

УДК 533.951

СВЕЧЕНИЕ ПОЛОС МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ ВЫСЫПАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2020 г. А. С. Кириллов¹, *, В. Б. Белаховский¹, **¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

*e-mail: kirillov@pgia.ru

**e-mail: belakhov@mail.ru

Поступила в редакцию 22.04.2019 г.

После доработки 18.07.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

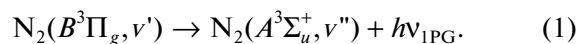
Проведен расчет профилей интенсивностей свечения полос первой и второй положительных систем молекулярного азота в случае высыпания в атмосферу высокоэнергичных электронов с энергиями от 10 кэВ до 10 МэВ. Расчеты показали, что с ростом энергии вторгающихся в атмосферу электронов возрастает вклад процессов гашения состояния $B^3\Pi_g N_2$ при молекулярных столкновениях. Это приводит к уменьшению отношения интегральных интенсивностей полос первой и второй положительных систем с ростом энергии высыпающихся в атмосферу электронов.

DOI: 10.31857/S0016794020010071

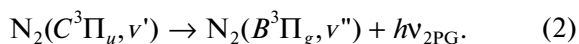
1. ВВЕДЕНИЕ

Молекулярный азот является основной составляющей атмосферы Земли. Неупругое взаимодействие высыпающихся в атмосферу высокоэнергичных частиц с молекулами азота приводит к возбуждению различных электронно-возбужденных состояний N_2 . В дальнейшем в возбужденных молекулах происходят спонтанные переходы на более низкие по энергии состояния, что служит причиной свечения молекулярного азота в различных диапазонах спектра.

Первая положительная система полос N_2 (1PG) представляет одну из главных в формировании спектров полярных сияний в красном и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн 600–1500 нм [Vallance Jones, 1974]. Свечение данной системы полос происходит при спонтанных переходах:



Аналогично, вторая положительная система полос N_2 (2PG) участвует в формировании спектров полярных сияний в фиолетовом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн 300–400 нм [Vallance Jones, 1974]. Свечение 2PG системы полос происходит при спонтанных переходах:



Как показали результаты измерений оптических спектров полярных сияний, полученных во время запусков ракет на острове Хейса в 1972–1973 гг. [Кириллов и др., 1987] и на полигоне Форт

Черчилль в 1974 г. [Rees et al., 1977; Sharp et al., 1979], интенсивности свечения 1PG и 2PG полос сравнимы с интенсивностями свечения наиболее ярких эмиссий: полосы 391.4 нм первой отрицательной системы иона N_2^+ (1NG) и зеленой линии 557.7 нм атомарного кислорода в авроральной ионосфере.

Спектры полос первой и второй положительных систем наблюдаются также во время свечения спрайтов в средней атмосфере Земли [Kamatae et al., 2007; Heavner et al., 2010], в условиях лабораторного разряда [Simek, 2014; Hoder et al., 2015]. Принципиальное отличие спектров ускоренных электронов во время разрядов между грозовыми облаками и ионосферой (спрайтов) и в условиях лабораторного разряда от авроральных спектров вторичных электронов, а также более высокие концентрации молекул в средней атмосфере и в лабораторных условиях по сравнению с концентрациями в термосфере Земли, приводит к тому, что спектры N_2 в разрядах значительно отличаются от спектров полярных сияний.

Заметное влияние на состояние верхней и средней атмосферы оказывают высокоэнергичные заряженные частицы [Mironova et al., 2015]. Одним из видов таких заряженных частиц являются релятивистские электроны (с энергией порядка 1 МэВ и выше). Основным источником релятивистских электронов является высыпание из внешнего радиационного пояса Земли, происходящее во время геомагнитных возмущений вследствие взаимодействия электронов с низко-

