ),
Апатиты (Мурманская область), Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

*e-mail: kirillov@pgia.ru

**e-mail: belakhov@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.

После доработки 29.06.2023 г.

Принята к публикации 03.08.2023 г.

Рассмотрена кинетика образования колебательно-возбужденных молекул $\text{NO}(\text{X}^2\Pi, \nu > 0)$ на высотах средней атмосферы Земли во время высыпания высокоэнергичных протонов. Проведен расчет профилей интенсивностей свечения инфракрасных полос окиси азота 5.3 мкм и 2.7 мкм в случае высыпания в атмосферу Земли высокоэнергичных протонов во время событий GLE65, GLE67, GLE69, GLE70 23-го солнечного цикла. Расчеты показали, что наибольшие значения интегральной интенсивности свечения полос 5.3 мкм и 2.7 мкм получаются для GLE69 и составляют 5.7 кР (килорэлей) и 0.18 кР соответственно. Сравнение результатов расчета для полосы 5.3 мкм во время события GLE69 с экспериментальными данными, полученными с космического летательного аппарата TIMED 20 января 2005 г., показало завышение результатов расчета в два раза.

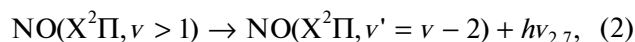
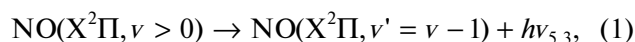
DOI: 10.31857/S0016794023600643, EDN: PTBOZU

1. ВВЕДЕНИЕ

Колебательно-возбужденные молекулы окиси азота NO эффективно образуются на высотах верхней и средней атмосферы и могут играть очень важную роль в инфракрасном радиационном балансе атмосферы Земли [Lopez-Puertas and Taylor, 2001; Funke et al., 2012]. Более того, нечетный азот образуется в верхних слоях атмосферы во время авроральных высыпаний и в средней атмосфере во время высыпаний высокоэнергичных протонов или во время импульсных разрядов, связанных со спрайтовыми стримерами. Концентрации окиси азота могут существенно повышаться, влияя на химический и излучательный балансы полярных верхних и средних слоев атмосферы. Так, в работах [Sentman et al., 2008; Gordillo-Vazques, 2008] было показано, что концентрации NO повышаются в средней атмосфере во время спрайтов.

В работах [Гордиец, 1977; Kockarts, 1980; Caledonia and Kennealy, 1982; Gordiets et al., 1982; Гордиец и Марков, 1983; Sharma et al., 1996; Kirillov and Aladjev, 1998; Cartwright et al., 2000; Mlyneczek et al., 2003; Winick et al., 2004; Campbell and Brunger, 2007; Venkataramani et al., 2016; Bouziane et al.,

2022] были исследованы механизмы образования и потерь колебательно-возбужденных молекул NO как для спокойной верхней атмосферы, так и для возмущенной высыпаниями высокоэнергичных частиц. Кроме того, в указанных работах особое внимание уделялось свечению инфракрасных полос 5.3 мкм и 2.7 мкм молекул окиси азота, излучаемых при спонтанных переходах



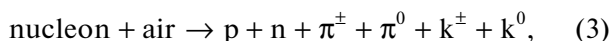
где $\text{X}^2\Pi$ — основное электронное состояние молекулы окиси азота. В этих работах было показано, что интенсивность инфракрасного излучения в атмосферном спектре может значительно увеличиваться при возмущении атмосферы высокоэнергичными частицами.

Кроме того, электронно-возбужденные и колебательно-возбужденные молекулы не только светятся в различных диапазонах длин волн, но и могут участвовать в различных химических процессах. Скорости таких процессов возрастают из-за внутреннего возбуждения молекул и уменьшения активационных барьеров химических реак-

ций [Русанов и Фридман, 1984]. Поэтому при исследовании химического состава и излучательно-го баланса атмосферы во время возмущений, связанных с дополнительным притоком энергии, необходим учет электронной и колебательной кинетики как основных атмосферных составляющих N_2 и O_2 , так и малых, включая молекулы окиси азота.

В предыдущих работах [Кириллов и др., 2021, 2023] были проведены расчеты профилей интенсивностей полос первой (1PG, 749 нм и 669 нм) и второй положительных (2PG, 337 нм) систем N_2 , полос Лаймана–Бирджа–Хопфилда (LBH, 135 нм и 146 нм) N_2 , а также полос Инфракрасной Атмосферной (IRAtm, 1270 нм) и Атмосферной (Atm, 762 нм) систем O_2 на высотах 20–80 км средней атмосферы Земли во время выпадения высокоэнергичных протонов в атмосферу Земли во время событий GLE65, GLE67, GLE69 и GLE70 (Ground level enhancement), при которых произошло возрастание скорости счета нейтронных мониторов (НМ), возникшее вследствие увеличения числа протонов (в основном с энергией до 10 ГэВ) в потоке первичных космических лучей (КЛ).

При вторжении в атмосферу Земли первичных КЛ протоны составляют около 85% от их общего количества, остальные частицы – это ядра гелия и элементов с $Z > 2$, а также электроны с позитронами. При прохождении через верхние, разреженные, слои атмосферы преобладающим процессом является ионизация, причем наиболее активными здесь являются частицы с энергией до 1 ГэВ. При достижении высоты 10–30 км над уровнем моря все более вероятными становятся неупругие соударения с ядрами атомов атмосферных составляющих (в основном частицы с энергией более 1 ГэВ с азотом и кислородом) [Дорман, 1975; Широков и Юдин, 1980; Simpson, 1983]. В результате ядерных взаимодействий возникают каскады вторичных частиц различного сорта, условно эту реакцию можно выразить через формулу генерации частиц:



где p – протоны; n – нейтроны; $\pi^\pm$, π^0 – пионы; $k^\pm$, k^0 – каоны.

Взаимодействие элементарных частиц, образованных в процессе (3), с молекулами составляющих средней атмосферы Земли приводит к образованию потоков вторичных электронов. Как показывают исследования взаимодействия высокоэнергичных протонов с молекулами азота и кислорода [Porter et al., 1976], при протонных выпадениях эффективно протекают процессы диссоциации молекул с образованием атомов азота и кислорода. Образовавшиеся атомы вступают в химические реакции с различными молекулами, приводя к значительным изменениям concentra-

ций малых атмосферных составляющих. Кроме того, неупругие столкновения высокоэнергичных вторичных электронов приводят к ионизации молекул азота и кислорода. Последствием данных процессов диссоциации и ионизации молекул N_2 и O_2 является также образование нечетного азота (NO_x) и водорода (HO_x), которые способствуют уменьшению содержания озона в средней атмосфере [Turunen et al., 2009; Кривоуцкий и Репнев, 2009, 2012].

