

Член-корреспондент АН СССР К. Я. КОНДРАТЬЕВ, Н. Ф. РОМАНТЕЕВ,
О. И. СМОКТИЙ, Е. В. ХРУПОВ

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭФФЕКТА НОЧНОГО СВЕТЯЩЕГОСЯ СЛОЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

В качестве возможного опорного ориентира при автономной навигации и ориентации в полетах вокруг Земли предполагалось использовать линию истинного горизонта (1). Однако результаты наблюдений с борта КК показывают, что дневной горизонт Земли размыт атмосферной дымкой, а сумеречный горизонт не всегда удается четко фиксировать из-за наличия облачности (2-7). В настоящем сообщении описывается наблюдение светящегося слоя на ночной стороне Земли во время полета КК «Союз-5» 15 I 1969 г. Существование довольно четкой и устойчивой верхней границы этого слоя позволяет предположить, что ее можно использовать в интересах навигации и ориентации КК при полетах на околоземных орбитах.

Когда КК «Союз-5» находился в тени Земли, то над ночным горизонтом по дуге в пределах углов $A = 80-280^\circ$ (от направления на Солнце) наблюдался светящийся слой пепельно-серого цвета. Верхняя граница этого слоя слегка размыта, но была достаточно четкой, что позволяло фиксировать ее невооруженным глазом. Вблизи видимого горизонта Земли и на верхней границе светящегося пепельного слоя наблюдаются узкие светлые полосы повышенной яркости. В средней части пепельного слоя видимая яркость уменьшается и сохраняется постоянной.

Звезды (при нахождении наблюдателя в тени Земли) видны в виде светлых точек без расходящихся лучей, созвездия опознавались без затруднений, в частности, легко были опознаны Большая Медведица, Кассиопея, Возничий, Южный Крест и др. При заходе за видимый горизонт Земли звезда пропадает довольно резко, быстро исчезая. Касание звездой верхнего края светящегося слоя фиксируется с точностью ~ 1 сек. из-за размытости его границы. При прохождении звезды через светящийся пепельный слой ее цвет изменялся от беловатого до желтоватого, а яркость уменьшалась примерно в 2-2,5 раза, оставаясь постоянной внутри слоя. Это свидетельствует об однородной яркостной структуре пепельного слоя в вертикальном направлении (разумеется, за исключением его верхней и нижней границ).

За 2-3 мин. до выхода КК из области тени пепельный слой на ночной стороне Земли бледнеет, появляется светло-голубой ореол, который постепенно становится все ярче и светлее над горизонтом. Затем над краем горизонта в надсолнечной области появляется розовая полоска с красноватой вертикальной «черточкой», быстро превращающейся в светящийся овал, который в дальнейшем виден как часть диска Солнца, постепенно поднимающегося над горизонтом. Восход Солнца можно наблюдать невооруженным глазом, когда оно видно на $1/2$ своего диаметра над горизонтом, затем появляется яркий ослепляющий свет прямых солнечных лучей.

Использование слоев яркости или верхней границы светящегося пепельного слоя в качестве искусственного горизонта требует знания их точных угловых размеров и определения высоты слоя. Основой для расчета

толщины опорного навигационного слоя может служить время прохождения каким-либо светилом этого слоя. Исходными данными для определения высоты этого слоя являются следующие текущие параметры орбиты корабля: географические координаты подспутниковой точки; время наблюдения и высота орбиты КК; экваториальные и орбитальные координаты светила; положение КК на орбите (номер витка, время и долгота восходящего узла орбиты).

Высота орбиты КК, географические координаты подспутниковой точки и положение КК на орбите определяются по баллистическим данным. Экваториальные координаты светила берутся на момент наблюдения и пересчитываются в орбитальные координаты.

Во время полета КК «Союз-5» перед восходом Солнца (угол захода Солнца за горизонт $\sim 2^\circ$) было измерено время прохождения пепельного слоя звездой Нат, β Тельца (звездная величина $m = 1,78$). Оно составило $t = 67$ сек. Измерение было проведено на 5 витке полета «Союз-5» 15 I 1969 г. Звезда коснулась слоя и прошла его, зайдя за горизонт Земли в 16 час. 53 мин. 17 сек. московского времени.