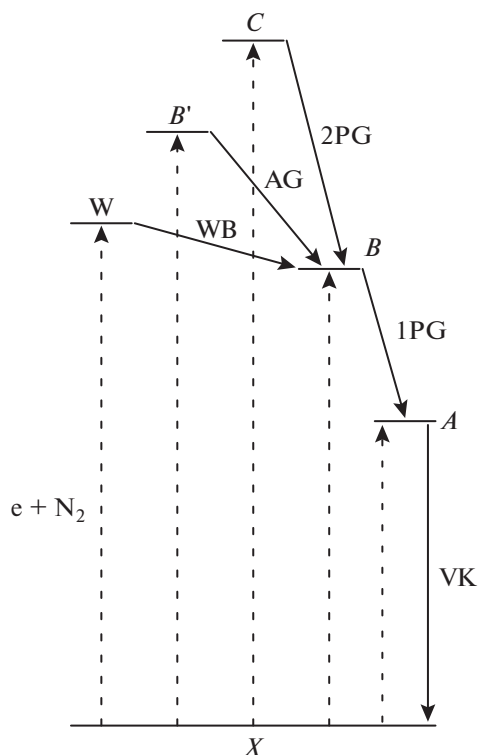


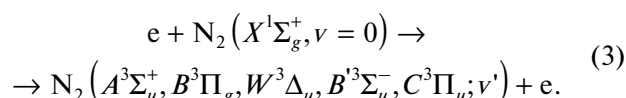
Рис. 1. Схема излучательных переходов в молекуле N_2 .

частотными электромагнитными волнами. Высыпания релятивистских электронов (ВРЭ) наблюдаются в основном на авроральных и субавроральных широтах. Выделяют микровсплески ВРЭ (менее 1 с) и продолжительные высыпания (от минут до часов). ВРЭ исследуются по данным низковысотных спутников (NOAA POES); по данным баллонов регистрируется тормозное рентгеновское излучение, производимое ВРЭ [Базилевская и др., 2017а]. ВРЭ вследствие ионизации, диссоциации приводят к образованию нечетного азота (NO_x) и водорода (HO_x), которые способствуют уменьшению содержания озона в средней атмосфере [Turunen et al., 2009; Криволюцкий и Репнев, 2009, 2012].

В данной работе мы исследуем свечение полос первой и второй положительных систем молекулярного азота в средней и верхней атмосфере Земли во время высыпания высокоэнергичных электронов (ВВЭ). При расчетах будет рассмотрена кинетика 5 триплетных электронно-возбужденных состояний $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$, при этом будут учтены как спонтанные излучательные переходы между состояниями, так и перенос энергии электронного возбуждения при неупругих молекулярных столкновениях.

2. ПРОЦЕССЫ ГАШЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ

Кинетическая модель электронно-возбужденного молекулярного азота для высот нижней термосферы и средней атмосферы во время ВВЭ представлена в работе [Kirillov and Belakhovsky, 2019]. В настоящей работе при расчетах рассмотрены процессы возбуждения пяти триплетных состояний N_2 высокоэнергичными электронами:



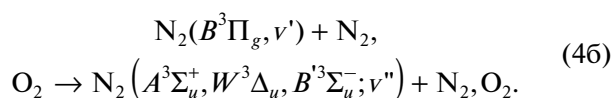
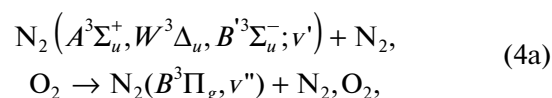
При этом учтены следующие колебательные уровни указанных пяти состояний: $A^3\Sigma_u^+$ ($v' = 0-29$), $B^3\Pi_g$ ($v' = 0-18$), $W^3\Delta_u$ ($v' = 0-21$), $B'^3\Sigma_u^-$ ($v' = 0-15$), $C^3\Pi_u$ ($v' = 0-4$). Таким образом, для состояний $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $C^3\Pi_u$ учтено более 99% возбуждения в результате процессов (3), а для состояния $B'^3\Sigma_u^-$ – более 93% [Gilmore et al., 1992].