В настоящей работе рассмотрена кинетика основного состояния окиси азота $NO(X^2\Pi, v > 0)$ на высотах средней атмосферы (20–80 км) во время событий GLE65 (28 октября 2003 г.), GLE67 (02 ноября 2003 г.), GLE69 (20 января 2005 г.), GLE70 (13 декабря 2006 г.), при которых произошло возрастание скорости счета НМ, возникших вследствие увеличения числа протонов (в основном с энергией до 10 ГэВ) в потоке первичных КЛ. На основании полученных колебательных населенностей проведен расчет интенсивностей инфракрасного свечения окиси азота в полосах 5.3 мкм и 2.7 мкм на рассмотренных высотах атмосферы.

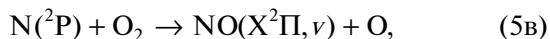
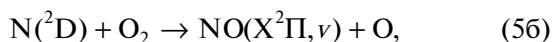
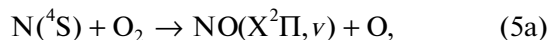
2. ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ИСЧЕЗНОВЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННЫХ МОЛЕКУЛ $NO(X^2\Pi, v > 0)$ НА ВЫСОТАХ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Поскольку колебательно-возбужденные молекулы $NO(X^2\Pi, v > 0)$ эффективно излучают эмиссии с длинами волн 5.3 мкм и 2.7 мкм, то расчет интенсивностей инфракрасного излучения окиси азота в атмосфере требует знания основных механизмов образования $NO(X^2\Pi, v > 0)$ и квантовых выходов различных колебательных уровней в данных процессах. Также необходимо учитывать все процессы исчезновения колебательного возбуждения, включая спонтанные излучательные переходы и релаксацию энергии при неупругих столкновениях молекул $NO(X^2\Pi, v > 0)$ с другими компонентами атмосферы.

Согласно работам [Гордиец, 1977; Kockarts, 1980; Caledonia and Kennealy, 1982; Gordiets et al., 1982; Sharma et al., 1996; Kirillov and Aladjev, 1998; Cartwright et al., 2000; Mlynczak et al., 2003; Winick et al., 2004; Campbell and Brunger, 2007; Venkataramani et al., 2016; Bouziane et al., 2022] основными механизмами образования $NO(X^2\Pi, v > 0)$ при высокой температуре и при выпадениях высокоэнергичных частиц в верхние слои атмосферы являются возбуждение при столкновениях с атомами кислорода



и химические реакции невозбужденного и метастабильного атомарного азота с молекулярным кислородом



где атомы $\text{N}(^4\text{S}, ^2\text{D}, ^2\text{P})$ в основном образуются при диссоциации и диссоциативной ионизации N_2 авроральными частицами или в ионном цикле авроральной ионосферы.

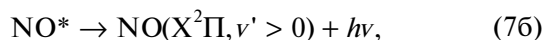
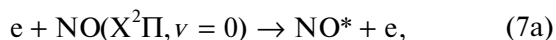
В верхней атмосфере на высотах свечения окиси азота концентрации атомарного кислорода составляют от ~20% от общего содержания ($[\text{O}] + [\text{N}_2] + [\text{O}_2]$) на высоте 120 км до ~60% на высоте 200 км. В средней атмосфере на высоте 80 км отношение $[\text{O}]/([\text{N}_2] + [\text{O}_2])$ составляет $\sim 10^{-5}$ с резким падением до нулевых значений с понижением высоты. Поэтому на высотах средней атмосферы процессом (4) можно пренебречь.

У процесса (5a) константа скорости имеет экспоненциальную зависимость $k_{5a} \sim \exp(-3220/T)$ от температуры атмосферы T [Clark and Wayne, 1970; Burkholder et al., 2015]. Температура на высотах средней атмосферы изменяется в диапазоне 200–260 К, поэтому константа скорости реакции (5a) имеет малые значения $\sim (0.5-18) \times 10^{-18} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ при таких температурах. Поэтому процесс (5a) мы не учитываем в расчетах. Как было показано в работах [Rawlins et al., 1989; Kirillov and Aladjev, 1998], скорости образования $\text{NO}(\text{X}^2\text{П}, \nu)$ в процессе (5в) значительно меньше аналогичных скоростей у процесса (5б). Поэтому аналогично процессам (4) и (5a) в данной работе им пренебрегаем.

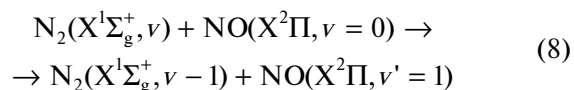
Кроме того, в работе [Cartwright et al., 2000] авторы уделили особое внимание процессам образования колебательно-возбужденных уровней основного электронного состояния $\text{X}^2\text{П}$ и электронно-возбужденных состояний молекул NO потоком вторичных электронов в верхних слоях атмосферы. В модели [Cartwright et al., 2000] были учтены процессы колебательного возбуждения в основном электронном состоянии $\text{NO X}^2\text{П}$, протекающие как в процессах прямого возбуждения вторичными авроральными электронами



так и в радиационных каскадах из семи дублетных и двух квартетных вышележащих возбужденных электронных состояний, заселяемых электронным ударом

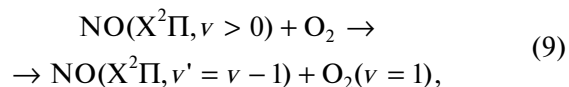


где NO^* означает электронно-возбужденную молекулу окиси азота. Авторы [Cartwright et al., 2000] рассчитали относительную скорость заселения для $\text{X}^2\text{П}$, $\nu' > 0$ как прямым возбуждением, так и различными радиационными процессами в зависимости от колебательного квантового числа ν' . В исследованиях основных механизмов образования $\text{NO}(\text{X}^2\text{П}, \nu' > 0)$ на высотах средней атмосферы во время GLE69 в работе [Kirillov et al., 2023] было показано, что вкладом процессов (6) и (7б) можно пренебречь, поскольку концентрации окиси азота NO намного меньше концентраций основных составляющих. Кроме этого, в работе [Kirillov et al., 2023] исследовался вклад колебательно-колебательного обмена энергией



в образовании $\text{NO}(\text{X}^2\text{П}, \nu' > 0)$. Расчеты показали, что при характерных для средней атмосферы концентрациях NO вклад процесса (8) на несколько порядков меньше вклада процесса (5б), но при значениях $[\text{NO}]$, сравнимых с концентрациями основных атмосферных составляющих, вклад данного процесса становится того же порядка, что и вклад процесса (5б).

