

Исследование кинетических процессов с участием электронно-возбужденных молекул N_2 и ионов N_2^+ на высотах средней атмосферы Земли и в разрядной камере

Кириллов А.С.¹, Тарасенко В.Ф.^{1,2}, Виноградов Н.П.^{1,2}, Кириллов В.А.¹

¹ Полярный геофизический институт, Апатиты

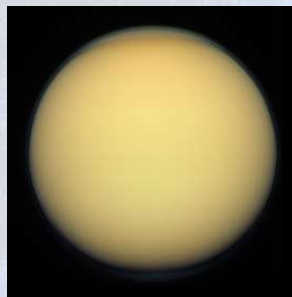
² Институт сильноточной электроники, Томск

Молекулярный азот в атмосферах планет Солнечной системы



Земля

Смесь N_2 и O_2



Титан



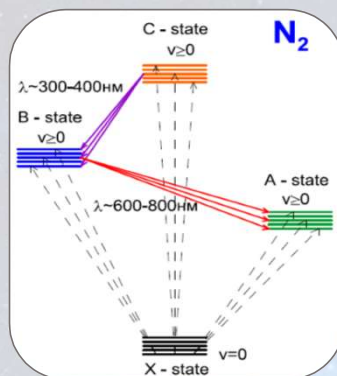
Тритон



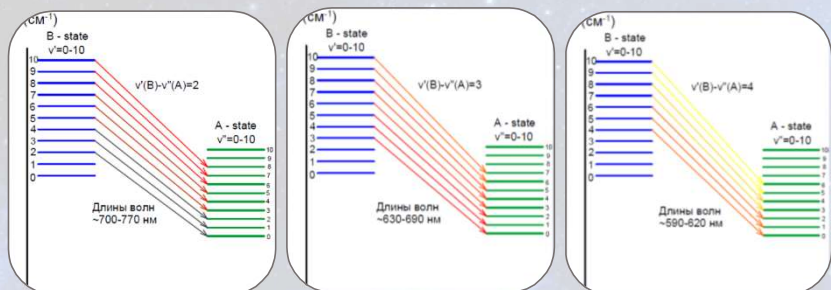
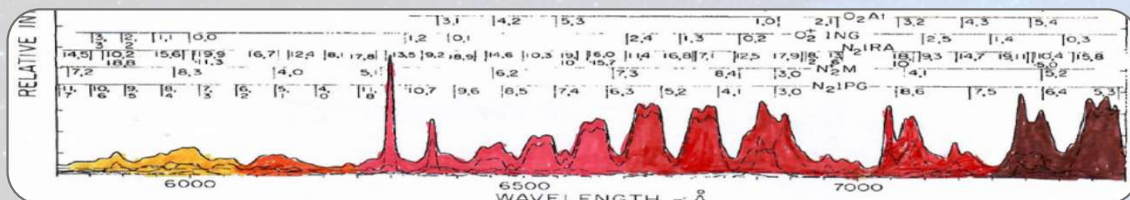
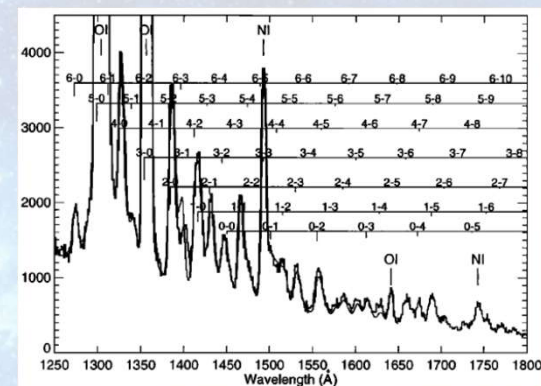
Плутон

Смесь N_2 , C_xH_y , CO

Полосы N₂ в верхней атмосфере Земли

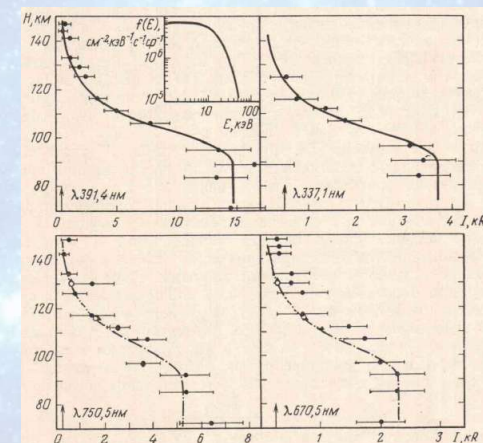


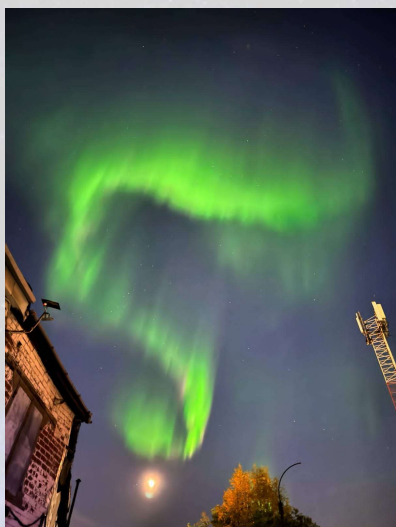
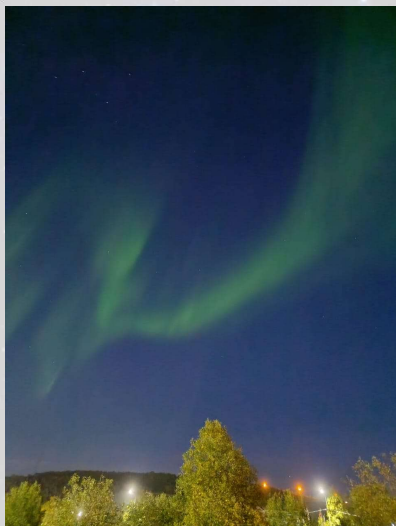
**УФ спектры N₂ в
дневном свечении
(Discovery, STS-39)
[Budzien et al., 1994, J.
Geophys. Res. - A, v.99,
p.23275]**