Кроме спонтанных переходов (1) и (2) с излучением 1PG и 2PG полос, необходимо еще учесть излучение полос Ву-Бенеша (WB) (переход $W^3\Delta_u, v' \leftrightarrow B^3\Pi_g, v''$) и полос послесвечения (AG) (переход $B'^3\Sigma_u^-, v' \leftrightarrow B^3\Pi_g, v''$), а также спонтанные переходы $A^3\Sigma_u^+, v' \rightarrow X^1\Sigma_g^+, v''$ (полосы Вегарда-Каплана) (VK) [Gilmore et al., 1992]. На рисунке 1 схематично показаны упомянутые излучательные переходы, учитываемые в настоящей работе.

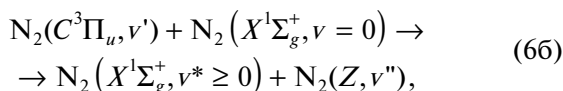
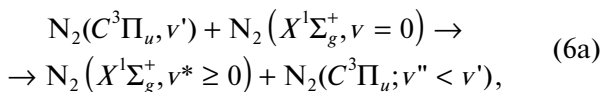
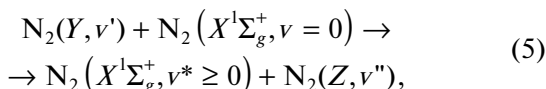
На высотах средней атмосферы Земли из-за высоких концентраций молекул N_2 и O_2 столкновительные времена жизни триплетных состояний молекулярного азота становятся сравнимыми или даже меньше излучательных времен жизни. Поэтому при расчете скоростей излучения различных полос молекулярного азота необходимо учитывать неупругие взаимодействия электронно-возбужденных молекул с газами N_2 и O_2 .

В данной работе учитываются следующие неупругие взаимодействия:

1. Внутримолекулярные процессы переноса энергии возбуждения

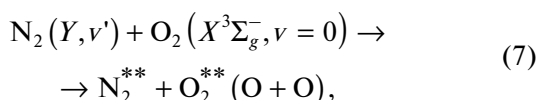


2. Межмолекулярные процессы переноса энергии возбуждения



где Y и Z обозначают любое триплетное состояние из $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$.

3. Гашение электронно-возбужденного состояния с переносом энергии возбуждения на молекулу O_2 с возможной диссоциацией молекулы кислорода



где Y обозначает любое из пяти рассматриваемых триплетных состояний.

Расчет констант гашения триплетных состояний при неупругих взаимодействиях с газами N_2 и O_2 был представлен в [Kirillov, 2010, 2011, 2016, 2019]. В настоящей работе мы учитываем результаты расчетов в указанных работах, а для процесса (7) берем константы, приведенные в [Kirillov and Belakhovsky, 2019].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ ПОЛОС 1PG И 2PG СИСТЕМ

При расчете интенсивностей свечения полос 1PG и 2PG полос воспользуемся решением систем уравнений [Kirillov and Belakhovsky, 2019]:

$$\begin{aligned} Q^Y q_{0v'}^{XY} + \sum_{v''} A_{v''v'}^{BY} N_{v''}^B + \sum_{v''} k_{v''v'}^{*BY} N_{v''}^B ([N_2] + [O_2]) + \\ + \sum_{Z, v''} k_{v''v'}^{**ZY} N_{v''}^Z [N_2] + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**BY} N_{v''}^B [N_2] + \\ + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**CY} N_{v''}^C [N_2] = \left\{ \sum_{v''} A_{v''v'}^{YB} + A_{v'}^{*Y} + \right. \\ + \sum_{v''} k_{v''v'}^{*YB} ([N_2] + [O_2]) + \sum_{Z, v''} k_{v''v'}^{**YZ} [N_2] + \\ \left. + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**YB} [N_2] + k_{v'}^{**Y} [O_2] \right\} N_{v'}^Y, \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} Q^B q_{0v'}^{XB} + \sum_{Y, v''} A_{v''v'}^{YB} N_{v''}^Y + \sum_{v''} A_{v''v'}^{CB} N_{v''}^C + \\ + \sum_{Y, v''} k_{v''v'}^{*YB} N_{v''}^Y ([N_2] + [O_2]) + \sum_{Y, v''} k_{v''v'}^{**YB} N_{v''}^Y [N_2] + \\ + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**BB} N_{v''}^B [N_2] + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**CB} N_{v''}^C [N_2] = \\ = \left\{ \sum_{Y, v''} A_{v''v'}^{BY} + \sum_{Y, v''} k_{v''v'}^{*BY} ([N_2] + [O_2]) + \right. \\ \left. + \sum_{Y, v''} k_{v''v'}^{**BY} [N_2] + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**BB} [N_2] + k_{v'}^{**B} [O_2] \right\} N_{v'}^B, \end{aligned} \quad (8b)$$