Исчезновение колебательно-возбужденной молекулы окиси азота $\text{NO}(\text{X}^2\text{П})$ на высотах средней атмосферы происходит как за счет излучения инфракрасных полос 5.3 мкм и 2.7 мкм (1, 2), так и за счет неупругих столкновений с молекулами O_2 [Green et al., 1982; Hancock et al., 2006] с колебательно-колебательным обменом энергией



когда невозбужденная молекула $\text{O}_2(\text{X}^3\Sigma_g^-)$ переходит на первый колебательный уровень $\nu = 1$. Для процессов (1) и (2) мы применяем в расчетах вероятности излучательных переходов согласно [Rawlins et al., 1998], а для констант скоростей гашения $\text{NO}(\text{X}^2\text{П}, \nu' > 0)$ в процессе (9) используем экспериментальные данные [Hancock et al., 2006].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ ПОЛОС МОЛЕКУЛ ОКИСИ АЗОТА

В настоящей работе аналогично работе [Кириллов и др., 2023] рассмотрены события GLE 23-го солнечного цикла (1997–2009 гг.), которым сопутствовало увеличение скорости образования пар ионов на высотах от 0 до 80 км. Для расчетов прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли используется пакет для разработки программ

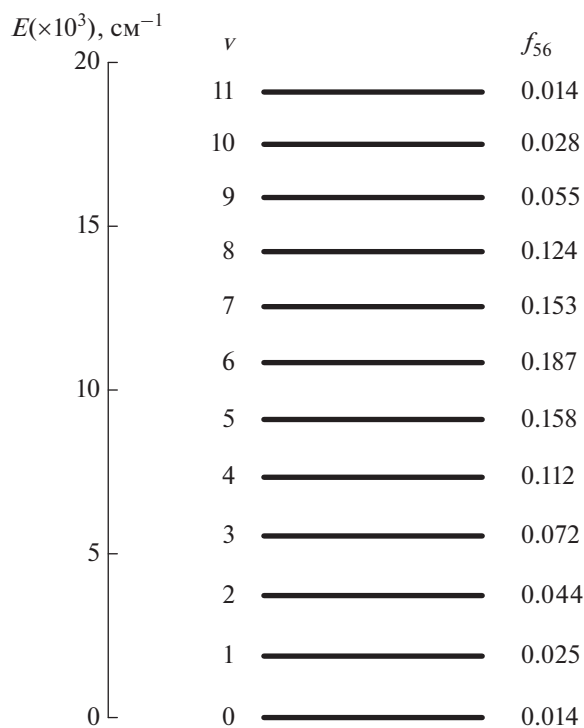


Рис. 1. Схема колебательных уровней $v' = 0–11$ основного состояния $X^2\Pi$ молекулы окиси азота и используемые значения квантовых выходов $f_{56}(v')$.

GEANT4 [Agostinelli et al., 2003], при помощи которого создаются соответствующие модели. В Полярном геофизическом институте был разработан программный пакет RUSCOSMICS, как более современный инструмент для замены PLANETOCOSMICS [Маурчев и др., 2015, 2019; Маурчев и Балабин, 2016]. Описание методики получения данных спектров первичных КЛ, используемых в моделировании, приводится в работе [Vashenyuk et al., 2011].

Событие GLE65 произошло 28 октября 2003 г., когда активность Солнца еще была близка к максимуму. GLE65 произошло от вспышки 4B/X17.2 с координатами S16E08. В 11:02 UT отмечено начало радиовсплеска II типа, указывающего на появление в магнитосфере Солнца энергичных частиц. Амплитуда возрастания на некоторых южно-полярных станциях у НМ превышала 40% от уровня галактического фона. Однако наиболее раннее начало возрастания отмечено в 11:14 UT на ст. Норильск.

Событие GLE67 произошло 2 ноября 2003 г. от вспышки 2B/X8.3 с координатами S18W59. В 17:14 UT наблюдалось начало радиовсплеска II типа. Максимальная амплитуда возрастания на некоторых южно-полярных станциях у НМ достигала 15–18% от уровня галактического фона.

Наиболее раннее начало возрастания отмечено в 17:29 UT на ст. Мак-Мердо в Антарктиде.

Событие GLE69 произошло 20 января 2005 г. от вспышки 2B/X7.1 с координатами N14W61. Вспышка сопровождалась радиовсплесками II и IV типов. Начало радиоизлучения II типа (вероятный момент генерации релятивистских КЛ) зафиксировано в 06:44 UT. Событие GLE69 на начальной фазе характеризовалось очень большой амплитудой возрастания (более 4000%) и сильной анизотропией “север–юг” в релятивистском потоке КЛ. На начальной фазе спектр солнечных космических лучей соответствовал быстрой компоненте.

Событие GLE 70, последнее событие 23 цикла солнечной активности, произошло 13 декабря 2006 г. в 02.40 UT. Активная область с координатами S06W24 вызвала солнечную вспышку класса 2B/X3.4. Вспышка сопровождалась радиовсплесками типа II, IV и выбросом корональной массы типа “гало”. По данным НМ продолжительность события составила около 5 ч. Несмотря на то, что событие GLE70 происходило на спаде цикла, это было достаточно мощное событие (третье по интенсивности в 23-м цикле). Наибольший рост интенсивности космических лучей наблюдался на ст. Оулу (92%).