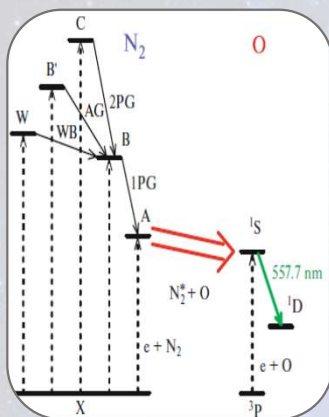
Ракетные измерения N_2 и N_2^+ полос на о. Хейса (13.12.1972)
[Кириллов и др., 1987, Геом. Аэрон.]

**Переходы для 1PG полос
при $\Delta v = v'(B) - v''(A) = 2, 3, 4$.
Vallance Jones, Aurora, 1974**

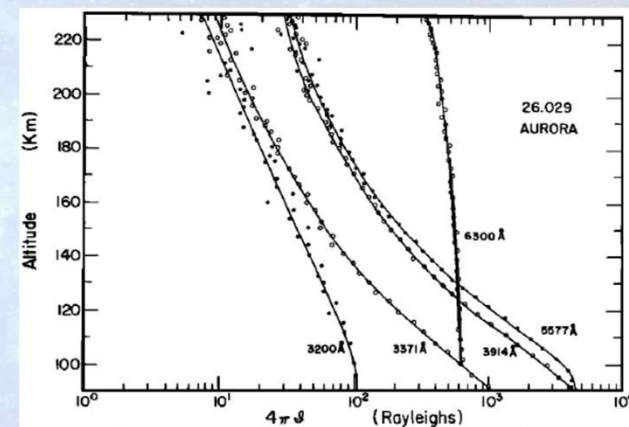




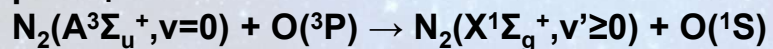
Вклад метастабильного $N_2(A)$ в излучение зеленой линии O



Sharp et al., 1979,
J. Geophys. Res., 84,
p.1977
Churchill Research
Range
(20.03.1974)



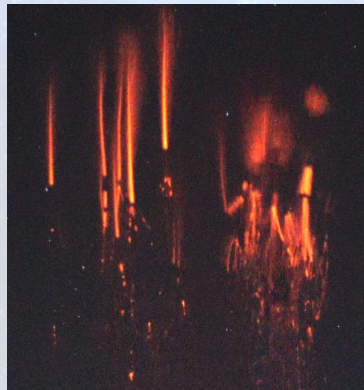
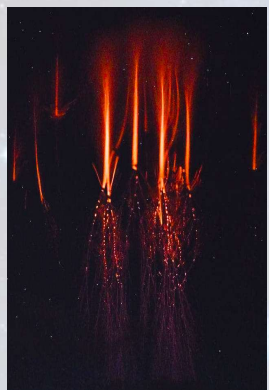
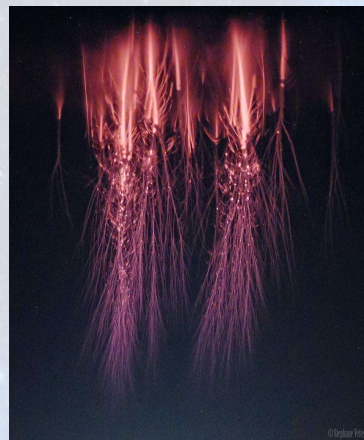
McDade and Llewellyn [1984, Planet. Space Sci., 32, p.1195] показали, что результаты ракетных измерений [Sharp et al., 1979] можно объяснить только реакцией



Расчеты в [Кириллов и Аладьев, 1998, Космич. Исслед., т.36, с.451] на основании приближения Ландау-Зинера показали, что константа скорости для $v=0$ в несколько раз больше констант для $v>0$.

Фотографии красных спрайтов

(Авторы благодарят профессионального фотографа Frankie Lucena за предоставленные фотографии и разрешение их использовать)

