

УДК 551.510.42:629.7.036.54.63

ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ ПО ТРАЕКТОРИИ СПУСКА С ОРБИТЫ СА «СОЮЗ-ТМА» ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ С БОРТА МКС

Пластинин Ю.А., Карабаджак Г.Ф., Власов В.И., Горшков А.Б., Залогин Г.Н.

*Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИмаш), Королев,
Московская область, Россия
Email: yuplast@tsniimash.ru*

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований силы ультрафиолетового (УФ) излучения плазменного образования при входе в атмосферу Земли спускаемого аппарата (СА) «Союз - ТМА» в диапазоне скоростей 3 - 7 км/сек и высот $H = 46 - 80$ км.

Abstract

Results of experimental and theoretical investigations are presented of ultra-violet (UV) radiation of plasma structure along the re-entry trajectory in the Earth's atmosphere of space vehicle "Soyuz-TMA" in the velocity and altitude range 3-7 km/sec and $H = 46 - 80$ km.

Ранние (60-е годы прошлого века) исследования излучения высокотемпературного воздуха были направлены в основном на определение его вклада в тепловые нагрузки на космические спускаемые аппараты, входящие в атмосферу Земли с орбиты искусственного спутника или после возвращения из экспедиций на Луну или к другим планетам солнечной системы. Такие исследования проводились в предположении, что газ в ударном слое находится в термодинамическом равновесии. При этом основные трудности заключались в определении зависимости коэффициентов поглощения газом излучения от температуры, давления и длины волны. Подобные данные о воздухе заоблачены [1, 2], что позволяет считать проблему равновесной радиационной газовой динамики в общем решенной, по крайней мере, при рассмотрении задач входа летательных аппаратов (ЛА) в атмосферу Земли.

Несколько позднее (60-70-е годы) вместе с исследованиями неравновесных физико-химических процессов и определения их кинетических характеристик начали проводиться и исследования характера излучения воздуха за фронтом ударных волн [3, 4]. Как показали упомянутые исследования, при скоростях входа в атмосферу, меньших 2-й космической, излучение ударного слоя не оказывает заметного влияния на величину тепловых потоков. Однако и в этих условиях процессы излучения могут играть важную, а для некоторых задач и доминирующую, роль. В частности они влияют на структуру и свечение плазменных образований около ЛА, летящих в атмосфере с гиперзвуковой

скоростью. Эти эффекты необходимо принимать во внимание при решении задач астроориентации и навигации ЛА. В этом случае необходимы достаточно точные данные об интенсивности излучения ударного слоя даже при низких скоростях ($V \leq 3-4$ км/с) полета аппарата, так как оно может значительно превосходить по интенсивности принимаемое ими излучение звезд.

Процессы излучения необходимо учитывать в разрядных камерах высокочастотных индукционных плазмотронов, которые в настоящее время широко используются при решении аэрофизических задач, а также других высокотемпературных газодинамических установках. Кроме того, излучательные процессы используются для дистанционной (спектральной) диагностики параметров (температуры и состава газа) низкотемпературной плазмы.

Разработка физико-химических и излучательных моделей высокотемпературного неравновесного воздуха, включающая выбор определяющих процессов и их кинетических характеристик (сечений или констант скоростей), проводится, как правило, на основании экспериментальных исследований, проводимых в ударных трубах. Поскольку такого рода исследования проводятся с ограниченным набором параметров (давлений и скоростей ударных волн), основным критерием правильности таких моделей является сравнение расчетов интенсивности излучения, полученной с их использованием, и данных соответствующих измерений, проведенных в условиях спуска СА в атмосферу. В связи с большими техническими сложностями проведения космических экспериментов и большой стоимостью их количество ограничено.

Особенную сложность для регистрации представляет излучение в УФ области спектра. Такое излучение не может быть зарегистрировано с поверхности Земли из-за его поглощения нижними слоями атмосферы, в частности озоновым слоем на высотах $H \sim 20-30$ км. Проведение наблюдения и регистрация такого рода излучения возможно только с самого СА или с аппарата, движущегося по орбите искусственного спутника Земли, поскольку верхние слои атмосферы прозрачны для УФ излучения.

Излучение в УФ диапазоне длин волн от возвращаемых космических аппаратов ранее экспериментально исследовалось в специально поставленных космических экспериментах (программа Bow Shock, аппарат Skipper) при скоростях входа в атмосферу Земли 3.5 [5] и 5 км/сек [6]. Интенсивность излучения ударного слоя регистрировалась в этих экспериментах приборами, расположенными на борту аппарата. Теоретический анализ излучения для условий этих экспериментов был выполнен в [7] и [8], а также авторами настоящей работы [9, 10].

Измерения УФ излучения плазменного образования СА «Союз-ТМА», анализируемые в настоящей работе, были проведены с борта МКС, общий вид которой показан на рис.1, в ночных условиях наведения с помощью высокочувствительной радиометрической УФ камеры «Фиалка-МВ-Космос». Проведено сопоставление результатов расчетов и экспериментов по силе излучения от плазменного образования в области спектра 230-370 нм. Полученные данные представляют большую ценность для верификации существующих и разрабатываемых газодинамических, термохимических и радиационных моделей гиперзвукового обтекания СА, в том числе многоцветных аппаратов планирующего спуска.

Наблюдение излучения плазменных образований около спускаемых аппаратов, отделившихся от МКС, с борта МКС имеет важное преимущество по сравнению с наблюдением с Земли. Оно связано с тем, что оба объекта (МКС и СА) достаточно длительное время движутся с близкими скоростями, не удаляясь друг от друга на очень большие расстояния. Это позволяет проводить регистрацию излучения ударного слоя практически во всем диапазоне высот ($H = 100 - 30$ км), где оно имеет достаточную интенсивность.



Рис.1. Общий вид орбитальной космической станции МКС



Рис.2. Общий вид СА "Союз-ТМА"

Описание эксперимента

В ходе проведения КЭ «Релаксация» с борта МКС выполнено экспериментальное исследование в ночных условиях силы излучения в УФ области спектра 230-370 нм от плазменного образования около СА «Союз-ТМА» в атмосфере Земли. Для измерения

абсолютной интенсивности вдоль траектории использовалась высокочувствительная оптическая система «Фиалка-МВ-Космос», размещенная на МКС. Система аналогична той, которая находилась на борту пилотируемой станции «Мир» [11], но более чувствительная по порядку величины. Измерения были сделаны, используя высокочувствительную солнечно-слепую УФ камеру с усилителем яркости с ССД матричной камерой в качестве конечного регистратора изображения. Порог чувствительности составил $\sim 1.7 \cdot 10^{-17}$ Вт/см², поле зрения – 10.5° и мгновенное поле зрения пикселя изображения – $2 \cdot 10^{-4}$ рад.

Возвращаемый аппарат «Союз» представляет собой сегментально-коническое тело – сферический 30-ти градусный сегмент с радиусом $R = 2,32$ м, переходящий в обратный конус с углом полураствора 7° . Линия сопряжения сегмента и конуса скруглена по радиусу $r/R = 1/50$. Общий вид аппарата «Союз ТМ» показан на рис.2.