$$\begin{aligned} Q^C q_{0v'}^{XC} + \sum_{v'' > v'} k_{v''v'}^{**CC} N_{v''}^C [N_2] = \\ = \left\{ \sum_{v''} A_{v''v'}^{CB} + \sum_{Y, v''} k_{v''v'}^{**CY} [N_2] + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**CB} [N_2] + \right. \\ \left. + \sum_{v'' < v'} k_{v''v'}^{**CC} [N_2] + k_{v'}^{**C} [O_2] \right\} N_{v'}^C, \end{aligned} \quad (8b)$$

где Y и Z обозначают $A^3\Sigma_u^+$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$; Q^Y , Q^B , Q^C – скорости возбуждения Y , $B^3\Pi_g$, $C^3\Pi_u$ состояний, соответственно; A – коэффициенты Эйнштейна для всех упомянутых спонтанных переходов; k^* и k^{**} подразумевают константы скоростей внутримолекулярных и межмолекулярных процессов переноса энергии, соответственно; $A_{v'}^{*Y}$ равна вероятности излучения для переходов с излучением полос Вегарда-Каплана в случае $A^3\Sigma_u^+$ состояния и $A_{v'}^{*Y} = 0$ для $W^3\Delta_u$ и $B'^3\Sigma_u^-$ состояний.

Для расчета скоростей возбуждения электронно-возбужденных состояний молекулярного азота во время ВВЭ воспользуемся методом деградационных спектров электронов в смеси газов N_2 и O_2 [Коновалов и Сон, 1987; Коновалов, 1993]. Скорости ионообразования в атмосфере во время ВВЭ с потоком 100 эл/см² с стер и энергиями 4 кэВ–10 МэВ были представлены в работе [Turunen et al., 2009].

На рисунке 2 показаны профили скоростей ионообразования во время ВВЭ согласно [Turunen et al., 2009] для моноэнергетического пучка электронов с энергиями 10, 100 кэВ и 1, 10 МэВ при единичном потоке 1 эл/см² с стер. Также на данном рисунке представлены рассчитанные согласно (8б) и (8в) профили объемных скоростей свечения полос 749, 669 нм (1PG) и 337 нм (2PG). Свечение полос 749 и 669 нм связано со спонтанными излучательными переходами (1) $v' = 4 \rightarrow v'' = 2$ и $v' = 5 \rightarrow v'' = 2$, соответственно; а свечение полосы 337 нм связано с переходом (2) $v' = 0 \rightarrow v'' = 0$.

