Свечение полос первой положительной системы молекулярного азота в полярных сияниях, спрайтах и плазменных диффузных струях

Кириллов В.А.[1], Золотенков Б.А.[1,2]

1 Полярный геофизический институт, Апатиты
2 Институт высокоточной электроники, Томск

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ С НИЖНИМ КРАСНЫМ КРАЕМ

В полярных областях России в темное время суток часто можно наблюдать интересное явление – свечение в верхних слоях атмосферы, которое называется полярными сияниями. Обычно такие сияния имеют ярко выраженный зеленый цвет.
Однако иногда нижний край полярных сияний переливается красными, малиновыми, розовыми, пурпурными тонами.
Причиной свечения в зеленом цвете является наличие в верхней атмосфере атомарного кислорода, который после взаимодействия с высыпающимися в атмосферу высокоэнергичными электронами светится в зеленом цвете.
Однако в более плотных слоях атмосферы свечение атомарного кислорода прекращается. Поэтому остается свечение молекулярного азота, которое приводит к таким красочным переливаниям в нижней кромке сияний.





КРАСНЫЕ СПРАЙТЫ

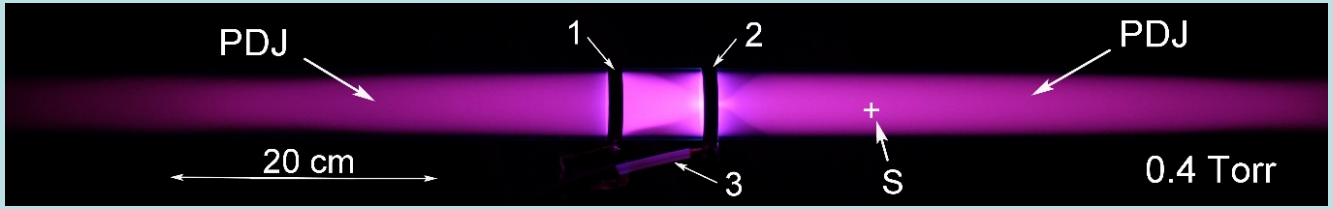
Аналогично при разрядах между грозовыми облаками и ионосферой образуется поток высокоэнергичных электронов.
Они также взаимодействуют с молекулами азота на высотах 40-90 км и вызывают красное свечение молекул N_2.
На рисунках представлены примеры таких зарегистрированных спрайтов.
Длительность свечения в спрайтах составляет несколько миллисекунд, поэтому до конца 80-х годов XX-го века они не регистрировались из-за отсутствия соответствующей аппаратуры.





ПЛАЗМЕННЫЕ ДИФФУЗНЫЕ СТРУИ

Коллеги из Института сильноточной электроники РАН (Томск) проводили эксперименты с импульсными разрядами.
Во время разрядов генерировались плазменные диффузные струи, также имеющие характерные красные тона.



Пример зарегистрированного спектра в диффузных плазменных струях.
Доминируют в спектре:
ультрафиолетовые полосы в диапазоне 330-400 нм ;
желтые, красные и инфракрасные полосы в диапазоне 600-800 нм.