Транспортный корабль, отделяющийся от МКС, состоит из трех отсеков – собственно СА и двигательного и стыковочного отсеков. На высоте $H \sim 10$ км происходит отделение СА от двух других отсеков, которые отстают от СА и сгорают в атмосфере. Процесс разделения хорошо виден на получаемых изображениях (рис.3). На высоте $H = 96$ км разделение отсеков только начинается (рис. 3а). На высоте $H = 70$ км разделение завершилось и СА удаляется от других отсеков (рис.3б). На меньших высотах наблюдение велось только за спуском СА (рис.3в).

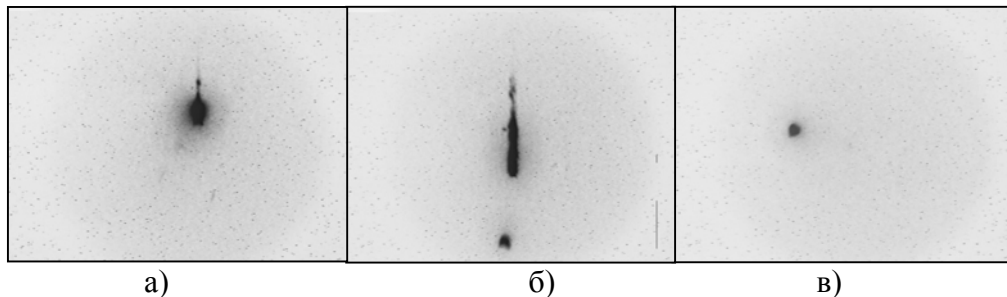


Рис. 3. Вход в плотные слои атмосферы транспортного корабля
а) $H = 96$ км, $V = 7.6$ км/с; б) $H = 70.1$ км, $V = 7.5$ км/с; в) $H = 50$ км, $V = 5.8$ км/с

Таблица 1

H, км	V_∞ , м/с	$Re_{\infty, Rb}$	P_∞ , атм	T_∞ , К
80.5	7604	$2.61 \cdot 10^4$	$1.00 \cdot 10^{-5}$	184.9
70.1	7510	$1.06 \cdot 10^5$	$5.67 \cdot 10^{-5}$	218.7
60.7	7109	$3.00 \cdot 10^5$	$2.17 \cdot 10^{-4}$	251.0
52.6	6116	$6.17 \cdot 10^5$	$6.07 \cdot 10^{-4}$	274.0
45.6	4537	$1.09 \cdot 10^6$	$1.43 \cdot 10^{-3}$	272.3

Калибровка абсолютной чувствительности аппаратуры была осуществлена на базе измерений излучения звезд, используемого как калибровочный источник. Регистрация входа СА началась с высоты 99 км. Изменение скорости с высотой полета СА приведено на рис. 4 и в таблице 1, там же представлены угол наблюдения в соответствии со схемой, показанной

на рис.5, где МГ СА и МГ МКС – местные горизонты в точках СА и МКС, $H_{СА}$ и $H_{МКС}$ – высоты СА и МКС, S – дальность между МКС и СА, β – угол наблюдения между S и осью СА, η – угол между $\vec{V}_{СА}$ и S , α – угол атаки (между $\vec{V}_{СА}$ и осью СА), $(XYZ)_{ОСК}$ – орбитальная система координат в точке МКС. Угол атаки аппарата в рассматриваемом диапазоне высот был примерно постоянен и равен 22° . В таблице 2 представлены результаты измерений силы излучения I (Вт/ср) в полосе чувствительности УФ камеры, приведенной на рис.6.

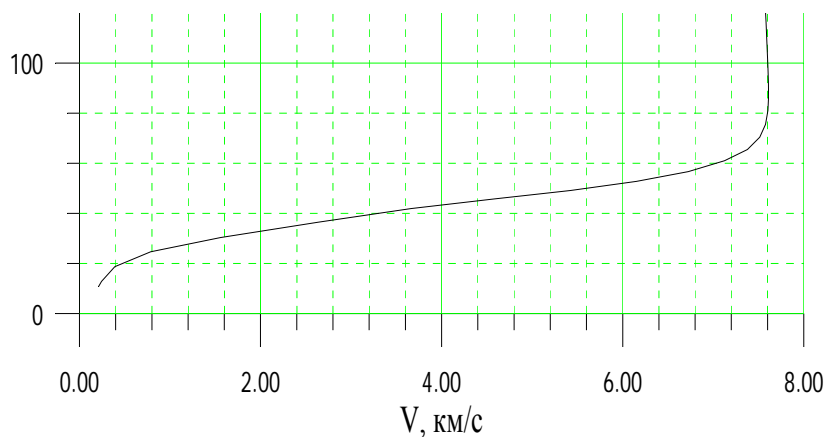


Рис.4. Модуль скорости СА «Союз-ТМА» в гринвичской системе координат в зависимости от высоты полета.

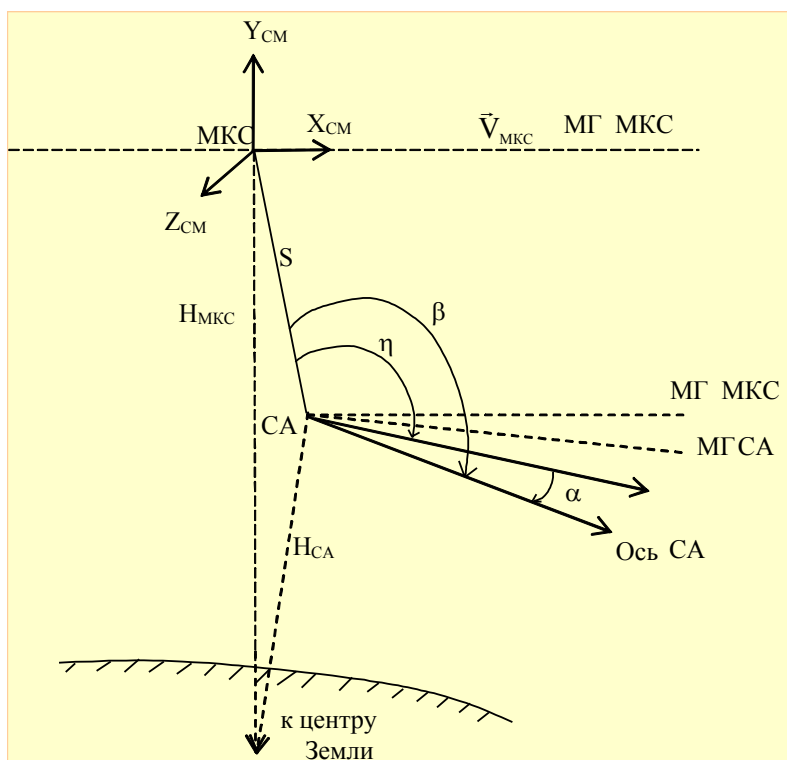


Рис.5. Схема наблюдения полета СА с борта орбитальной станции МКС

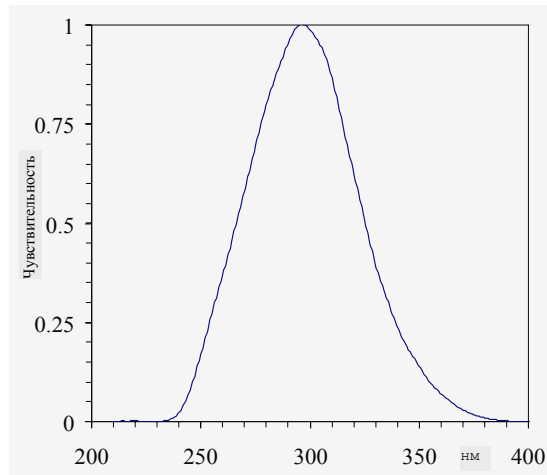


Рис.6. Полоса пропускания приемной аппаратуры

На рис.7 показан общий вид используемого оборудования, а в таблице 2 его основные характеристики.