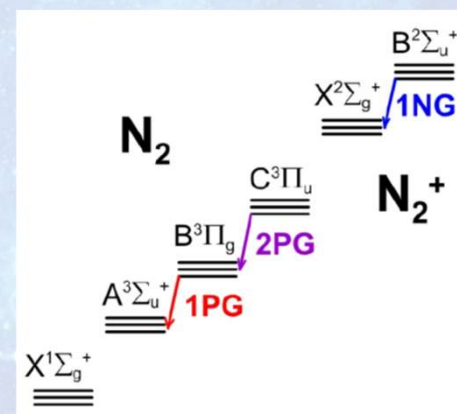
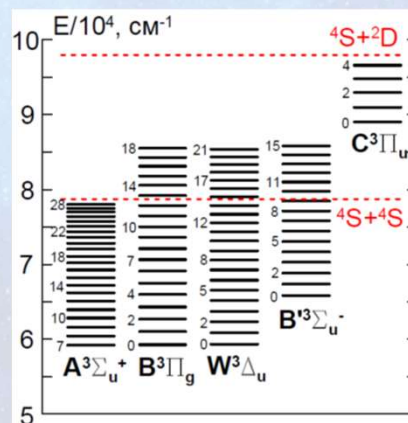
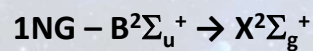
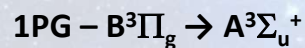
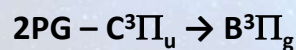
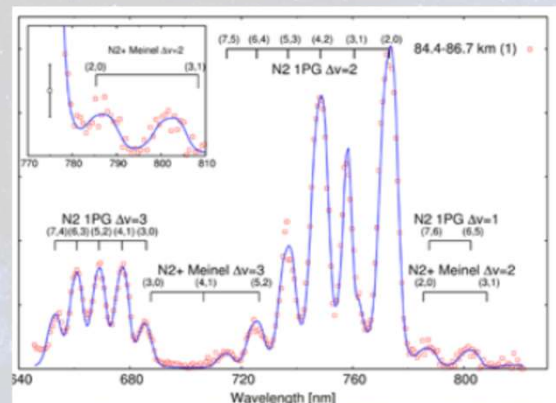
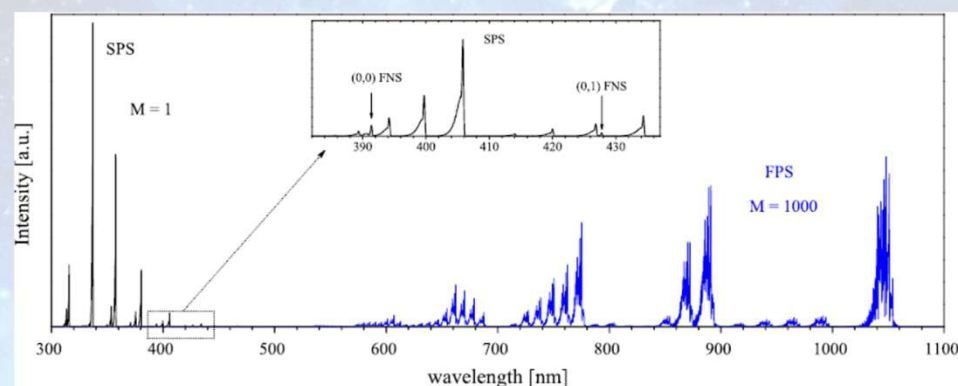
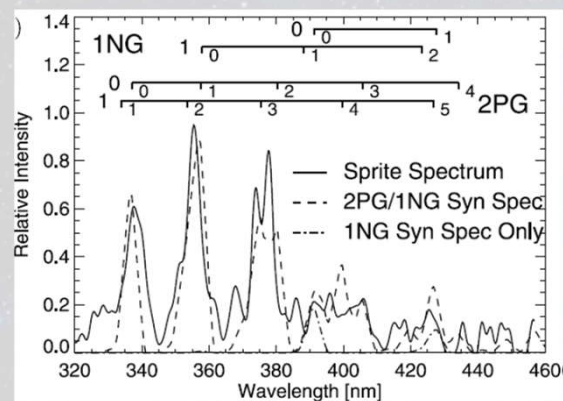


Спектры излучения N₂ в лабораторном разряде и спрейте

[Hoder et al., 2015, *J. Appl. Phys.*, v.117, 073302] (1PG+2PG),

[Kanmae et al., 2007, *GRL*, v.34, L07810] (1PG),

[Heavner et al., 2010, *JGR-A*, v.115, A00E44] (2PG)



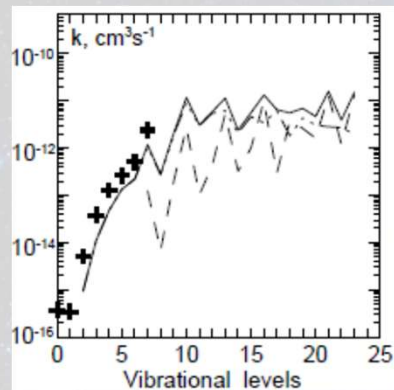
Константы скоростей гашения для $N_2(A, B, W, B') + N_2$ столкновений

Kirillov, 2004, Adv. Space Res, v.33, p.998

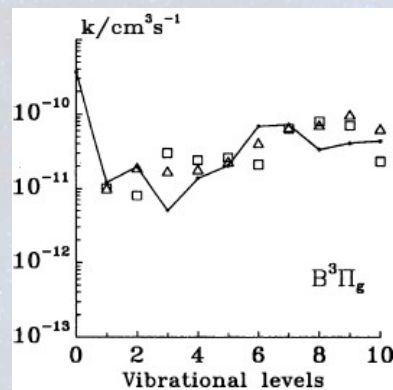
Kirillov, 2010, Ann. Geophys., v.28, p.181

Kirillov, 2011, J. Quan. Spec. Rad. Tran., v.112, p.2164

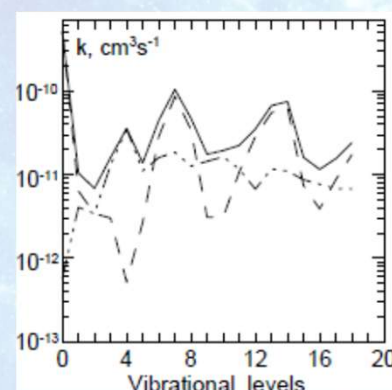
Kirillov, 2016, Chem. Phys. Lett., v.643, p.131