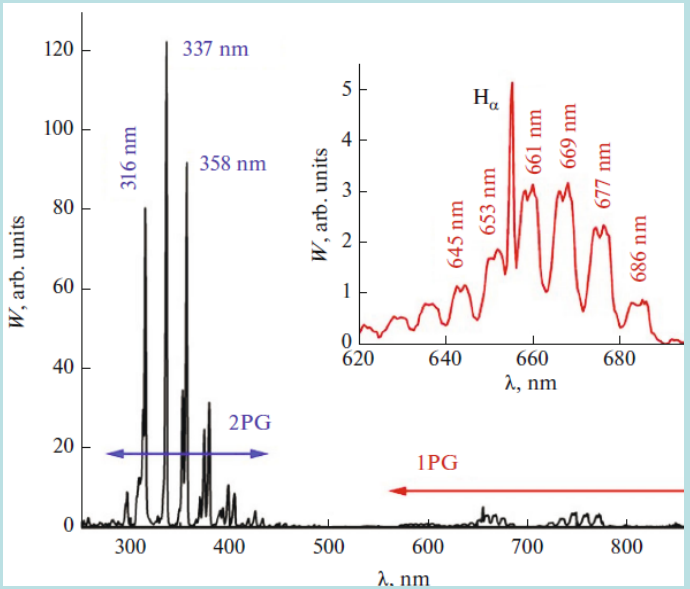
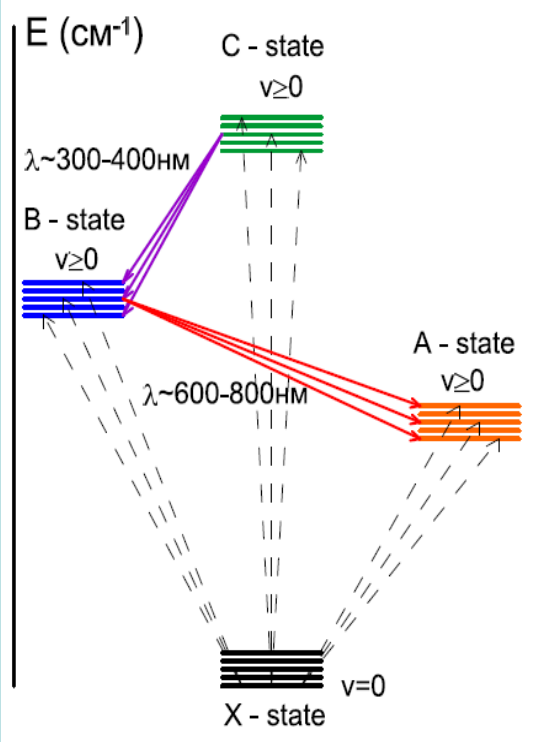
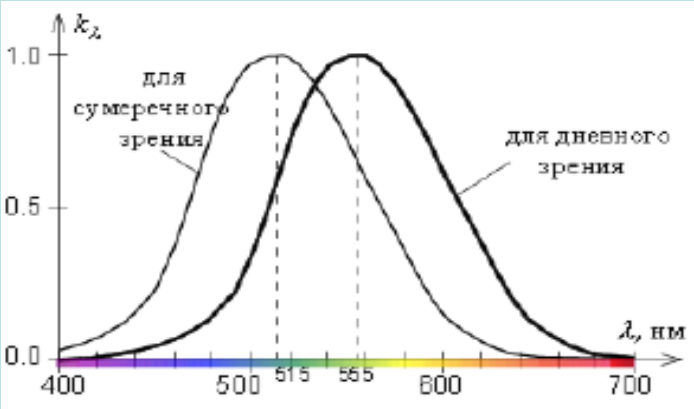


Схема электронно-возбужденных состояний молекулярного азота



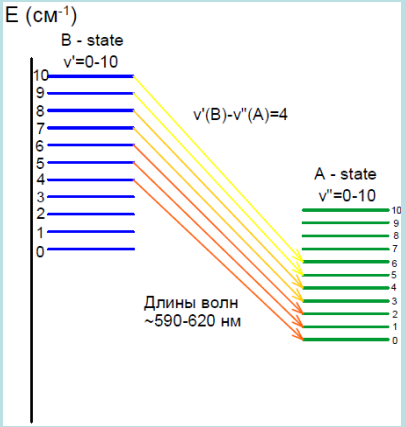


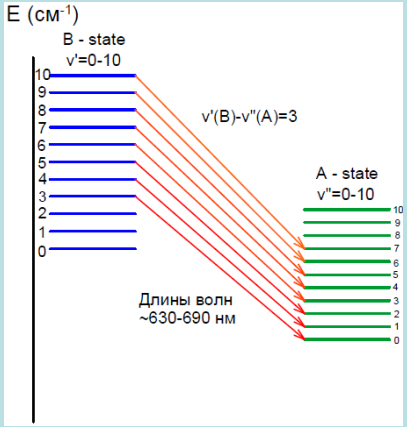
В случае полярных сияний, спрайтов и лабораторных разрядов высокоэнергичные частицы сталкиваются с молекулами азота. Такие взаимодействия приводят к тому, что молекулы азота переходят в различные возбужденные состояния A, B, C и т.д.