Рис. 7. Общий вид используемого оборудования.

Таблица 2. Основные характеристики УФ-камеры

Рабочая область длин волн, нм	200-360
Широкополосный УФ - фильтр, нм	240-360
Эффективный диаметр телескопа, мм	55

Длина фокуса телескопа	78
Поле зрения, градус	10,5
Угловое разрешение, угл. мин.	5.8
Максимальный коэффициент усиления изображения	$\sim 3 \cdot 10^4$
Пороговая чувствительность, Вт/м ²	$2 \cdot 10^{-13}$

Численный метод

Измерения излучения от плазменного образования, образующегося при входе аппарата «Союз» в атмосферу, производились в ближнем ультрафиолете. Основной вклад в этом диапазоне спектра вносит излучение от высокотемпературного ударного слоя на лобовой стороне СА.

Ударный слой на боковой поверхности и след практически не излучают в ультрафиолете из-за относительно низкого уровня температур, которые здесь наблюдаются. По этой же причине при расчете УФ излучения можно не рассматривать пограничный слой. Поэтому вычисления были выполнены только для лобовой и небольшой части боковой поверхности аппарата (0.15 R), чтобы получить сверхзвуковое течение на выходной границе расчетной области и тем самым исключить влияние вверх по потоку.

Для численного моделирования использовались трехмерные уравнения Эйлера, дополненные уравнениями неразрывности для отдельных химических компонент и записанные в консервативном виде в произвольной системе координат. Уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \zeta} = \mathbf{S}$$

$$\xi = \xi(x, y, z), \quad \eta = \eta(x, y, z), \quad \zeta = \zeta(x, y, z)$$

$$J = \partial(\xi, \eta, \zeta) / \partial(x, y, z)$$

$$\mathbf{E} = J^{-1}(\xi_x \mathbf{E} + \xi_y \mathbf{F} + \xi_z \mathbf{G}); \quad \mathbf{F} = J^{-1}(\eta_x \mathbf{E} + \eta_y \mathbf{F} + \eta_z \mathbf{G})$$

$$\mathbf{G} = J^{-1}(\zeta_x \mathbf{E} + \zeta_y \mathbf{F} + \zeta_z \mathbf{G}); \quad \mathbf{S} = J^{-1}(0, 0, 0, 0, \omega_i)$$

$$\mathbf{Q} = J^{-1} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \\ \rho_i \end{pmatrix}; \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (e+p)u \\ \rho_i u \end{pmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (e+p)v \\ \rho_i v \end{pmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ (e+p)w \\ \rho_i w \end{pmatrix}$$

$$p = \frac{\rho RT}{M} = \sum p_i = \sum \frac{\rho_i RT}{M_i}; \quad e = \sum \rho_i h_i + \sum \rho_i h_{f,i} + \rho \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}$$

На поверхности тела использовались условия непротекания (нормальная к поверхности скорость $V_n = 0$). На плоскости симметрии использовались условия четности и нечетности параметров потока. На выходной границе применялась экстраполяция первого или

второго порядка точности. На ударной волне ставились условия Ренкина-Гюгонно. Значения концентраций компонентов при переходе через скачок уплотнения считались замороженными. Вычисления были выполнены на сетке $50 \times 30 \times 40$ (в продольном, поперечном и окружном направлениях соответственно).

При проведении расчетов использовалась неявная итерационная схема [12], представляющей собой вариант точечного метода Гаусса-Зейделя. Подробнее численный метод решения описан в [13].

В расчётах использовалась ранее разработанная физико-химическая модель неравновесного воздуха [14, 15], тестируемая в частности, путем сравнения с лётными данными по электронной концентрации в ударном слое около аппарата RAM-C. Кратко, она состоит в следующем. Воздух предполагается состоящим из 8 химических компонентов: N_2 , O_2 , NO , N , O , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ и e^- . Вращательная температура, колебательные температуры молекулярных ионов N_2^+ , O_2^+ , NO^+ и температура свободных электронов полагаются равными поступательной температуре. В общем случае для нейтральных молекул N_2 , O_2 и NO решаются уравнения сохранения колебательной энергии (колебательно неравновесная модель с различными колебательными температурами). Однако, предварительные расчеты показали, что в рассматриваемых условиях колебательные температуры молекул N_2 , O_2 и NO слабо отличаются от поступательной температуры. Поэтому температура их колебательного возбуждения также полагалась равной поступательной температуре.

Применимость такого упрощенного подхода связана с тем, что СА «Союз» имеет большие размеры и реализуемые в рассматриваемых условиях ($H < 70$ км) толщины пограничного слоя и зоны релаксации колебательных степеней свободы молекул кислорода и азота за фронтом ударной волны малы по сравнению с толщиной ударного слоя. Для излучения ударного слоя на больших высотах необходимо использовать более сложную газодинамическую модель течения, заключающуюся в решении уравнений вязкого ударного слоя, а на высотах $H > 90$ км уравнений Навье-Стокса.

К настоящему времени система химических реакций и реакций ионизации, протекающих в воздухе при скоростях полета $V = 4 - 8$ км/с и константы скоростей их протекания достаточно хорошо известны. В этих условиях достаточно учитывать реакции, приведенные в таблице 4. Скорости прямых реакций записываются в виде:

$$K_f = A T^B \exp(-C/T) \quad \text{см}^3/(\text{моль с}),$$

а обратных:

$$K_r = D T^E \exp(-F/T) \quad \text{см}^6/(\text{моль}^2 \text{ с}) \text{ (тройные)},$$

$$K_r = D T^E \exp(-F/T) \quad \text{см}^3/(\text{моль с}) \text{ (бинарные)},$$

Таблица 3

№,	Реакция	A	B	C	D	E	F
1	$O_2 + M \Leftrightarrow 2 O + M$	$3.6 \cdot 10^{19}$	-1	59400	$3.12 \cdot 10^{16}$	-0.5	0
2	$N_2 + M \Leftrightarrow 2 N + M$	$5.8 \cdot 10^{17}$	-0.5	113200	$3.08 \cdot 10^{16}$	-0.5	0
3	$NO + M \Leftrightarrow N + O + M$	$1.2 \cdot 10^{19}$	-1	75500	$2.9 \cdot 10^{18}$	-1	0
4	$NO + O \Leftrightarrow N + O_2$	$2.8 \cdot 10^9$	1.	20000.	$1.1 \cdot 10^{10}$	1.0	4000
5	$N_2 + O \Leftrightarrow NO + N$	$2.0 \cdot 10^{12}$	0.5	38000.	$4.4 \cdot 10^{11}$	0.5	0.