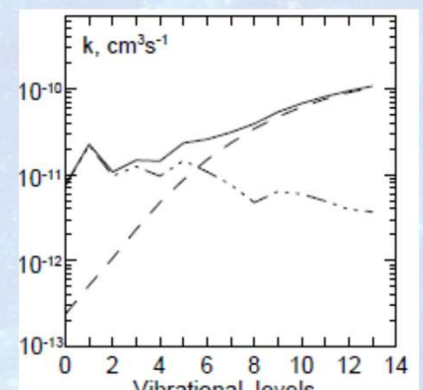
$A^3\Sigma_u^+$



$B^3\Pi_g$



$W^3\Delta_u$

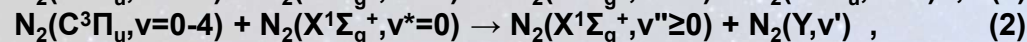
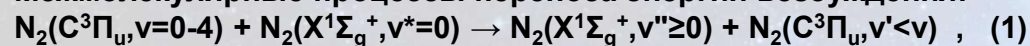


$B'^3\Sigma_u^-$

Константы скоростей гашения для $N_2(C) + N_2$ столкновений

Kirillov, 2019, Chem. Phys. Lett., v.715, p.263

Межмолекулярные процессы переноса энергии возбуждения:



Сравнение рассчитанных констант с экспериментальными данными Dilecce et al. [2006, Chem. Phys. Lett., v.431, p.241] (● и ▲):

а – для процесса (1),

б – для процесса (2).

Вклад для $Y = V^3\Pi_g(o)$, $W^3\Delta_u$ (---), $V^3\Sigma_u^-$ (- - -)

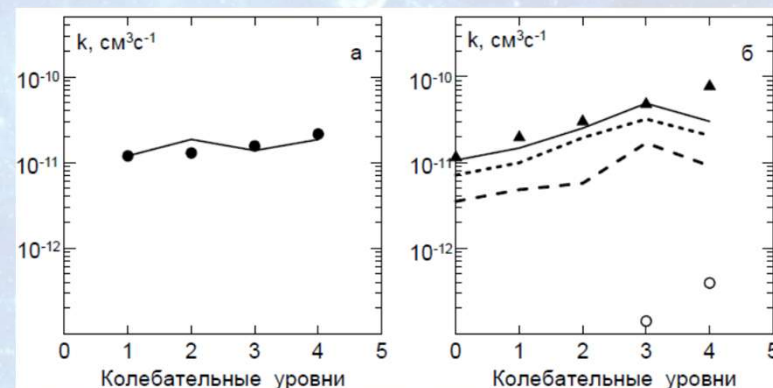


Table 1

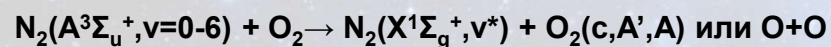
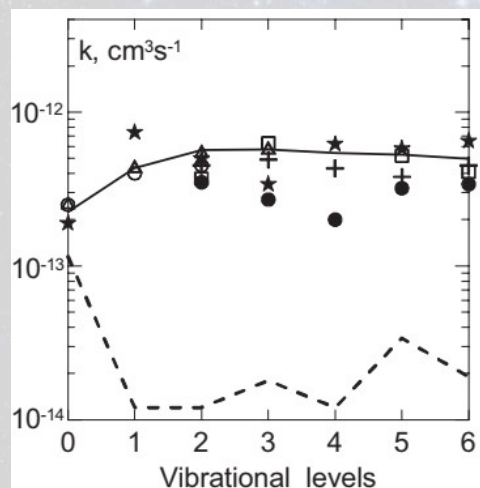
The calculated total quenching rate coefficients of the $C^3\Pi_u$ state are compared with experimental data [10,12-20] (in $10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$).

$v = 0$	$v = 1$	$v = 2$	$v = 3$	$v = 4$	References
1.06	2.66	4.37	6.27	4.86	This work
1.14 ± 0.12	3.14 ± 0.21	4.28 ± 0.21	6.34 ± 0.27	9.86 ± 0.46	Dilecce et al. [10]
1.0 ± 0.2	2.3 ± 0.3	3.0 ± 0.5	3.5 ± 0.7	—	Brocklehurst and Downing [12]
1.1 ± 0.1	2.2 ± 0.8	3.1 ± 0.7	—	—	Calo and Axtmann [13]
1.0 ± 0.1	2.6 ± 0.2	—	—	—	Millet et al. [14]
1.09 ± 0.11	2.53 ± 0.25	4.13 ± 0.41	4.28 ± 0.43	—	Chen et al. [15]
3.2 ± 0.3	—	—	—	8.8 ± 0.9	Becker et al. [16]
1.5	3.7	8	—	—	Urošević et al. [17]
—	3.3 ± 0.4	6.3 ± 0.8	8 ± 2	—	Gat et al. [18]
1.3 ± 0.2	2.9 ± 0.3	4.6 ± 0.6	4.3 ± 0.6	—	Pancheshnyi et al. [19]
—	2.9 ± 0.4	4.3 ± 0.6	4.8 ± 0.8	4.9 ± 0.9	Simek et al. [20]