Для расчета населенности v' -го колебательного уровня $X^2\Pi$ -состояния NO воспользуемся уравнением:

$$k_{56}f_{56}(v')[N(^2D)][O_2] + (A_{v'+1,v'} + k_9(v'+1)[O_2])N_{v'+1}^X + A_{v'+2,v'}N_{v'+2}^X = (10) \\ = \{A_{v',v'-1} + A_{v',v'-2} + k_9(v')[O_2]\}N_{v'}^X.$$

Здесь $A_{v',v'}$ – вероятности спонтанных переходов (1) и (2), которые учитываются согласно [Rawlins et al., 1998]. Константы k_9 берутся согласно [Hancock et al., 2006].

Квантовые выходы $f_{56}(v')$ в процессе (56) были рассчитаны в работе [Kirillov and Aladjev, 1998] с помощью теории неожиданностей [Bernstein and Levine, 1976; Nesbet, 1981] для различных параметров неожиданности $\lambda = -7 \dots -2$. Колебательное распределение молекул окиси азота в полярной ионосфере, рассчитанное в [Kirillov and Aladjev, 1998] по одномерной нестационарной модели химической и колебательной кинетики верхней атмосферы, было сопоставлено с экспериментальными данными ракетных измерений [Rawlins et al., 1981]. Было получено, что наилучшее соответствие результатов расчета и экспериментальных данных для профиля концентрации атомарного кислорода согласно модели MSIS-83 получается при параметре $\lambda = -6$. Данное значение параметра неожиданности хорошо согласуется с результатами лабораторных оценок, полученных

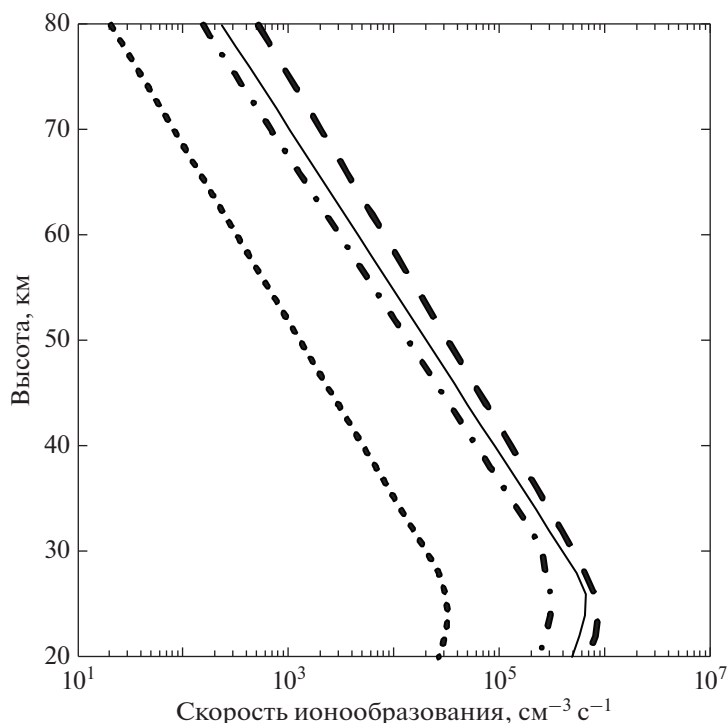


Рис. 2. Профили рассчитанных скоростей ионообразования: GLE65 (короткие штрихи), GLE67 (штрихпунктирные линии), GLE69 (длинные штрихи), GLE70 (сплошные линии).

в [Rawlins et al., 1989]. Поэтому мы применяем здесь значения квантовых выходов $f_{56}(v')$ в процессе (56), рассчитанные в работе [Kirillov and Aladjev, 1998] для параметра неожиданности $\lambda = -6$. На рис. 1 приведена схема колебательных уровней $v' = 0-11$ основного состояния молекулы NO и используемые значения квантовых выходов $f_{56}(v')$.

На рис. 2 показаны профили рассчитанных скоростей ионообразования для всех четырех случаев GLE (GLE65, GLE67, GLE69, GLE70) [Кириллов и др., 2023]. Рассчитанные объемные интенсивности инфракрасной полосы 5.3 мкм для излучательного перехода (1) для этих же случаев GLE приведены на рис. 3.

Рассчитанные интенсивности инфракрасного излучения NO 5.3 мкм представлены на рис. 3 для высот 20–80 км средней атмосферы, включают вклады колебательных уровней $v' = 1-20$ NO($X^2\Pi$). Тем не менее, молекула окиси азота представляет собой ангармонический осциллятор, и длины волн инфракрасного излучения зависят от номера колебательного уровня основного состояния. Например, излучательные переходы (1) с $v' = 1, 3, 10$ соответствуют излучениям с длинами волн $\lambda = 5.3$ мкм, 5.5 мкм, 6.2 мкм соответственно. Поэтому мы показываем вклады $v' = 1, v' = 1-3, v' = 1-10$ для 5.3 мкм на рис. 3.

Также на рис. 3 для события GLE69 рассчитанные интенсивности сравниваются с экспериментальными данными прибора SABER на космическом летательном аппарате (КЛА) TIMED, полученными во время GLE69 20 января 2005 г. КЛА TIMED был запущен 7 декабря 2001 г. [Mlynchak et al., 2003; Winick et al., 2004]. Прибор SABER представляет собой широкополосный спектрометр, который измеряет инфракрасное излучение в диапазонах от 1.27 мкм до 15 мкм, включая излучение NO на 5.3 мкм. Из рис. 3 видно, что рассчитанные объемные интенсивности излучения превышают экспериментальные значения примерно в два раза. Одной из возможных причин такого несоответствия результатов расчетов данным SABER может быть долготное расхождение между наблюдениями с нейтронных мониторов и со спутника TIMED. Другой причиной расхождения результатов расчета и экспериментальных данных SABER могут быть завышенные значения квантовых выходов $f_{56}(v')$ в процессе (56), измеренные Rawlins et al. [1989] и рассчитанные в [Kirillov and Aladjev, 1998]. Возможно, что квантовый выход $f_{56}(v' = 0)$ для невозбужденной молекулы NO($X^2\Pi, v' = 0$) значительно больше, чем значение 0.014, предполагаемое в настоящих расчетах.