6	$N + O \Leftrightarrow NO^+ + e$	$2.56 \cdot 10^{12}$	0.	32200.	$6.7 \cdot 10^{21}$	-1.5	0.
	$N + N \Leftrightarrow N_2^+ + e$	$4.44 \cdot 10^{10}$	0.7	67500.	$1.5 \cdot 10^{22}$	-1.5	0.
7	$O + O \Leftrightarrow O_2^+ + e$	$1.20 \cdot 10^{10}$	0.65	80600.	$8.0 \cdot 10^{21}$	-1.5	0.

Проведенные ранее исследования вклада различных процессов в интенсивность неравновесного излучения воздуха за ударными волнами показали, что в УФ области спектра основными являются системы полос молекул $N_2(2+)$, $N_2^+(1-)$, $O_2(SR)$ и $NO(\beta, \gamma, \delta, \epsilon)$. Поэтому в данной работе учитывались именно эти системы полос. В таблице 4 показаны электронные состояния молекул, которые принимают участие в процессах возбуждения и дезактивации.

Таблица 4

Молекула	Состояние	Энергия возбуждения, Е, см ⁻¹	Переход	Время жизни τ , с
N_2	$C^3\Pi_u$	89136	$C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ (вторая положит) $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$ (первая положит)	$3.7 \cdot 10^{-8}$
	$B^3\Pi_g$	59619		$5 \cdot 10^{-8}$
	$A^3\Sigma_u^+$	50203		$1.3 \cdot 10^{-5}$
	$X^1\Sigma_g^+$	0		
N_2^+	$B^2\Sigma_u^+$	25461	$B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ (первая отриц)	$5.8 \cdot 10^{-8}$
	$A^2\Pi_u$	9167		
	$X^2\Sigma_g^+$	0		
NO	$D^2\Sigma^+$	53085	$D^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi_r(\epsilon)$ $C^2\Pi_r \rightarrow X^2\Pi_r(\delta)$ $B^2\Pi_r \rightarrow X^2\Pi_r(\beta)$ $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi_r(\gamma)$	$2.6 \cdot 10^{-8}$
	$C^2\Pi_r$	52073		$5 \cdot 10^{-8}$
	$B^2\Pi_r$	45918		$2.1 \cdot 10^{-6}$
	$A^2\Sigma^+$	43964		$2 \cdot 10^{-7}$
	$X^2\Pi_r$	0		
O_2	$B^3\Sigma_u^-$	89136	$B^3\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-$ (Шумана-Рунге)	$4 \cdot 10^{-8}$
	$X^3\Sigma_g^-$			

Процессы, приводящие к возбуждению электронных состояний молекул с последующим излучательным переходом весьма разнообразны. Это в первую очередь столкновения с электронами и тяжелыми частицами, образование электронно-возбужденных молекул в химических реакциях (хемиллюминисцентные реакции) и передача энергии возбуждения между близкими состояниями различных молекул. Учтенные в настоящей работе процессы возбуж-

дения электронных состояний молекул приведены в таблице 5. Обозначения электронных состояний в этой таблице используются в сокращенном виде.

Таблица 5

№	Реакция	№	Реакция
1.	$N_2 + e^- \leftrightarrow N_2(A) + e^-$	21.	$NO + NO \leftrightarrow NO(A) + NO$
2.	$N_2 + N \leftrightarrow N_2(A) + N$	22.	$NO + e^- \leftrightarrow NO(B) + e^-$
3.	$N_2 + O_2 \leftrightarrow N_2(A) + O_2$	23.	$NO(A) + e^- \leftrightarrow NO(B) + e^-$
4.	$N_2 + O \leftrightarrow N_2(A) + O$	24.	$NO + NO \leftrightarrow NO(B) + NO$
5.	$N_2(A) + M \leftrightarrow N + N + M$	25.	$NO + N_2 \leftrightarrow NO(B) + N_2$
6.	$N_2(B) \rightarrow N_2(A)$	26.	$NO + O_2 \leftrightarrow NO(B) + O_2$
7.	$N_2(C) \rightarrow N_2(B)$	27.	$NO + O_2 \leftrightarrow NO(B) + O_2$
8.	$N_2(A) + N_2 \leftrightarrow N_2(B) + N_2$	28.	$NO + M \leftrightarrow NO(C) + M$
9.	$N_2(C) + N_2 \leftrightarrow N_2(A) + N_2(B)$	29.	$NO + M \leftrightarrow NO(D) + M$
10.	$N_2 + e^- \leftrightarrow N_2(B) + e^-$	30.	$NO + e^- \leftrightarrow NO(C) + e^-$
11.	$N_2(A) + e^- \leftrightarrow N_2(B) + e^-$	31.	$NO + e^- \leftrightarrow NO(D) + e^-$
12.	$N_2 + e^- \leftrightarrow N_2(C) + e^-$	32.	$N_2^+(B) \rightarrow N_2^+$
13.	$NO(A) \rightarrow NO$	33.	$N_2^+ + e^- \leftrightarrow N_2^+(A) + e^-$
14.	$NO(B) \rightarrow NO$	34.	$N_2^+ + e^- \leftrightarrow N_2^+(B) + e^-$
15.	$NO(C) \rightarrow NO$	35.	$N_2^+(A) + e^- \leftrightarrow N_2^+(B) + e^-$
16.	$NO(D) \rightarrow NO$	36.	$N_2 + N_2^+ \leftrightarrow N_2^+(B) + N_2$
17.	$NO + e^- \leftrightarrow NO(A) + e^-$	37.	$O_2(SR) \rightarrow O_2$
18.	$NO + N_2(A) \leftrightarrow NO(A) + N_2$	38.	$O_2 + e^- \leftrightarrow O_2(SR) + e^-$
19.	$NO + O_2 \leftrightarrow NO(A) + O_2$	39.	$O + O \rightarrow O_2(SR)$
20.	$NO + O \leftrightarrow NO(A) + O$		

В таблице 6 приведены константы скоростей этих реакций, записанные так, как и в таблице 3. Для излучательных переходов в качестве констант скоростей указаны времена жизни верхнего возбужденного состояния.