Константы скоростей гашения для $N_2(A) + O_2$, CO столкновений

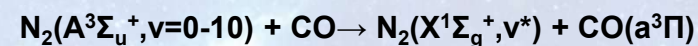
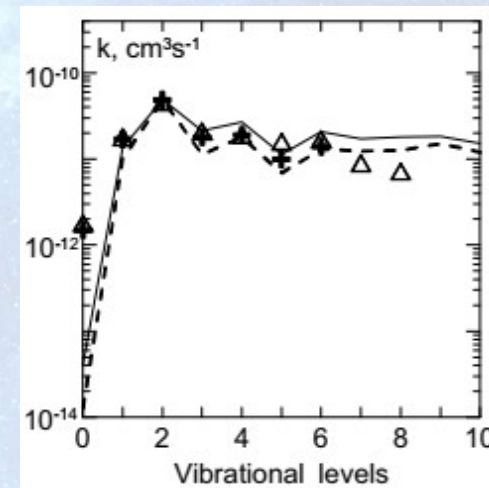
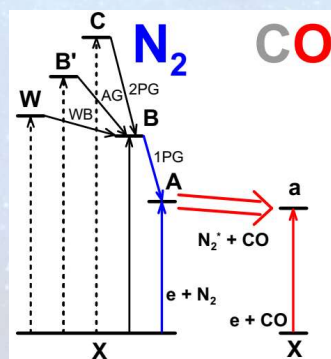
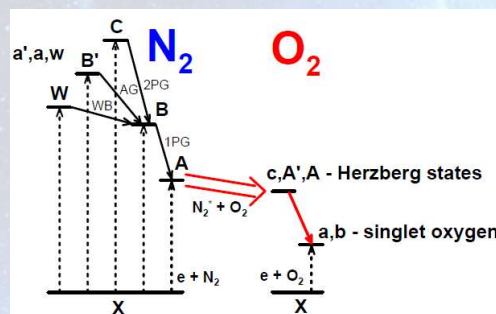
Kirillov, 2016, Chem. Phys. Lett., v.715, p.263

Kirillov, Belakhovsky, 2021, J. Geophys. Res.: Atmosphere, v.126, e2020JD033177



Сплошная линия – результаты расчета,
штрихи – вклад $O_2(c, A', A)$ возбуждения,

• + ◊ □ Δ – различные экспериментальные данные



Сплошная линия и штрихи – результаты
расчетов,

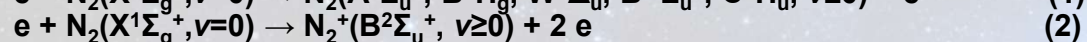
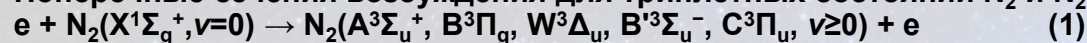
+ Δ – экспериментальные данные

При моделировании кинетики триплетных состояний $N_2(A^3\Sigma_u^+, B^3\Pi_g, W^3\Delta_u, B'^3\Sigma_u^-, C^3\Pi_u)$ на высотах свечения спрайтов используются константы, рассчитанные на основе квантово-химических приближений.

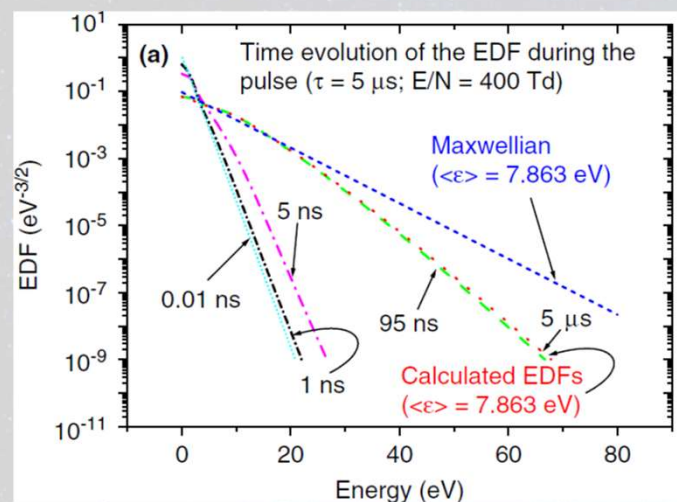
Для столкновений $N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + N_2, O_2$ используются константы, измеренные в [Pancheshnyi et al. , 1998, Chem. Phys. Lett., v.294, p.523].

При расчетах использован спектр электронов разряда, рассчитанный в [Gordillo-Vazquez, 2008, J. Phys. D, v.41, 234016] для импульса порядка $\tau \approx 5$ мкс.

Поперечные сечения возбуждения для триплетных состояний N_2 и $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ при столкновениях электронами разряда



берутся согласно [Itikawa, 2006, J. Phys. Chem. Ref. Data].



Спектр электронов разряда,
рассчитанный в [Gordillo-Vazquez, 2008,
J. Phys. D, v.41, 234016] для $\tau \approx 5$ мкс

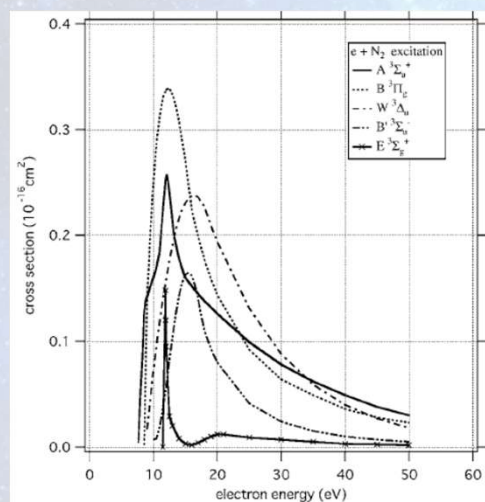
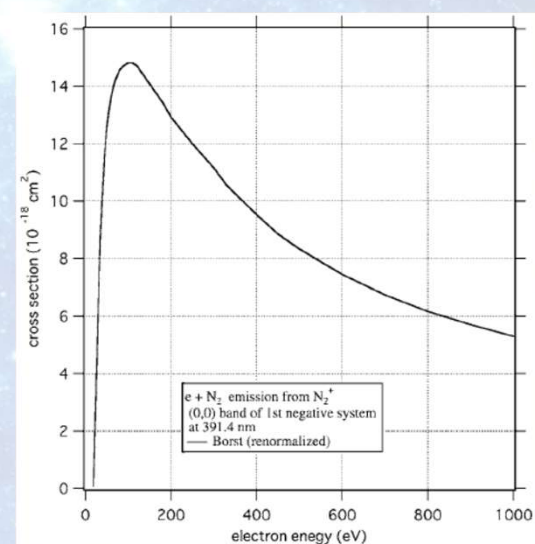


FIG. 8. Recommended values of the cross sections for the excitation of electronic states of N_2 : $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, and $E^3\Sigma_g^+$.