Координаты полюса орбиты были $\alpha_p = 140^\circ$; $\delta_p = 38^\circ 36'$. Географические координаты в момент наблюдения звезды β Тельца были $\varphi = 51^\circ$ ю. ш. и $\lambda = 163^\circ$ в. д. Экваториальные и орбитальные координаты

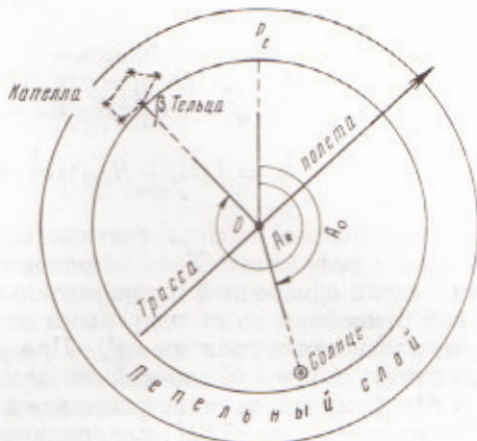


Рис. 1. Расположение светил в горизонтальной системе координат: P_c — направление на север; A_{\odot} — азимут точки восхода Солнца, $A_{\odot} = 166^\circ$; A_* — азимут звезды Нат (β Тельца), $A_* = 319^\circ$

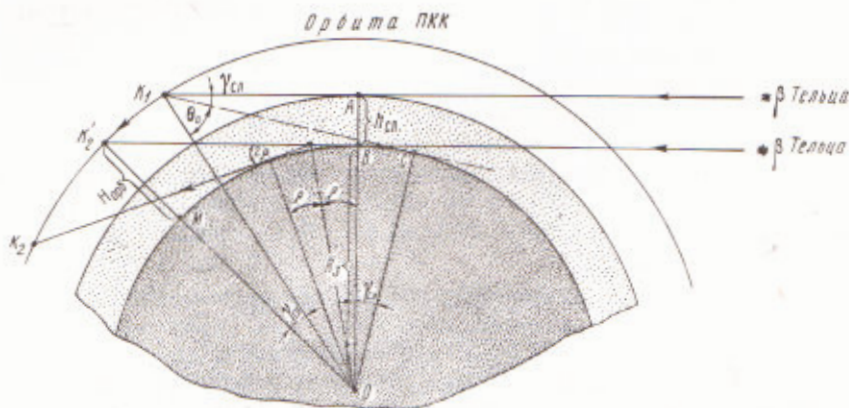


Рис. 2. Схема определения высоты светящегося слоя

Солнца составляли $\alpha_{\odot} = 297^\circ 12'$; $\delta_{\odot} = -21^\circ 06'$; $\alpha_{\odot}' = +30^\circ$; $\delta_{\odot}' = -63^\circ$. Соответствующие величины для β Тельца равны $\alpha_* = 81^\circ 05'$; $\delta_* = +28^\circ 35'$; $\alpha_*' = 172^\circ$; $\delta_*' = +38^\circ$. Орбитальная угловая скорость КК «Союз-5» составляла в момент измерения $\omega = 4,05$ град/мин.

С учетом орбитального склонения звезды β Тельца ($\delta_*' = +38^\circ$) определяем угловой размер светящегося слоя (рис. 2):

$$\gamma_{сл} = \omega t \cos \delta_*' = 3^\circ 34'. \quad (1)$$

Поскольку высота орбиты КК «Союз-5» в момент измерения составляла $H_{орб} = 253$ км, то угловой размер радиуса Земли (рис. 2)

$$\theta_0 = \arcsin \frac{R_3}{R_3 + H_{орб}} = 74^{\circ}07', \quad (2)$$

где R_3 — средний радиус Земли.

С учетом (1), (2) из простых геометрических соотношений получаем, что высота $h_{сл}$ светящегося слоя на ночной стороне Земли

$$h_{сл} = [(R_3 + H_{орб}) \sin(\theta_0 + \gamma_{сл})] - R_3 \simeq 100 \text{ км.} \quad (3)$$

Определение высоты светящегося слоя по (3) проведено без учета влияния рефракции. Учет астрономической рефракции проведем, исходя из модели однородной в горизонтальном направлении слоистой сферической атмосферы со стандартными вертикальными профилями температуры, плотности и давления (⁸). При этом зависимостью угла рефракции ρ от длины волны λ в видимой области спектра можно пренебречь (⁹).