Аналогично рассчитанные объемные интенсивности инфракрасной полосы 2.7 мкм для излучательного перехода (2) для этих же четырех

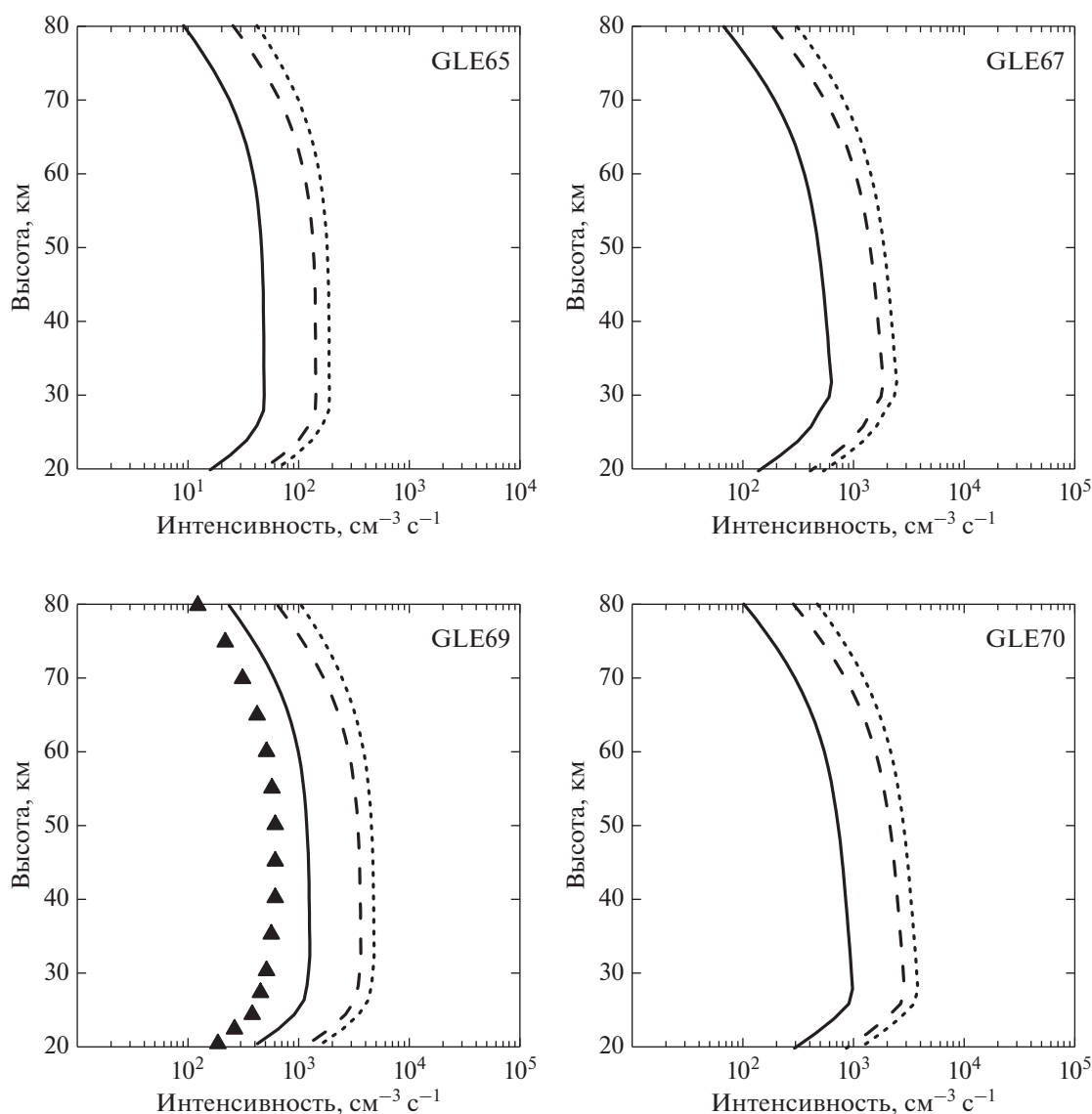


Рис. 3. Профили рассчитанных скоростей объемной интенсивности инфракрасного излучения 5.3 мкм NO для событий GLE65, GLE67, GLE69, GLE70. Вклады $\nu' = 1$, $\nu' = 1-3$, $\nu' = 1-10$ показаны как сплошные линии, длинные штрихи и короткие штрихи, соответственно. Экспериментальные данные с КЛА TIMED – треугольники.

случаев GLE приведены на рис. 4. Рассчитанные интенсивности инфракрасного излучения NO 2.7 мкм включают вклады колебательных уровней $\nu' = 2-20$ NO($X^2\Pi$). Однако, как и в случае с переходами (1), переходы (2) с $\nu' = 2, 4, 10$ соответствуют излучениям с различными длинами волн $\lambda = 2.7$ мкм, 2.8 мкм, 3.1 мкм соответственно. Поэтому мы показываем вклады $\nu' = 2$, $\nu' = 2-4$, $\nu' = 2-10$ для 2.7 мкм на рис. 4. Расчеты показали, что наибольшие значения интегральной интенсивности свечения полос 5.3 мкм и 2.7 мкм получаются для GLE69 и составляют 5.7 кР (килорэ-

лей) и 0.18 кР соответственно ($1 \text{ Р} = 10^6 \text{ фотон/см}^2 \text{ с}$).

Как показали результаты расчетов, интегральные интенсивности свечения полосы 5.3 мкм NO оказываются того же порядка, что и интенсивности свечения полос 337 нм N_2 и 1270 нм O_2 [Кириллов и др., 2023]. На рис. 5 представлены высотные профили свечения полосы 5.3 мкм NO, 337 нм N_2 и 1270 нм O_2 . В табл. 1 приведены значения интегральных интенсивностей инфракрасных полос 5.3 мкм и 2.7 мкм NO, а также рассмотренных двух эмиссий N_2 и O_2 для четырех случаев GLE.