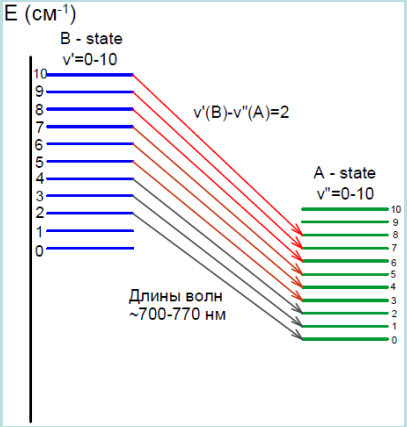
Данные молекулы через какое-то время переходят в исходные невозбужденные состояния, излучая при этом свет в различных диапазонах длин волн. Поскольку человеческий глаз видит в диапазоне от 400 до 700 нм, то только фотоны с длинами волн в данном диапазоне будут восприниматься человеком.

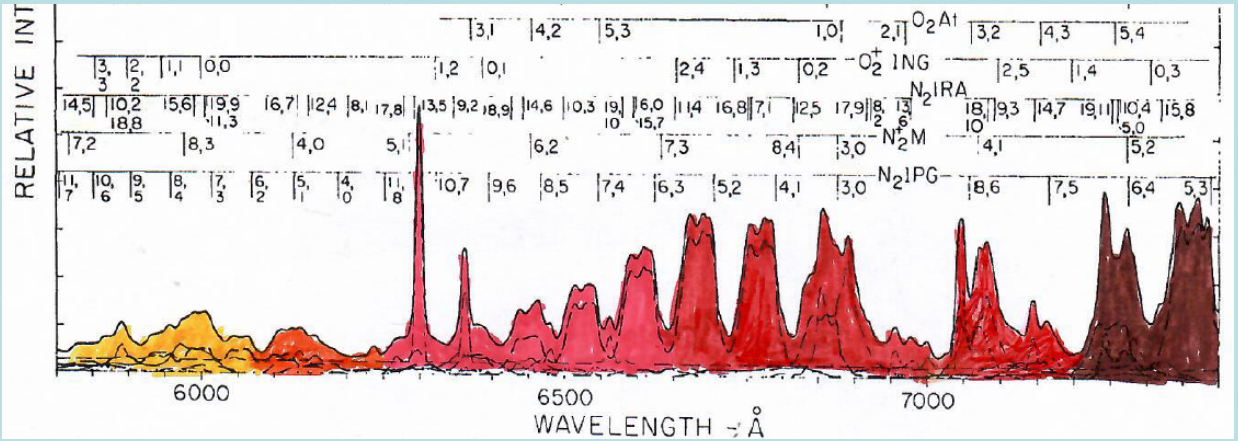
Поэтому из рассмотренных на рисунке переходов представляют интерес переходы из состояния B в состояние A, при которых происходит излучение полос в диапазоне 600-800 нм.

Переходы между состояниями B и A с излучением красных и инфракрасных полос молекулярного азота









Экспериментальные данные свечения полос N_2 согласно книге Vallance Jones, Aurora, 1974.

Всевозможные переходы между состояниями B и A можно разбить на группы с Δv= v'(B)-v"(A) = 2, 3, 4, как показано на верхних трех рисунках.

Согласно экспериментальным данным по свечению полярных сияний (на нижнем рисунке) группа полос с Δv=4 расположена в желто-оранжевом диапазоне и имеет малые интенсивности свечения, группа полос с Δv=2 расположена большей частью в инфракрасном диапазоне.

Только группа полос с Δv=3 расположена в видимом диапазоне и имеет большие значения интенсивностей. Поэтому во время полярных сияний свечение молекулярного азота окрашено красными цветами.