Таблица 6

№	A	B	C	D	E	F
1.	$1.0 \cdot 10^{15}$	0	71600	$1.5 \cdot 10^{14}$	0	
2.	$1.8 \cdot 10^{14}$	0	71600	$3.0 \cdot 10^{13}$	0	
3.	$4.0 \cdot 10^{13}$	-0.5	71600	$6.0 \cdot 10^{12}$	-0.5	
4.	$5.0 \cdot 10^{14}$	-0.5	71600	$7.5 \cdot 10^{13}$	-0.5	
5.	$6.0 \cdot 10^{18}$	-1.0	41000		-0.5	
6.				$1.3e^{-5}$		
7.				$3.7e^{-8}$		
8.	$6.9 \cdot 10^{11}$	0.5	13600	$3.0 \cdot 10^{16}$	0.5	
9.	$2.6 \cdot 10^{15}$	0	30000	$3.0 \cdot 10^{14}$	0	
10.	$1.8 \cdot 10^{13}$	0.5	85800	$8 \cdot 10^{12}$	0.5	
11.	$1.5 \cdot 10^{13}$	0.5	13600	$1.0 \cdot 10^{13}$	0.5	
12.	$2.1 \cdot 10^{14}$	0.5	128200	$2.7 \cdot 10^{13}$	0.5	
13.				$2 \cdot 10^{-7}$		
14.				$2.1 \cdot 10^{-6}$		
15.				$5 \cdot 10^{-8}$		
16.				$2.6 \cdot 10^{-8}$		
17.	$7.4 \cdot 10^{11}$	0.5	63500	$2.1 \cdot 10^{12}$	0.5	
18.	$4.0 \cdot 10^{13}$	0	0	$8.0 \cdot 10^{14}$	0	8000
19.	$1.7 \cdot 10^{13}$	0	63500	$5.0 \cdot 10^{13}$	0	
20.	$3.0 \cdot 10^{13}$	0	63500	$1.0 \cdot 10^{13}$	0	
21.	$3.0 \cdot 10^{12}$	0.5	63500	$9.0 \cdot 10^{12}$	0.5	
22.	$2.4 \cdot 10^{12}$	0.5	65700	$8.8 \cdot 10^{11}$	0.5	
23.	$4.4 \cdot 10^{12}$	0.5	0	$8.8 \cdot 10^{11}$	0.5	
24.	$7.0 \cdot 10^{15}$	-0.5	65400	$2.5 \cdot 10^{15}$	-0.5	

25.	$1.0 \cdot 10^{12}$	0	65400	$3.0 \cdot 10^{11}$	0	
26.	$2.7 \cdot 10^{13}$	-0.5	65400	$.3 \cdot 10^{13}$	-0.5	
27.	$5.4 \cdot 10^{11}$	0.5	65400	$2.0 \cdot 10^{12}$	0.5	
28.	$7.56 \cdot 10^{12}$	0.5	75000	$7.56 \cdot 10^{12}$	0.5	
29.	$7.56 \cdot 10^{12}$	0.5	76400	$1.51 \cdot 10^{13}$	0.5	
30.	$7.2 \cdot 10^{13}$	0.5	75000	$7.2 \cdot 10^{13}$	0.5	
31.	$7.2 \cdot 10^{13}$	0.5	76400	$1.44 \cdot 10^{14}$	0.5	
32.				$5.8 \cdot 10^{-8}$		
33.	$1.3 \cdot 10^{14}$	0.5	13200	$6.5 \cdot 10^{13}$	0.5	
34.	$3.8 \cdot 10^{14}$	0.5	36630	$3.8 \cdot 10^{14}$	0.5	
35.	$2.6 \cdot 10^{14}$	0.5	23430	$5.2 \cdot 10^{14}$	0.5	
36.	$1.5 \cdot 10^{14}$		36630	$1.3 \cdot 10^{14}$	0	
37.				$4 \cdot 10^{-8}$		
38.	$2.0 \cdot 10^{14}$	0.5	71000	$2.0 \cdot 10^{14}$	0.5	
39.	$4.3 \cdot 10^6$	0	14500	0		

Заселённости электронных состояний молекул получены путём решения определяющего уравнения для каждого состояния с учётом конвекции. Проведены также расчеты заселенностей электронных состояний в предположении термодинамического равновесия с основным состоянием при местной поступательной температуре газа. При проведении расчетов излучения использовались данные по молекулярным константам и вероятностям колебательных и электронных переходов в соответствии с работами [1, 14]. Спектральное распределение молекулярных полос рассчитывалось с использованием приближенной модели едва перекрывающихся линий [1]. Расчет суммарного излучения от ударного слоя проводился в приближении тонкого оптического слоя, т.е. поглощение излучения не учитывалось. В рассматриваемых условиях для спектра молекулярных полос данное приближение справедливо.

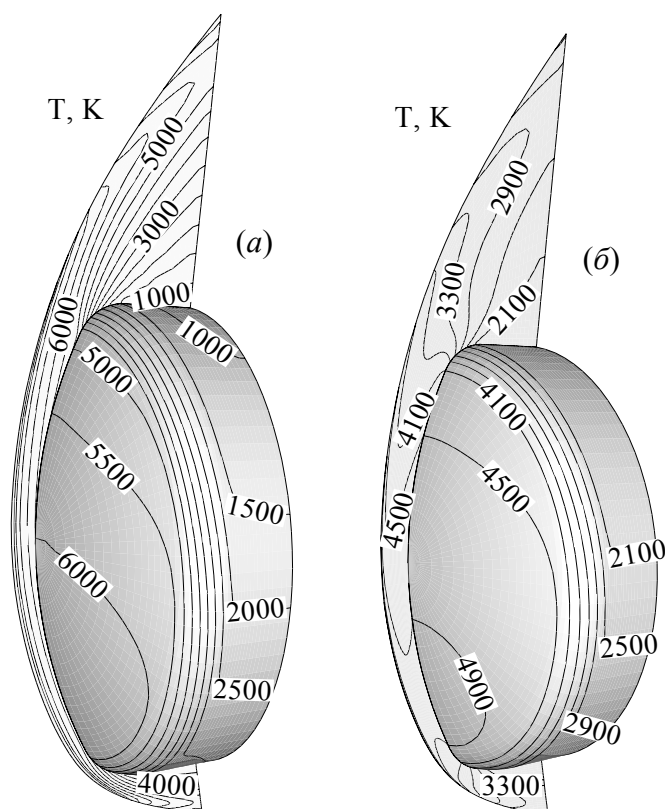


Рис.8.

Расчёты выполнены для участка траектории входа СА «Союз-ТМА» в атмосферу Земли в диапазоне высот 80.5 – 42.6 км, когда процессы диссоциации, ионизации, возбуждения внутренних степеней свободы имеют переходной характер, от сильно неравновесного, к почти равновесному состоянию. На меньших высотах эти процессы протекают равновесным образом, на больших высотах – сильно замедлены (заморожены). Параметры траектории и характеристики атмосферы, для которых были выполнены расчеты, приведены в таблице 1.

На рис.8а представлены изолинии температуры с шагом $\Delta T = 500$ К в ударном слое на лобовой и части боковой сторон, а также у поверхности СА «Союз-ТМА» для верхнего участка траектории ($H = 70.1$ км). Температура в ударном слое на лобовой стороне резко уменьшается от ударной волны к поверхности аппарата в результате протекания процессов диссоциации и ионизации. Так на критической линии температура падает примерно от 21000 до 6200 К. Причем основное падение температуры происходит около самой ударной волны – более чем на 10000 К на расстоянии 0.1 толщины ударного слоя. Напротив, в продольном направлении градиенты температуры в ударном слое значительно меньше. Например, на самой поверхности – от 6200 до 5000 К. При развороте потока около угловой кромки температура уменьшается, особенно значительно на подветренной стороне (примерно в 5 раз – от 5000 до 1000 К). На лобовой стороне благодаря большому углу атаки T падает не так резко – приблизительно в 1.5 раза.