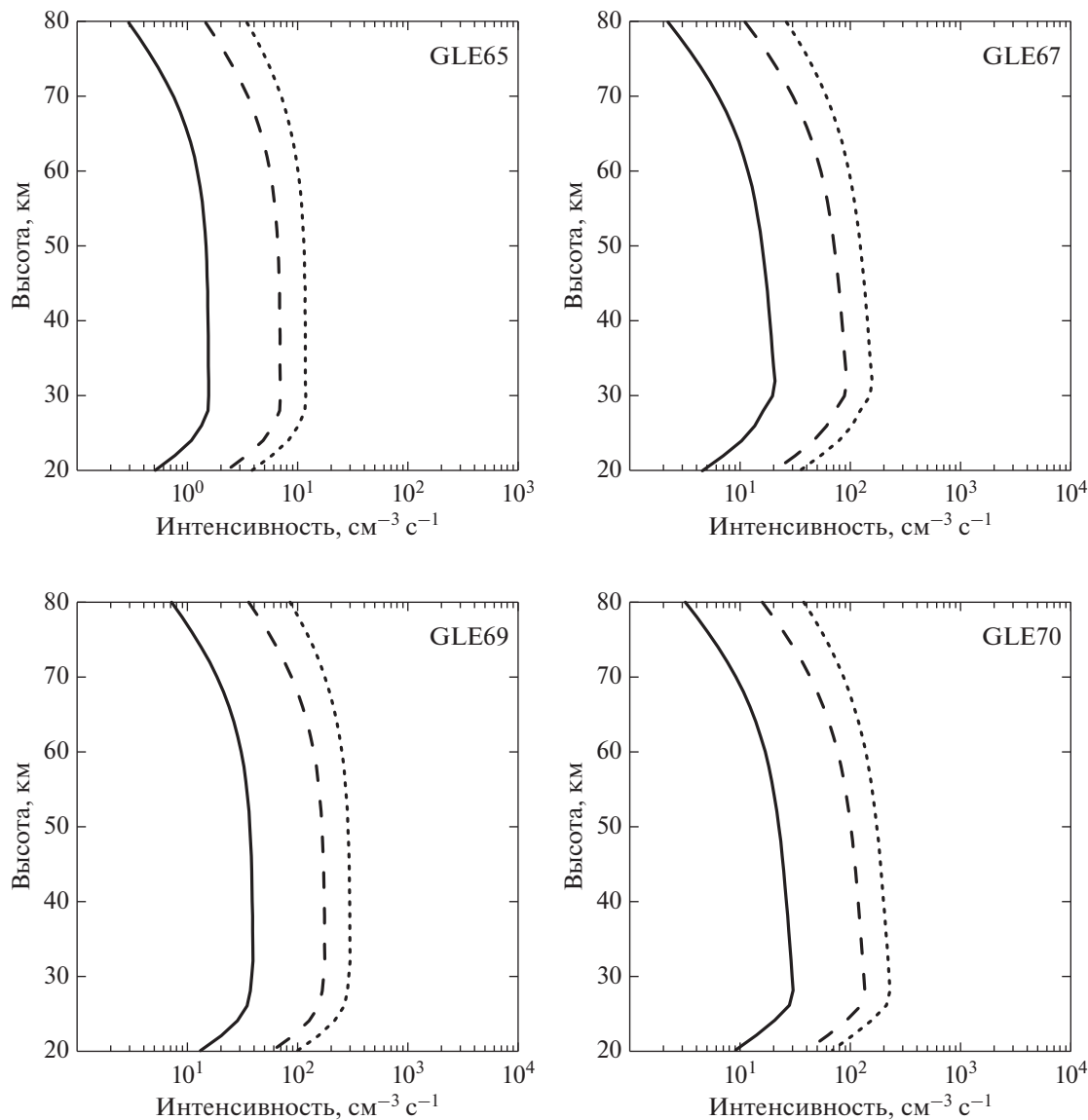


Рис. 4. Профили рассчитанных скоростей объемной интенсивности инфракрасного излучения 2.7 мкм NO для событий GLE65, GLE67, GLE69, GLE70. Вклады $\nu' = 2$, $\nu' = 2-4$, $\nu' = 2-10$ показаны как сплошные линии, длинные штрихи и короткие штрихи соответственно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании модели колебательной кинетики основного состояния молекулы окиси азота для средней атмосферы Земли проведен расчет

Таблица 1. Рассчитанные интегральные интенсивности полос NO, N₂, O₂ во время событий GLE65, GLE67, GLE69, GLE70

Эмиссии	GLE65	GLE67	GLE69	GLE70
5.3 мкм	220*	2400	5700	3700
2.7 мкм	7.0	74	180	120
337 нм	350	3900	8900	6700
1270 нм	73	760	1900	1200

Примечание. * – в Рэлях.

профилей интенсивностей свечения инфракрасных полос 5.3 мкм и 2.7 мкм NO в случае высыпания в атмосферу Земли высокоэнергичных протонов во время событий GLE65 (28 октября 2003 г.), GLE67 (02 ноября 2003 г.), GLE69 (20 января 2005 г.), GLE70 (13 декабря 2006 г.) 23-го солнечного цикла (1997–2009 гг.). Для рассмотренных GLE 23-го солнечного цикла поток частиц достигает атмосферы в полярных и средних широтах, а в отдельных событиях – и на экваторе. При этом в связи с геомагнитным обрезанием медленная компонента КЛ может достигнуть атмосферы только в полярных и приполярных областях.

При расчетах было учтено, что основной вклад в образование колебательно-возбужденной моле-