Коэффициенты Эйнштейна *A* (сек$^{-1}$) (согласно [Gilmore et al., 1992]) для спонтанных излучательных переходов из состояния *B* в состояние *A* в желтом, красном и инфракрасном диапазонах

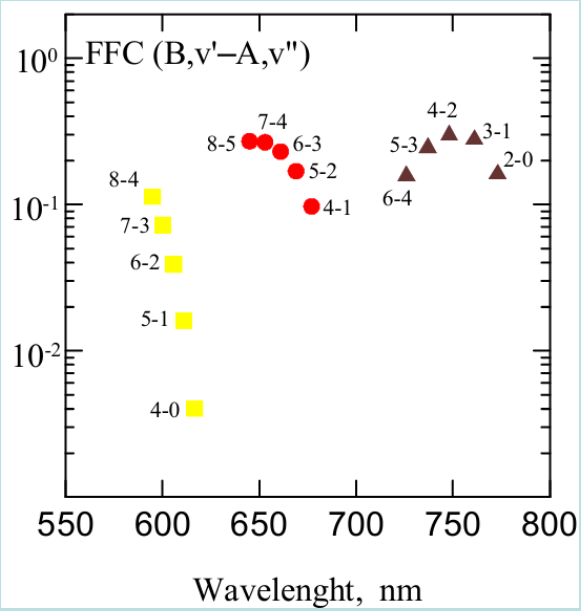
Желтый диапазон					
λ, нм	595	600	606	611	617
A, сек$^{-1}$	4.60×10^{4}	2.93×10^{4}	1.59×10^{4}	6.59×10^{3}	1.63×10^{3}
Красный диапазон					
λ, нм	645	653	661	669	677
A, сек$^{-1}$	9.91×10^{4}	9.61×10^{4}	8.21×10^{4}	5.95×10^{4}	3.35×10^{4}
Инфракрасный диапазон					
λ, нм	726	737	748	761	773
A, сек$^{-1}$	4.60×10^{4}	7.03×10^{4}	8.40×10^{4}	7.61×10^{4}	4.29×10^{4}

Интенсивность свечения полосы *I* равна произведению коэффициента Эйнштейна *A* и населенности уровня N_v состояния *B*

$$I = A \cdot N_v$$

Как видно из представленной таблицы коэффициентов Эйнштейна, наибольшие значения *A* получаются для красного и инфракрасного диапазонов.

Факторы Франка-Кондона (FFC) (согласно [Gilmore et al., 1992]) для спонтанных излучательных переходов из состояния *B* в состояние *A* для желтого, красного и инфракрасного диапазонов



$$q_{v'v''} = \left| \int \Psi_{v'} \Psi_{v''} \, \mathrm{d}r \right|^2$$

Ψ - ядерная волновая функция

На рисунке представлены значения FFC *q* для переходов *B*,*v*' → *A*,*v*". Как видно из рисунка, для желтого диапазона спектра они принимают малые значения. Поскольку коэффициенты Эйнштейна пропорциональны FFC, то для желтого диапазона они также малы. Поэтому в спектре свечения полярных сияний, спрайтов и плазменных диффузных струй доминируют красные и инфракрасные полосы.

Заключение

Люди часто наблюдают, что нижний край полярных сияний переливается красными, малиновыми, розовыми, пурпурными тонами, что связано со свечением молекулярного азота.
Кроме того, спрайты имеют также характерный красный цвет.
Эксперименты с импульсными разрядами и генерацией плазменных диффузных струй аналогично показывают на доминирование красного цвета в свечении разряда.
Это свечение вызвано группой полос молекулы N_2, возникающих при переходе из состояния B в состояние A, причем главным образом с $\Delta v = v'(B) - v''(A) = 3$.
Показано, что вследствие особенностей вероятностей переходов между электронно-возбужденными состояниями молекул азота (коэффициентов Эйнштейна) в спектре свечения преобладают красные и инфракрасные полосы. Также показано, что такое поведение коэффициентов Эйнштейна связано со значениями факторов перекрывания ядерных волновых функций (факторы Франка-Кондона).

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