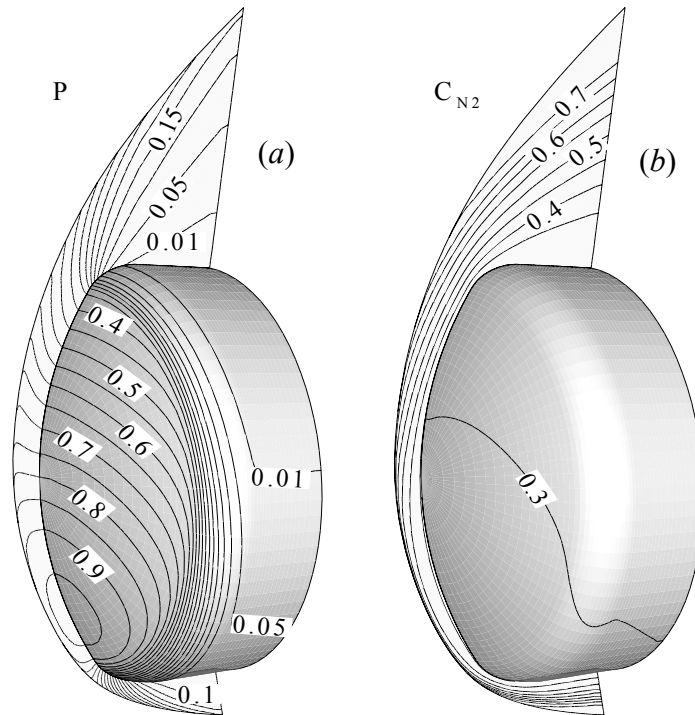


Рис.9.

Аналогичная картина изолиний температуры с шагом $\Delta T = 400$ К для нижнего участка траектории ($H = 45.6$ км) представлена на рис.8*b*. Уровень T в ударном слое в этом случае заметно меньше в связи с уменьшением скорости аппарата с 7.5 до 4.5 км/сек. В отличие от высоты 70.1 км температура в основной части ударного слоя на лобовой стороне практически постоянна по нормали к поверхности за исключением ближайшей окрестности ударной волны. Это означает, что процессы диссоциации, имевшие сильно неравновесный характер и приводившие к уменьшению температуры поперек ударного слоя на больших высотах, на меньших высотах находятся в равновесии. Падение температуры при развороте у кромки с лобовой стороны составляет около 1.5 раза, т.е. примерно столько же, что и на высоте 70.1 км. Уменьшение T при развороте с подветренной стороны составляет около 2 раз, что значительно меньше, чем на 70.1 км, где оно составляло примерно 5 раз. Это различие вероятно вызвано меньшей степенью диссоциации.

Изолинии давления $P/\rho_\infty U_\infty^2$ и массовой концентрации молекул N_2 для высоты 70.1 км представлены на рис.9. Видно, что на лобовой поверхности от критической точки к кромке давление падает примерно вдвое – с 0.95 до 0.4. Изменение давления поперек ударного слоя почти на всей лобовой поверхности составляет несколько процентов. Только возле кромки с подветренной стороны оно достигает 20 – 30%. При развороте потока у кромки давление падает до 0.1 и 0.01 на лобовой и подветренной стороне соответственно. В рассмотренном диапазоне условий распределение давления в ударном слое (в особенности на лобовой поверхности) почти не зависит от высоты.

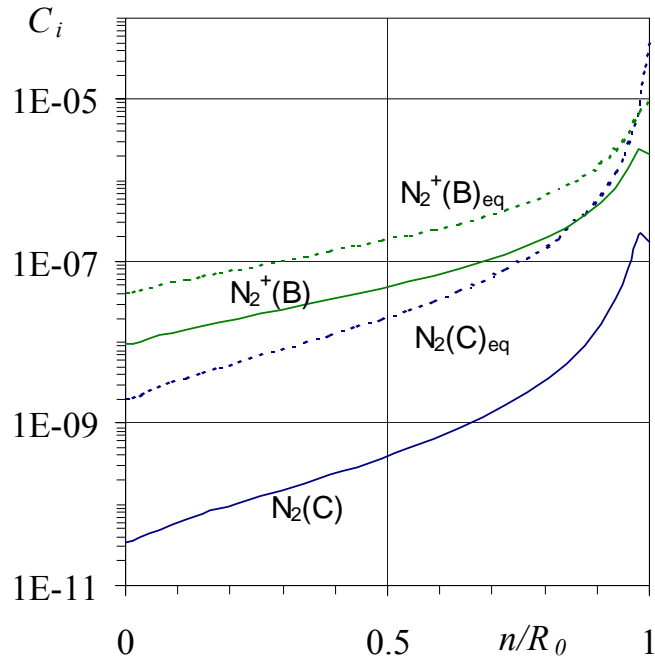
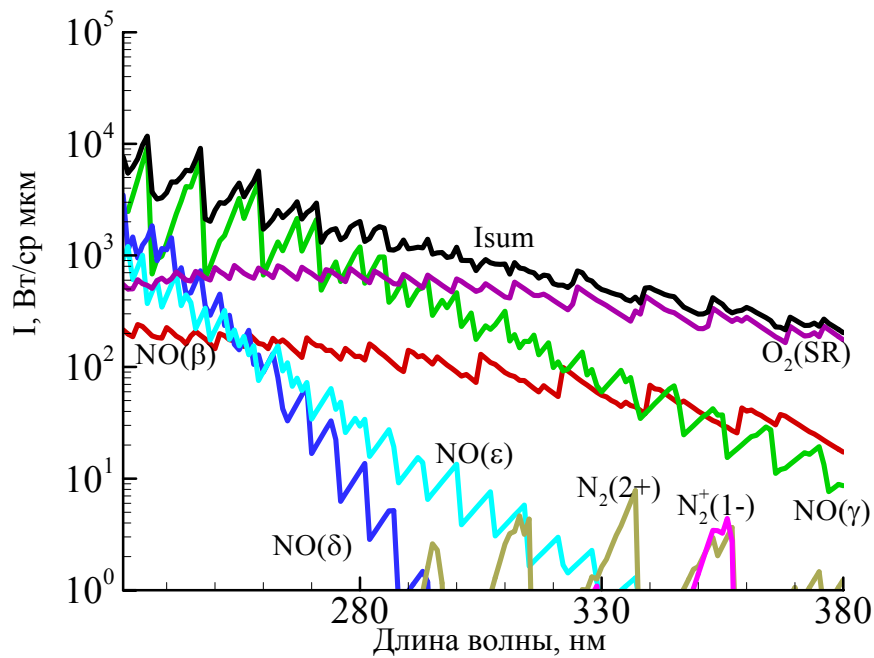


Рис.10

На рис.10 приведены распределения массовых концентраций электронных уровней $N_2(C^3\Pi_u)$, 2-я положительная полоса, и $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$, 1-я отрицательная полоса, поперек ударного слоя на критической линии при $H=70.1$ км. Сплошные и пунктирные кривые – расчет в неравновесном и локально равновесном приближении. Видно, что в рассматриваемых условиях заселенности данных электронных уровней существенно ниже локально равновесных значений. Отличие составляет около 1 и 2 порядков для уровней $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ и $N_2(C^3\Pi_u)$ соответственно.