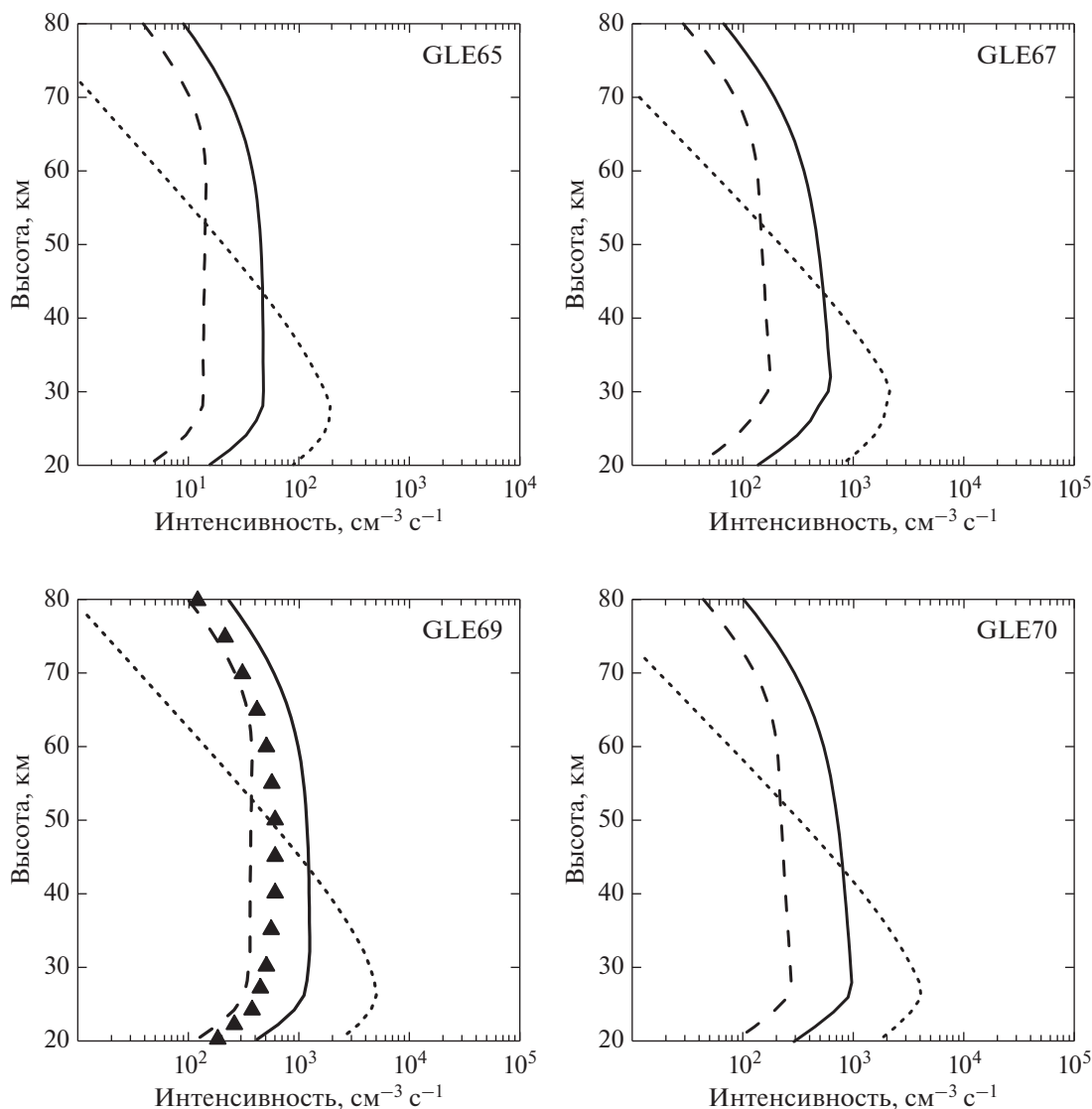


Рис. 5. Профили рассчитанных скоростей объемной интенсивности полос 5.3 мкм NO (сплошные линии), 1270 нм O₂ (длинные штрихи), 337 нм N₂ (короткие штрихи). Экспериментальные данные с КЛА TIMED — треугольники.

кулы NO(X²Π, $\nu' > 0$) вносит химическая реакция (56) атомарного азота N(²D) и молекулярного кислорода. Квантовые выходы $f_{56}(\nu')$ в процессе (56) учитывались согласно Kirillov and Aladjev [1998]. Расчеты показали, что наибольшие значения интегральной интенсивности свечения полос 5.3 мкм и 2.7 мкм получаются для GLE69 и составляют 5.7 кР и 0.18 кР соответственно. Для события GLE69 проведено сравнение рассчитанных интенсивностей полосы 5.3 мкм с экспериментальными данными прибора SABER на КЛА TIMED, полученными 20 января 2005 г. Сравнение показало, что расчетные объемные интенсивности излучения превышают экспериментальные значения примерно в два раза. Данное расхождение результатов расчета и экспериментальных данных можно рассматривать как удовлетвори-

тельное, поскольку расчет был основан на спектрах КЛ, зарегистрированных мировой сетью НМ, а измерения интенсивностей проводились с КЛА TIMED, у которого прибор SABER мог и не быть направлен строго в область интенсивного свечения полос окиси азота.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят профессора М. Лопез-Пуэртас (Prof. Lopez-Puertas M., Granada, Spain) за предоставление данных по свечению инфракрасной полосы 5.3 мкм, полученных 20 января 2005 г. на КЛА TIMED.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Гордиец Б.Ф. Колебательная релаксация ангармонических молекул N₂ и концентрация окиси азота в воз-