Поперечные сечения
для триплетных состояний



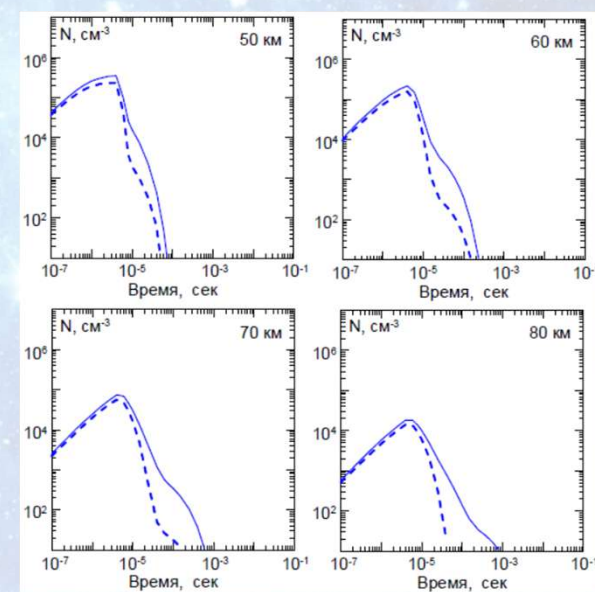
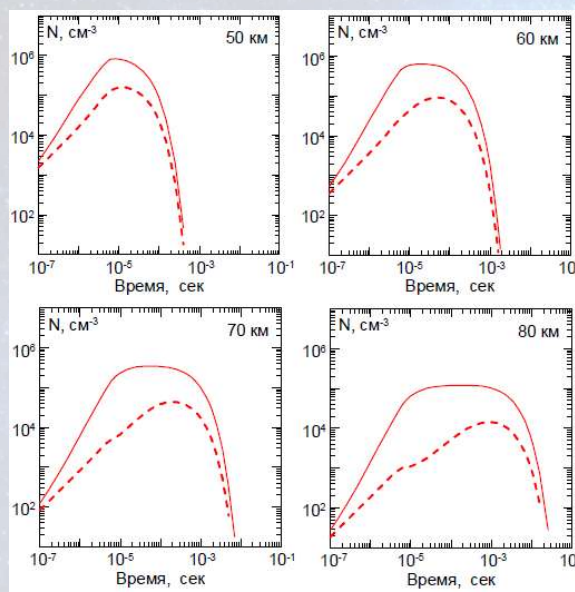
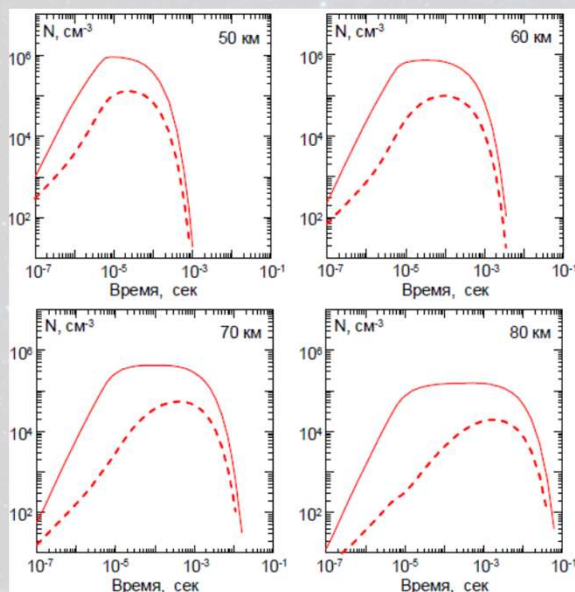
Поперечные сечения
для 391 нм полосы

Рассчитанные концентрации $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0,1)$ и $N_2(B^3\Pi_g, v=5)$ на высотах 50-80 км

$N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0)$

$N_2(A^3\Sigma_u^+, v=1)$

$N_2(B^3\Pi_g, v=5)$



Рассчитанные концентрации $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0,1)$ и $N_2(B^3\Pi_g, v=5)$ – сплошные линии.
Вклад прямого возбуждения $A^3\Sigma_u^+$ и $B^3\Pi_g$ состояний электронов разряда – штрихи.

Лабораторные измерения

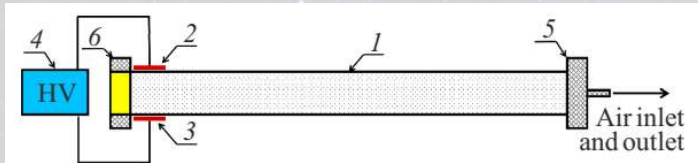
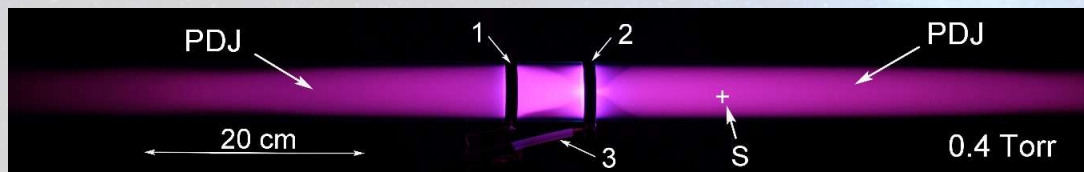


Рис. 1. Установка для формирования стримерного разряда: 1 — кварцевая трубка; 2, 3 — электроды из алюминиевой фольги; 4 — импульсный высоковольтный генератор с изменяемой полярностью и регулируемой амплитудой напряжения; 5 — фланец из капролона со штуцером для откачки и напуска воздуха; 6 — фланец из капролона с вмонтированным кварцевым окном.