Спектральная излучательная способность ϵ_λ , Вт/мкм·ср, от всего ударного слоя на лобовой поверхности СА «Союз-ТМА» на высоте 45.6 и 70.1 км в неравновесном и локально равновесном приближении представлена на рис.11а,б и 12а,б соответственно.



а) неравновесное приближение

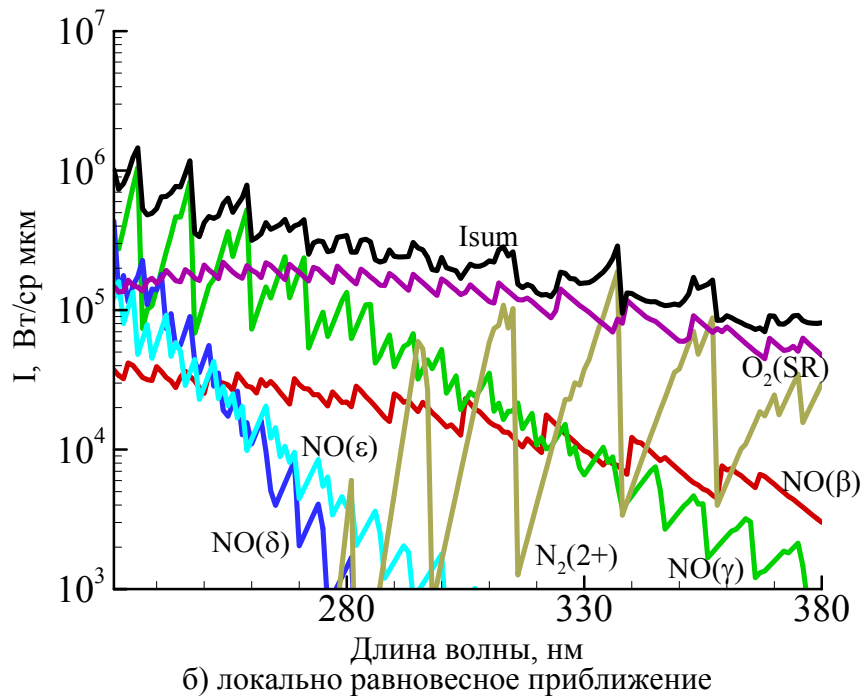
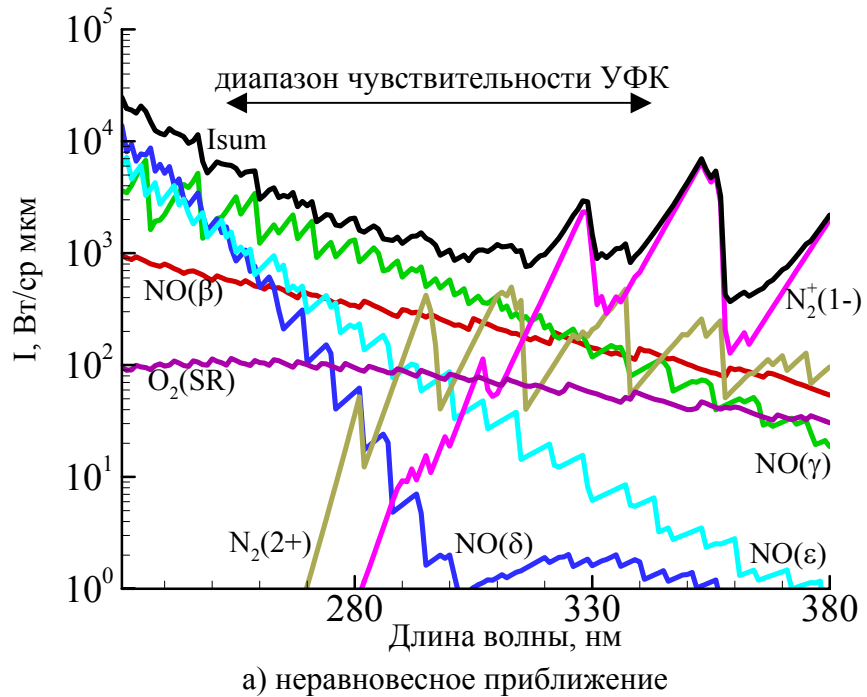


Рис.11. Спектральная излучательная способность ударного слоя, $H = 45.6$ км.



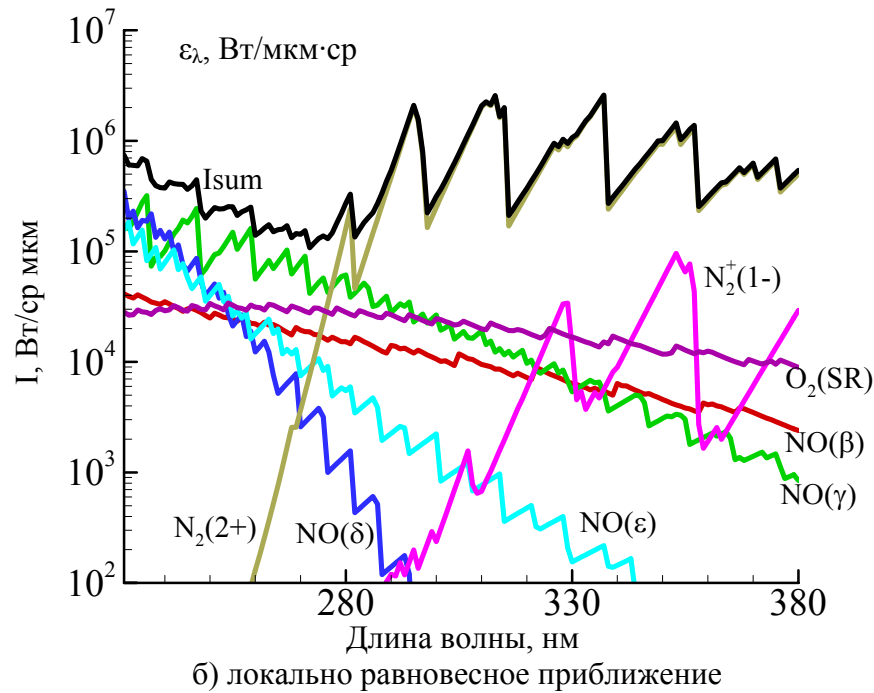


Рис.12. Спектральная излучательная способность ударного слоя, $H = 70.1$ км

На высоте 70.1 км в неравновесном случае основной вклад в излучение в рассматриваемом диапазоне дают полосы $\text{NO}(\gamma)$, $\text{N}_2(2+)$ и $\text{N}_2^+(1-)$. В окрестности 230-300 нм существенны также полосы $\text{NO}(\beta)$ и $\text{O}_2(\text{SR})$. В локально равновесном приближении относительный вклад полос в целом сохраняется, за исключением полосы $\text{N}_2^+(1-)$, вклад которой незначителен. Однако абсолютные значения интенсивности примерно на два порядка выше.