- мусенной термосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 17. № 5. С. 871–878. 1977.
- Гордиец Б.Ф., Марков М.Н. ИК-излучение и концентрация NO в существенно разогретой верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 23. № 3. С. 446–450. 1983.
- Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука. 462 с. 1975.
- Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Свечение молекулярного азота и молекулярного кислорода в средней атмосфере Земли во время выпадения высокоэнергичных протонов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 6. С. 769–776. 2021.
- Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Электронная кинетика молекулярного азота и молекулярного кислорода в средней атмосфере Земли в событиях GLE 23-го солнечного цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 1. С. 94–103. 2023.
- Кривоуцкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС. 382 с. 2009.
- Кривоуцкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических энергичных частиц на атмосферу Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 6. С. 723–754. 2012.
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Ващенко Э.В. Новая численная модель для исследования космических лучей в атмосфере Земли // Изв. РАН. Сер. физическая. Т. 79. № 5. С. 711–713. 2015.
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Модельный комплекс для исследования космических лучей RUSCOSMICS // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 4. С. 3–8. 2016.
- Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Германенко А.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. / Программный комплекс RUSCOSMICS как инструмент для оценки скорости ионизации вещества атмосферы Земли протонами космических лучей // Изв. РАН. Сер. физическая. Т. 83. № 5. С. 712–716. 2019.
- Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука. 415 с, 1984.
- Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Уч. пос. М.: Наука. 729 с. 1980.
- Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. Geant4 – a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. V. 506. Sect. A. P. 250–303. 2003.
- Bernstein R.B., Levine R.D. Role of energy in reactive molecular scattering: An information-theoretic approach // Adv. Atom. Mol. Phys. V. 11. P. 215–297. 1976.
- Bouziane A., Ferdi M.A., Djebli M. Nitric oxide vibrationally excited levels and controlling processes in the Earth's upper atmosphere during the daytime // Adv. Space Res. V. 69. № 2. P. 905–914. 2022.
- Burkholder J.B., Sander S.P., Abbatt J., Barker J.R., Huie R.E., Kolb C.E., Kurylo M.J., Orkin V.L., Wilmouth D.M., Wine P.H. Chemical kinetics and photochemical data for use in atmospheric studies, Evaluation No.18, Jet Propulsion Laboratory Publication 15-10, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena. 1392 p. 2015.
- Caledonia G.E., Kennealy J.P. NO infrared radiation in the upper atmosphere // Planet. Space Sci. V. 30. № 10. P. 1043–1056. 1982.
- Campbell L., Brunger M.J. Electron impact contribution to infrared NO emissions in auroral conditions // Geophys. Res. Lett. V.34. № 22. L22102. 2007.
- Cartwright D.C., Brunger M.J., Campbell L., Mojarrabi B., Teubner P.J.O. Nitric oxide excited under auroral conditions: Excited state densities and band emissions // J. Geophys. Res. – Space. V. 105. № A9. P. 20857–20867. 2000.
- Clark I.D., Wayne R.P. Kinetics of the reaction between atomic nitrogen and molecular oxygen in the ground ($^3\Sigma_g^-$) and first excited ($^1\Delta_g$) states // Proc. Roy. Soc. Lond. A. V. 316. № 1527. P. 539–550. 1970.
- Funke B., Lopez-Puertas M., Garcia-Comas M., Kaufmann M., Höpfner M., Stiller G.P. GRANADA: A Generic Radiative transfer And non-LTE population algorithm // J. Quant. Spec. Rad. Tran. V.113. № 14. P. 1771–1817. 2012.
- Gordiets B.F., Kulikov Yu.N., Markov M.N., Marov M.Ya. Numerical modelling of the thermospheric heat budget // J. Geophys. Res. – Space. V. 87. № A6. P. 4504–4514. 1982.
- Gordillo-Vazquez F.J. Air plasma kinetics under the influence of sprites // J. Phys. D: Appl. Phys. V. 41. № 23. 234016. 2008.
- Green B.D., Caledonia G.E., Murphy R.E., Robert F.H. The vibrational relaxation of NO($v = 1-7$) by O₂ // J. Chem. Phys. V. 76. № 5. P. 2441–2448. 1982.
- Hancock G., Morrison M., Saunders M. Vibrational relaxation of NO($v = 1-16$) in collisions with O₂ studied by time resolved Fourier transform infrared emission // Chem. Phys. Lett. V. 425. № 4–6. P. 216–220. 2006.
- Kirillov A.S., Aladjev G.A. Estimation of atomic oxygen concentrations from measured intensities of infrared nitric oxide radiation // Ann. Geophys. V. 16. № 7. P. 847–852. 1998.
- Kirillov A.S., Belakhovsky V.B., Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B. Vibrational kinetics of NO and N₂ in the Earth's middle atmosphere during GLE69 on January 20, 2005 // J. Geophys. Res. – Atmosphere. V. 128. № 17. 2023JD038600. 2023.
- Kockarts G. Nitric oxide cooling in the terrestrial thermosphere // Geophys. Res. Lett. V. 7. № 2. P. 137–140. 1980.
- Lopez-Puertas M., Taylor F.W. Non-LTE radiative transfer in the atmosphere. Singapore: World Scientific Publishers, 506 p., 2001.
- Mlynczak M., Martin-Torres F.J., Russell J. et al. The natural thermostat of nitric oxide emission at 5.3 μm in the thermosphere observed during the solar storms of April 2002 // Geophys. Res. Lett. V. 30. № 21. 2100. 2003.
- Nesbet R.K. Surprisal theory, in Theoretical chemistry. Theory of scattering, 6B. Ed. D. Henderson. New York: Academic Press. P. 79–126. 1981.
- Porter H.S., Jackman C.H., Green A.E.S. Efficiencies for production of atomic nitrogen and oxygen by relativistic proton impact in air // J. Chem. Phys. V. 65. № 1. P. 154–167. 1976.
- Rawlins W.T., Caledonia G.E., Gibson J.J., Stair A.T., Jr. Infrared emission from NO($\Delta v = 1$) in an aurora: Spectral analysis and kinetic interpretation of HIRIS measurements // J. Geophys. Res. – Space. V. 86. № A3. P. 1313–1324. 1981.

- Rawlins W.T., Fraser M.E., Miller S.M. Rovibrational excitation of nitric oxide in the reaction of O₂ with metastable atomic nitrogen // J. Phys. Chem. V. 93. № 3. P. 1097–1107. 1989.
- Rawlins W.T., Person J.C., Fraser M.E., Miller S.M., Blumberg W.A.M. The dipole moment and infrared transition strengths of nitric oxide // J. Chem. Phys. V. 109. № 9. P. 3409–3417. 1998.
- Sentman D.D., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Morrill J.S. Plasma chemistry of sprite streamers // J. Geophys. Res. – Atmosphere. V. 113. № 11. D11112. 2008.
- Sharma R.D., Dothe H., von Esse F., Kharchenko V.A., Sun Y., Dalgarno A. Production of vibrationally and rotationally excited NO in the night time terrestrial thermosphere // J. Geophys. Res. – Space. V. 101. № A9. P. 19707–19713. 1996.
- Simpson J.A. Introduction to the galactic cosmic radiation / Composition and origin of cosmic rays. Ed. Shapiro M.M. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences). V. 107. P.1–24. Dordrecht: Springer. 1983.
- Turunen E., Verronen P.T., Seppälä A., Rodger C.J., Clilverd M.A., Tamminen J., Enell C.-F., Ulich T. Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 71. № 10–11. P. 1176–1189. 2009.
- Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Features of relativistic solar proton spectra derived from ground level enhancement events (GLE) modeling // Astrophys. Space Sci. Trans. V. 7. № 4. P. 459–463. 2011.
- Venkataramani K., Yonker J.D., Bailey S.M. Contribution of chemical processes to infrared emissions from nitric oxide in the thermosphere // J. Geophys. Res. – Space. V. 121. № 3. P. 2450–2461. 2016.
- Winick J.R., Mlynczak M.G., Wintersteiner P.P., Martin-Torres F.-J., Picard R.H., Paxton L., Lopez-Puertas M., Russell J.M., Christensen A., Gordley L. Thermospheric infrared radiance response to the April 2002 geomagnetic storm from SABER infrared and GUVI ultraviolet limb data // Proceedings SPIE. V. 5235. P. 250–263. 2004.