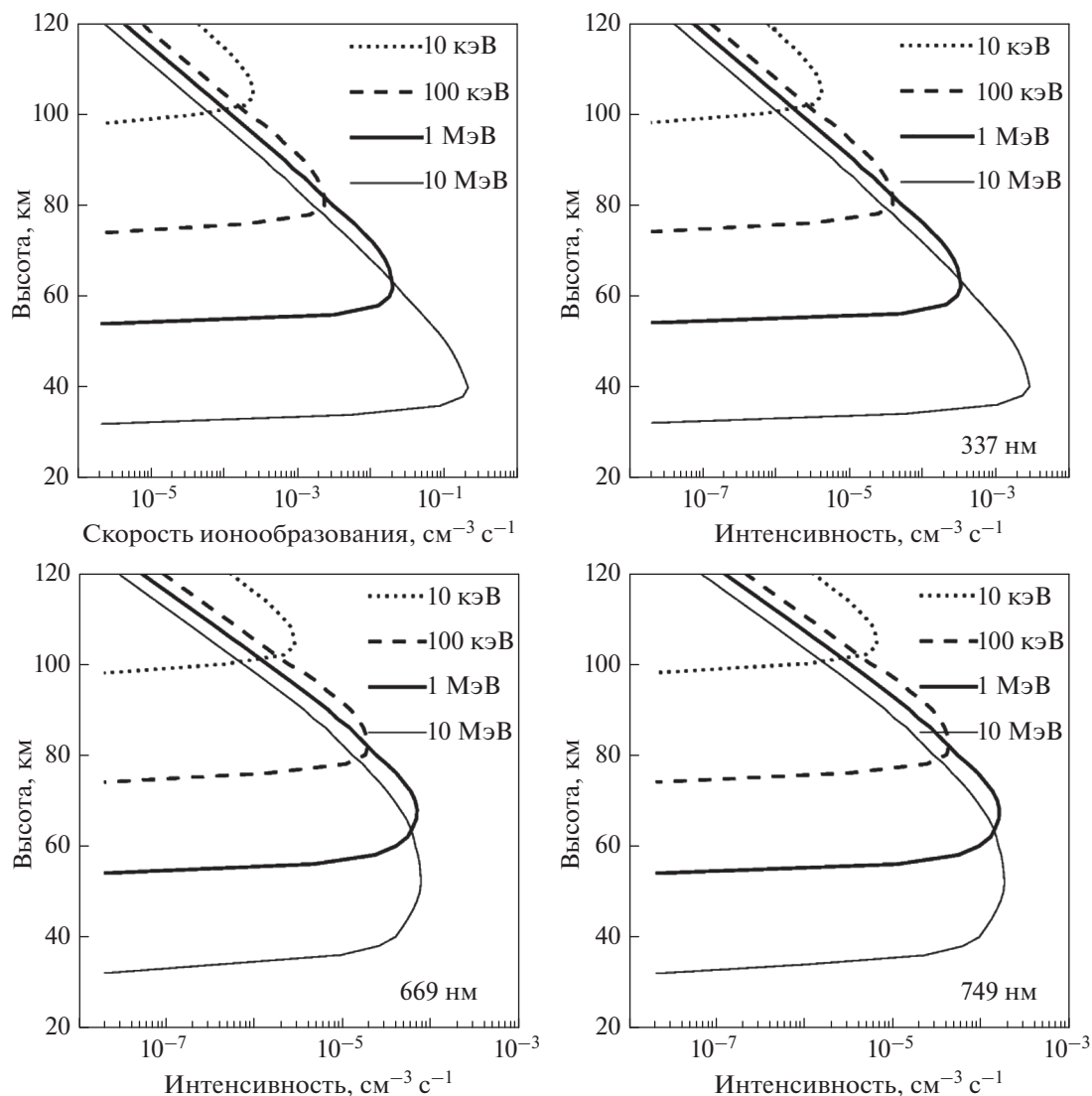


Рис. 2. Высотные профили скоростей ионообразования [Turunen et al., 2009] и рассчитанных интенсивностей свечения полос 337, 669, 749 нм для энергий высыпающих электронов 10 кэВ, 100 кэВ, 1 МэВ, 10 МэВ.

Как видно из представленного рисунка, профили свечения полосы 337 нм (2PG) практически повторяют профили скорости ионообразования, однако интенсивности свечения полос 749, 669 нм (1PG) значительно понижаются с уменьшением высоты, что связано с возросшим гашением состояния $V^3\Pi_g$ при неупругих молекулярных столкновениях на меньших высотах атмосферы Земли.