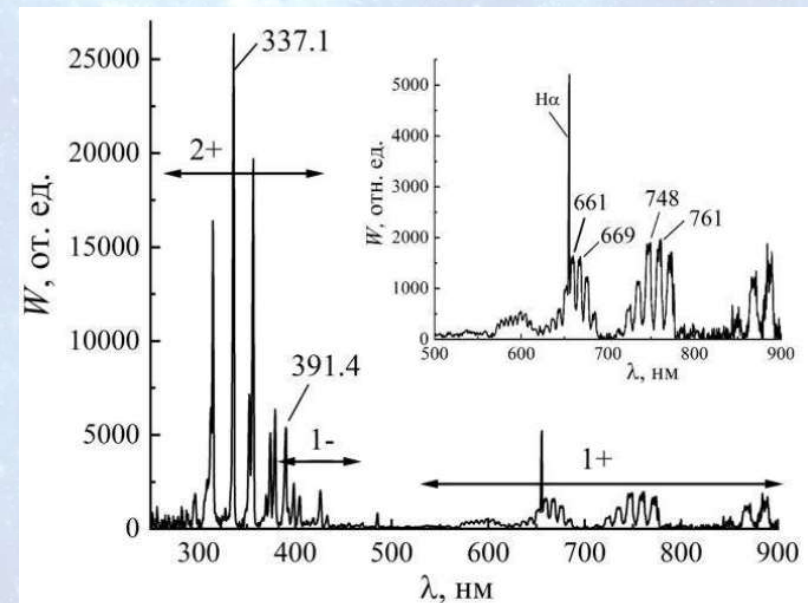


Фотографии разряда для давления воздуха 0.4 Торр.

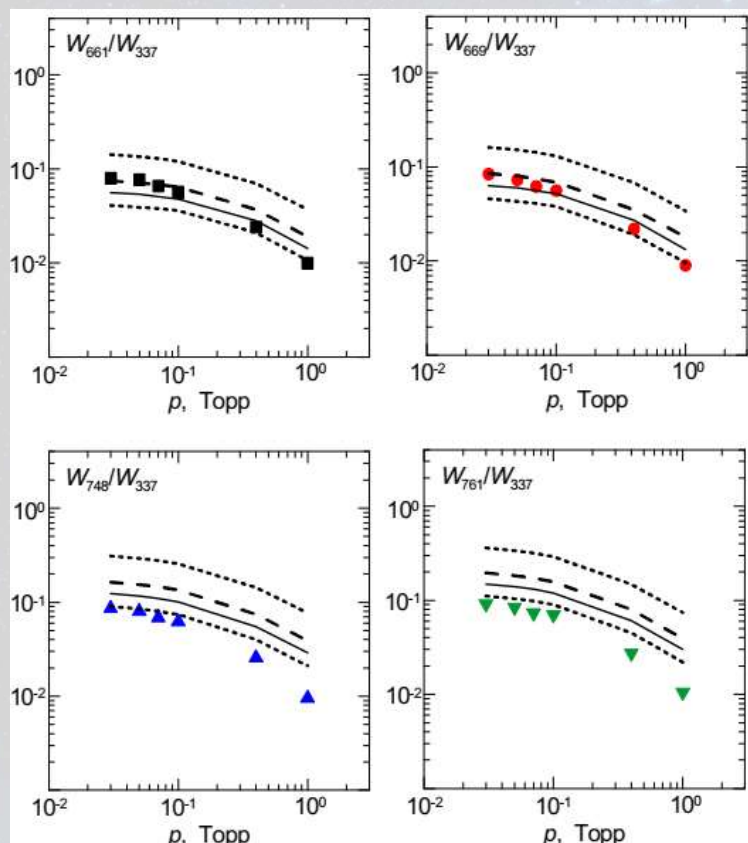
1 — заземлённый электрод, 2 — высоковольтный электрод, 3 — высоковольтный кабель.

PDJ — плазменные диффузные струи. S — область, из которой регистрировались спектры излучения, точка (+).

Спектральное распределение энергии излучения плазмы в диапазоне $\Delta\lambda = 250\text{-}900\text{ нм}$ при $P=0.2\text{ Торр}$.

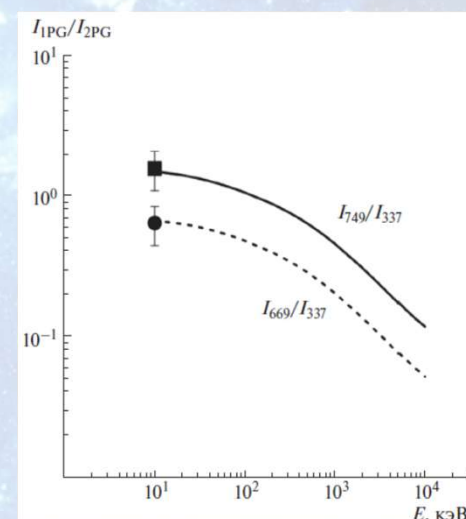


Сравнение рассчитанных W_{1PG}/W_{337} и I_{1PG}/I_{337} в разряде и полярных сияниях с экспериментальными данными