Таблица 7

$H, \text{ km}$	$S, \text{ km}$	η°	$I_{eq}, \text{ Вт/ср}$	$I_{noneq}, \text{ Вт/ср}$	$I_{exp}, \text{ Вт/ср}$
70.1	405	129	$1.9 \cdot 10^4$	117	113
60.7	390	129	$2.1 \cdot 10^4$	143	115
52.6	390	103	$2.3 \cdot 10^4$	182	93
45.6	390	103	$1.3 \cdot 10^4$	81	68

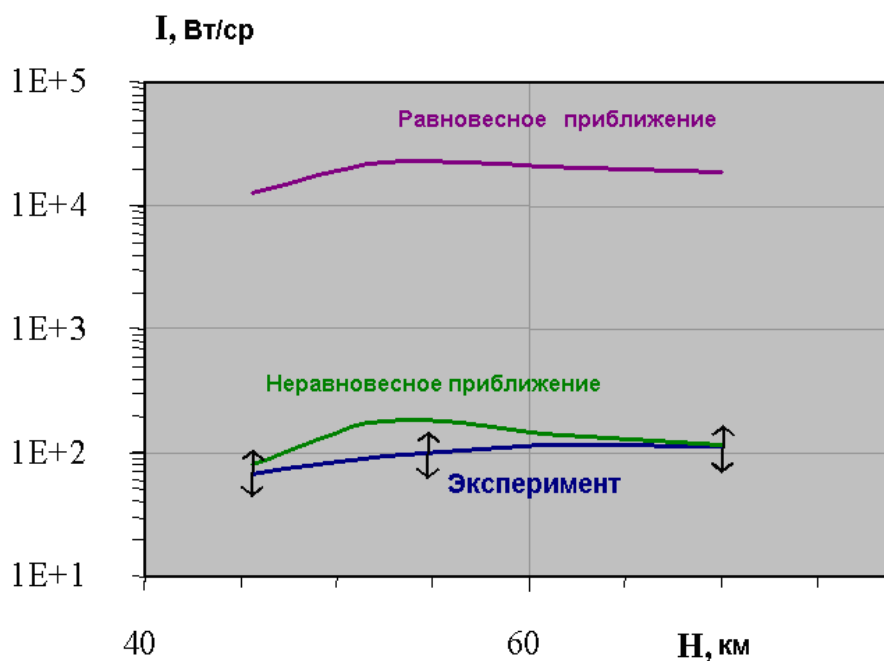


Рис.13. Интенсивность УФ излучения плазменного образования вблизи СА «Союз-ТМА»

В таблице 7 и на рис.13 приведены данные расчетов интенсивности излучения, поправленных с учетом спектральной чувствительности УФ камеры, показанной на рис.5. Там же приведены данные летных измерений. Видно, что учет столкновительных и радиационных процессов, приводящих к заселению и обеднению электронно-возбужденных уровней молекул, играет определяющую роль в рассматриваемых условиях – различие в уровнях излучательной способности в равновесном и неравновесном приближениях составляет около двух порядков. Из анализа представленных данных следует, что между расчетами в неравновесном приближении и экспериментами наблюдается удовлетворительное соответствие, если учесть, что точность измерений составляет примерно 30%.

Выводы.

- Показана возможность радиометрических измерений в УФ диапазоне длин волн плазменных образований около аппаратов, входящих в атмосферу Земли, с борта Международной космической станции.
- Разработана методика проведения такого рода космических экспериментов и оборудование для ее реализации. На примере регистрации УФ-излучения около СА «Союз - ТМА» показано, что регистрация излучения может проводиться в широком диапазоне условий (высоты $H = 100 - 30$ км, скорости $V = 7.6 - 4$ км/с) и с расстояний до 500 км. Полученные данные использовались для верификации и усовершенствования термохимической и радиационной модели высокотемпературного воздуха.
- Показано, что учет процессов заселения и тушения возбужденных электронных состояний молекул весьма важен в рассматриваемых условиях – различие между теоретическими значениями силы излучения в равновесном и неравновесном приближениях достигают двух порядков величины.
- Из анализа представленных данных следует, что удовлетворительное согласие между теоретическими и экспериментальными значениями получено только в неравновесном приближении.
- Полученные результаты свидетельствуют о правильности предложенной модели высокотемпературного излучающего воздуха.

Литература

1. Каменщиков В.А., Пластинин Ю.А., Николаев В.М., Новицкий Л.А. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М. : Машиностроение, 1971, с. 440.
2. Авилова Н.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С., и др. Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука, 1970, с.320.
3. Тир Т., Георгиев С., Аллен Р. Неравновесное излучение от фронта ударной волны. В кн. :Исследование гиперзвуковых течений. Под ред. Риддела Ф.Р. М. : Мир, 1964.
4. Кекк, Кемм и др. В кн. Ударные трубы. М. : ИЛ, 1962.
5. Erdman P.W., Zipf E.C., Espy P., et al. Measurements of low-velocity bow shock ultraviolet radiation. J.Thermophysics and Heat Transfer, Vol.7, No 1, pp.37-41, 1993.
6. Erdman P.W., Zipf E.C., Espy P., et al. Measurements of ultraviolet radiation from a 5-km/s bow shock. J.Thermophysics and Heat Transfer, Vol.8, No 3, pp.441-446, 1994.
7. Levin D.A., Candler G.V., Collins R.J., et al. Examination of ultraviolet radiation theory for bow shock rocket experiment. AIAA Paper, No 92-2871, AIAA Thermophysics Conference, 1992.
8. Gorelov V.A., Gladyshev M.K., Kireev A.Y., Yegorov I.V., Plastinin Yu.A., Karabadzhak G.F. Experimental and numerical study of nonequilibrium ultraviolet NO and N_2^+ emission in shock layer. J.Thermophysics and Heat Transfer, Vol.12, No 1, pp.1-8, 1997.
9. Vlasov V.I., Gorshkov A.B., Kovalev R.V., Plastinin Yu.A. Theoretical studies of air ionization and NO vibrational excitation in low density hypersonic flow around re-entry bodies. AIAA Paper, No 97-2582, 1997.
10. Plastinin Yu. A., Vlasov V.I., Gorshkov A.B., Kovalev R.V., Kuznetsova L.A. Analysis of nonequilibrium radiation for low density hypersonic flows at low to moderate velocities. AIAA Paper, No 98-2466, 1998.
11. Anfimov N.A., Karabadzhak G.F., Plastinin Yu.A. Investigations of Interaction Characteristics of Exhaust Products of Liquid-Propellant Engines with the Earth Upper Atmosphere Layers during the "Relaxation" Space Experiments Series onboard "Mir" Orbital Station. Cosmonautics and Rocket Engineering, No 21, 2004. (in Russian).
12. Yoon S., Jameson A. An LU-SSOR scheme for the Euler and Navier-Stokes equations. AIAA Paper, No 87-0600, 11 p, 1987.
13. Gorshkov A.B. Calculation of base heat transfer behind thin cone-shaped bodies. Cosmonautics and Rocket Engineering. 1997, No 11, pp.13-20.
14. Kuznetsova L.A., Kuz'menko N.E., Kuzyakov Yu.A., Plastinin Yu.A. Probabilities of optical transitions of diatomic molecules, Moscow, Nauka, 1971 (in Russian).