На рисунке 3 показаны зависимости рассчитанных интегральных интенсивностей (I) всех трех полос молекулярного азота от энергии высыпающих электронов с энергиями 10^1 – 10^4 кэВ при экспоненциальной зависимости спектра электронов от энергии $f(E) = A \exp(-E/E_0)$. Кроме того, проведен расчет отношения интегральных интенсивностей I_{749}/I_{337} и I_{669}/I_{337} для случая экс-

поненциального распределения электронов по энергии $f(E) = A \exp(-E/E_0)$. Результаты расчетов приведены на рисунке 4. Здесь также приведены отношения интенсивностей I_{749}/I_{337} и I_{669}/I_{337} , полученные с помощью результатов измерений оптических спектров полярных сияний во время запусков ракет на острове Хейса в 1972–1973 гг. [Кириллов и др., 1987]. Как видно из приведенного рисунка, наблюдается хорошее согласие результатов расчета для энергий авроральных электронов с экспериментальными данными [Кириллов и др., 1987].

В качестве примера рассмотрим один из результатов многолетних измерений ВРЭ, проводимых ФИАН в Мурманской области ($67^\circ 33' N$, $33^\circ 20' E$) [Базилевская и др., 20176]. Каталог данных измерений приведен в работе [Makhmutov

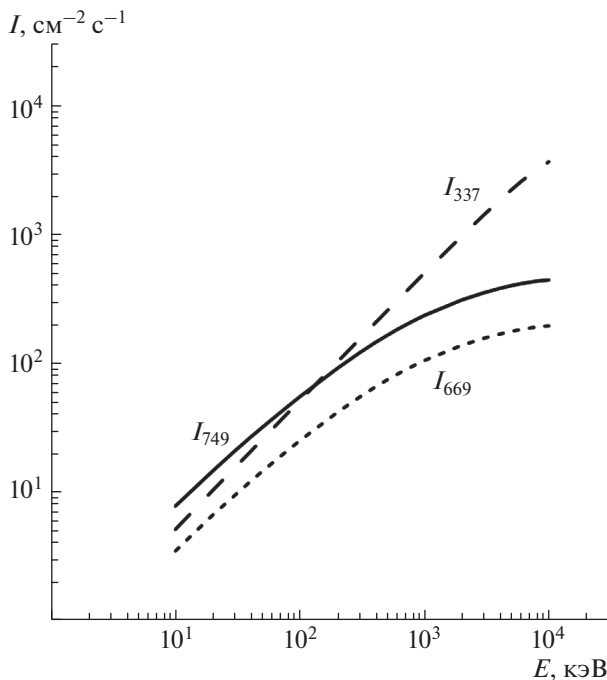


Рис. 3. Зависимость интегральных интенсивностей свечения полос 749, 669 и 337 нм от энергии высокоэнергичных электронов в случае экспоненциального распределения электронов по энергии $f(E) = A \exp(-E/E_0)$.

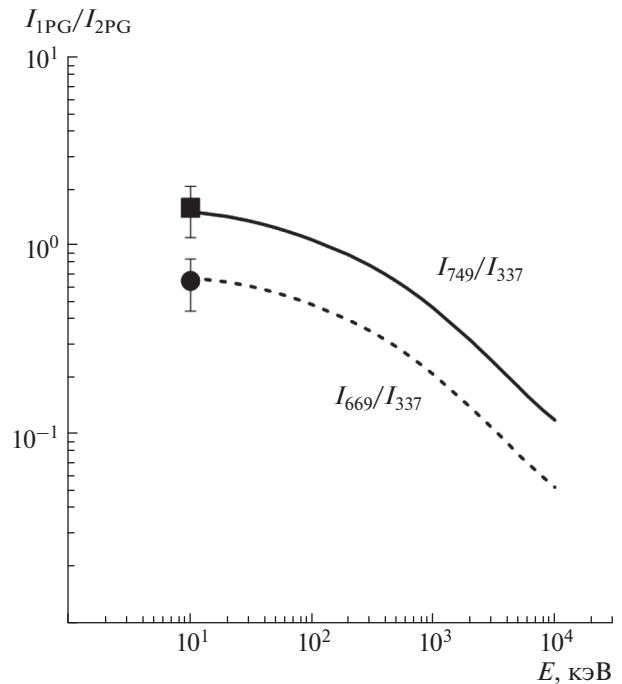


Рис. 4. Отношения интегральных интенсивностей I_{749}/I_{337} и I_{669}/I_{337} в случае экспоненциального распределения электронов по энергии $f(E) = A \exp(-E/E_0)$. Квадраты и кружки – отношения согласно экспериментальным данным [Кириллов и др., 1987] во время полярных сияний.