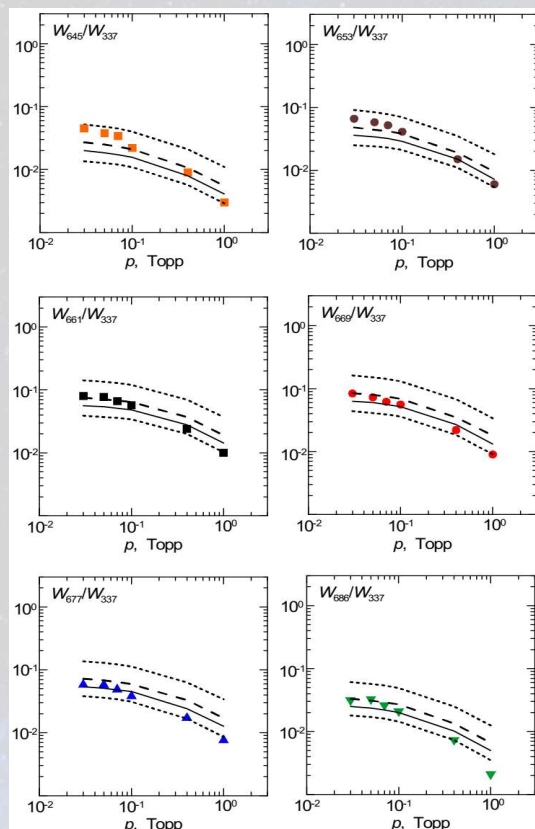
Верхние точки – 2 эВ
Штрихи – 3 эВ
Сплошные линии – 5 эВ
Нижние точки – 8 эВ

Кириллов и др., Геом. Аэрон.,
2025, т.65, №6.
Тарасенко и др., Оптика Атмос.
Океана, 2025, т.38, №9.

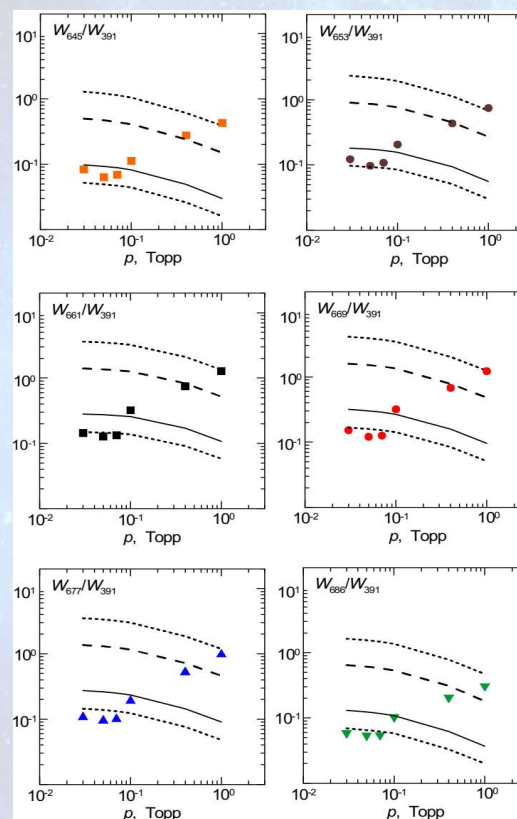


Расчеты для спектров авроральных электронов
 $f(E)=A \exp(-E/E_0)$
[Кириллов и Белаховский, Геом. Аэрон., 2020, т.60]
Ракетные измерения на острове Хейса (13.12.1972)
[Кириллов и др., Геом. Аэрон., 1987] (■,●)

Экспериментальные и рассчитанные отношения W_{1PG}/W_{337} , W_{1PG}/W_{391} при $T_e = 2-10$ эВ



Верхние точки – 2 эВ
 Штрихи – 3 эВ
 Сплошные линии – 5 эВ
 Нижние точки – 8 эВ



Верхние точки – 4 эВ
 Штрихи – 5 эВ
 Сплошные линии – 8 эВ
 Нижние точки – 10 эВ

ВЫВОДЫ

Молекулярный азот является основным газом в атмосферах Земли, Титана, Тритона и Плутона. Взаимодействие заряженных частиц с молекулами N_2 приводит к образованию электронно- и колебательно-возбужденных N_2 и N_2^+ . Эти молекулы и ионы играют важную роль в химическом, радиационном и тепловом балансах атмосфер.

1. Модель включает кинетику триплетных ($A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$) состояний N_2 и дублетного $B^2\Sigma_u^+$ состояния N_2^+ учетом переноса энергии возбуждения при неупругих молекулярных столкновениях и спонтанных излучательных переходах.
2. Результаты моделирования спектров излучения азота в полосах первой, второй положительных и первой отрицательных систем и отношения спектральных плотностей излучения W_{1PG}/W_{2PG} and W_{1PG}/W_{1NG} сравниваются с результатами экспериментальных измерений при давлениях, соответствующим высотам средней атмосферы. Теоретически и экспериментально показано, что неупругие молекулярные столкновения с ростом плотности среды приводят к значительному уменьшению населенностей колебательных уровней состояния $B^3\Pi_g$ и уменьшению интенсивностей свечения полос первой положительной системы N_2 . Также показано, что данные отношения зависят от температуры и могут быть использованы для оценки температуры электронов разряда.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 25-22-00158.

The image features a cosmic background with a dense field of stars and nebulae in shades of blue and white. A large, semi-transparent white rectangle with rounded corners is centered on the image, serving as a backdrop for the text.

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**