et al., 2016]. Согласно измерениям [Makhmutov et al., 2016] одним из немногочисленных случаев интенсивных ВРЭ приходится на 19.09.2003 г., когда спектр распределения электронов по энергии описывался функцией $f(E) = A \exp(-E/E_0)$, где $A = 3.4$ эл/см² с кэВ и $E_0 = 1990$ кэВ. Согласно результатам расчетов, представленным на рис. 3, получаются интенсивности свечения полос $I_{749} = 13$ Р, $I_{669} = 6$ Р, $I_{337} = 41$ Р (1 Рэлей = 10⁶ фотон/см² с). Сравнение рассчитанных интенсивностей свечения полос первой и второй положительных систем молекулярного азота (1PG и 2PG) с результатами авроральных измерений [Кириллов и др., 1987] указывает на то, что при вторжении авроральных частиц наблюдались свечения N₂ на два и более порядка интенсивнее, чем при ВРЭ 19.09.2003 г.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании модели электронной кинетики триплетных состояний молекулярного азота для верхней и средней атмосферы, представленной в [Kirillov and Belakhovsky, 2019], проведен расчет профилей интенсивностей свечения полос первой и второй положительных систем (1PG и 2PG N₂) в случае высыпания в атмосферу Земли высокоэнергичных электронов с энергиями от 10 кэВ (авроральные электроны) до 10 МэВ (релятивистские электроны). При расчете были использованы профили скоростей ионообразования во время ВВЭ, рассчитанные в [Turunen et al., 2009] для моноэнергетических пучков электронов.

Расчеты показали, что с ростом энергии высыпающихся в атмосферу высокоэнергичных электронов возрастает вклад процессов гашения состояния V³Π_g при молекулярных столкновениях. Это приводит к уменьшению отношения интегральных интенсивностей I_{749}/I_{337} и I_{669}/I_{337} с ростом энергии электронов. Данный результат указывает на то, что при регистрации данных соотношений интенсивностей полос первой и второй положительных систем молекулярного азота при вторжении релятивистских электронов в среднюю атмосферу Земли можно оценить среднюю энергию высыпающихся частиц.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект № 18-77-10018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Квашин А.Н., Крайнев М.Б., Махмутов В.С., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Стожков Ю.И., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б.* Высыпания высокоэнергичных магнитосферных электронов и сопутствующие характеристики солнечного ветра // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 57. № 2. С. 164–172. 2017а.
- *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Крайнев М.Б., Махмутов В.С., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Стожков Ю.И., Филиппов М.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б.* Высыпания магнитосферных электронов в атмосферу Земли и электроны внешнего радиационного пояса // *Изв. РАН Сер. физ.* Т. 81. № 2. С. 235–238. 2017б.
- *Кириллов А.С., Ягодкина О.И., Иванов В.Е., Воробьев В.Г.* Механизмы возбуждения 1PG системы N_2 в полярных сияниях // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 27. № 3. С. 419–427. 1987.
- *Коновалов В.П.* Деградационный спектр электронов в азоте, кислороде и воздухе // *Журн. технической физики*. Т. 63. № 3. С. 23–33. 1993.
- *Коновалов В.П., Сон Э.Е.* Деградационные спектры электронов в газах // *Химия плазмы*. Т. 14. С. 194–227. 1987.
- *Кривоулицкий А.А., Реннев А.И.* Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС. 382 с. 2009.
- *Кривоулицкий А.А., Реннев А.И.* Воздействие космических энергичных частиц на атмосферу Земли // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 52. № 6. С. 723–754. 2012.
- *Gilmore F.R., Laher R.R., Espy P.J.* Franck-Condon factors, g -centroids, electronic transition moments, and Einstein coefficients for many nitrogen and oxygen band systems // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. V. 21. № 5. P. 1005–1107. 1992.
- *Heavner M.J., Morrill J.S., Siefring C., Sentman D.D., Moudry D.R., Wescott E.M., Bucsele E.J.* Near-ultraviolet and blue spectral observations of sprites in the 320–460 nm region: N_2 (2PG) emissions // *J. Geophys. Res.* V.115. A00E44. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014858>
- *Hoder T., Bonaventura Z., Bourdon A., Simek M.* Subnanosecond delays of light emitted by streamer in atmospheric pressure air: Analysis of $N_2(C^3\Pi_u)$ and $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ emissions and fundamental streamer structure // *J. Appl. Phys.* V. 117. 073302. 2015.
- *Kanmae T., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G.* Altitude resolved sprite spectra with 3 ms temporal resolution // *Geophys. Res. Lett.* V. 34. L07810. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2006GL028608>
- *Kirillov A.S.* Electronic kinetics of molecular nitrogen and molecular oxygen in high-latitude lower thermosphere and mesosphere // *Ann. Geophys.* V. 28. № 1. P. 181–192. 2010.
- *Kirillov A.S.* Excitation and quenching of ultraviolet nitrogen bands in the mixture of N_2 and O_2 molecules // *J. Quan. Spec. Rad. Tran.* V. 112. № 13. P. 2164–2174. 2011.
- *Kirillov A.S.* Intermolecular electron energy transfer processes in the collisions of $N_2(A^3\Sigma_u^+, v = 0-10)$ with CO and N_2 molecules // *Chem. Phys. Lett.* V. 643. P. 131–136. 2016.
- *Kirillov A.S.* Intermolecular electron energy transfer processes in the quenching of $N_2(C^3\Pi_u, v = 0-4)$ by collisions with N_2 molecules // *Chem. Phys. Lett.* V. 715. P. 263–267. 2019.
- *Kirillov A.S., Belakhovsky V.B.* The kinetics of N_2 triplet electronic states in the upper and middle atmosphere during relativistic electron precipitations // *Geophys. Res. Lett.* V. 46. P. 7734–7743. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2019GL083135>
- *Makhmutov V., Bazilevskaya G., Stozhkov Y., Svirzhevskaya A., Svirzhevsky N.* Catalogue of electron precipitation events as observed in the long-duration cosmic ray balloon experiment // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 149. P. 258–276. 2016.
- *Mironova I., Aplin K., Arnold F., Bazilevskaya G., Harrison R., Krivolutsky A., Nicoll K., Rozanov E., Turunen E., Usoskin I.* Energetic particle influence on the Earth's atmosphere // *Space Sci Rev.* V. 194. № 1–4. P. 1–96. 2015.
- *Rees M.H., Stewart A.I., Sharp W.E., Hays P.B., Hoffmann R.A., Brace L.H., Doering J.P., Peterson W.K.* Coordinated rocket and satellite measurements of an auroral event. 1. Satellite observations and analysis // *J. Geophys. Res.* V. 82. № 16. P. 2250–2257. 1977.
- *Sharp W.E., Rees M.H., Stewart A.I.* Coordinated rocket and satellite measurements of an auroral event. 2. The rocket observations and analysis // *J. Geophys. Res.* V. 84. № A5. P. 1977–1985. 1979.
- *Simek M.* Optical diagnostics of streamer discharges in atmospheric gases // *J. Phys. D: Appl. Phys.* V. 47. article id. 463001. 2014.
- *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.
- *Vallance J.A.* *Aurora*, *Geophys. Astrophys. Monogr.*, D. Reidel, Dordrecht, Netherlands. 301 p. 1974.