Примем, что угол астрономической рефракции на уровне горизонта Земли равен $\rho = 35'21''$, т. е. полное отклонение луча визирования у истинного горизонта составляет $2\rho = 70'42''$ (¹⁰⁻¹¹). Однако при прохождении светящегося пепельного слоя звезда может заходить не за истинный горизонт Земли, а визуально «гаснуть» на некотором уровне выше горизонта из-за рассеяния и поглощения света в нижних слоях атмосферы. В этом случае угол астрономической рефракции и полное отклонение луча визирования при наблюдении светила из космоса будет меньше, чем на уровне истинного горизонта.

Используя данные (¹¹) о зависимости угла астрономической рефракции ρ от высоты перигея линии визирования h_0 , были рассчитаны толщины светящегося пепельного слоя на ночной стороне Земли:

$$h_{сл} = (R_3 + H_{орб}) \sin \left[\omega t \cos \delta'_* - 2\rho(h_0) + \arcsin \frac{R_3 + h_0}{R_3 + H_{орб}} \right] - R_3. \quad (4)$$

Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

h_0 , км	0	3	5	8	10	12	15	20	25
$h_{сл}$, км («Союз-5»)	70,4	81,4	87,4	94	97,5	102,6	107,2	113,8	118,5
$h_{сл}$, км («Союз-9»)	67,7	77,6	82,9	89,5	92,6	97,4	100,7	106,6	112,6

Если принять, что в видимой области спектра пороговый контраст яркостей звезды β Тельца и атмосферного фона при наблюдении с высоты 250 км достигается на уровне 5—10 км, то истинная толщина ночного слоя равна $h_{сл} \simeq 85-95$ км. По данным, любезно предоставленным авторам В. Н. Сергеевичем, при наблюдении звезды β Тельца с высоты $H_{орб} = 250$ км ее яркость достигает пороговой величины ($m \simeq 5-6$) для стандартной модели земной атмосферы в среднем на высоте $h_0 = 8$ км. Следовательно, согласно табл. 1 («Союз-5»), верхняя граница светящегося пепельного слоя на ночной стороне Земли, в среднем, должна располагаться на высоте 94 км.

Следует отметить, что явление светящегося пепельного слоя на ночной стороне Земли наблюдалось и ранее (⁴⁻⁶). Описание этого явления по результатам полета КК «Союз-9» (январь 1970 г.) дано в (⁷). Толщина светящегося пепельного слоя определялась на КК «Союз-9» измерением времени прохождения планеты Венера (звездная величина $m = -4,11$) через этот слой ($t = 54,8$ сек. и $h_{сл} = 94,8$ км без учета влияния рефракции).

Источник	Диапазон длин волн (Å) и квантовый переход	Географическое место	Время	Высота максиму- ма свече- ния, км	Ширина излу- чающего слоя на половине максимума объём- ной интенсивности свечения, км
(12)	8305—8455 (6→2)	75° с. ш.	26 X 1969	95	15
(13)	7210—7450 (8→3)	32° с. ш. Уайт-Сандс Нью-Мехико	28 IV 1966	97	20
(14)*	7220—7370 (8→3) 7400—10 200	То же » »	6 XI 1959	90 83	15 25

* Оба измерения проведены в одном запуске.

Высота орбиты КК «Союз-9» в момент измерений составляла $H_{орб} = 220$ км. Орбитальное склонение Венеры было мало ($\delta_v' \sim 2^\circ$), поэтому в (7) при расчете толщины светящегося слоя не учитывалось. Результаты нашего расчета высоты верхней границы ночного светящегося слоя при учете рефракции по данным полета КК «Союз-9» также приведены в табл. 1.

Результаты независимого определения высоты ночного светящегося слоя с КК «Союз-5» и «Союз-9» свидетельствуют о том, что явление ночного светящегося слоя устойчиво по времени, не зависит от географического расположения наблюдателя и имеет фиксированный вертикальный масштаб. Вполне возможно, что явление светящегося слоя вызвано излучением гидроксила (ОН) в ночных условиях. В табл. 2 приведены результаты ракетных измерений (12–14) высот ночных светящихся слоев ОН, которые соответствуют определенной выше толщине светящегося ненельного слоя. Выяснению природы описанного явления будет способствовать спектрофотометрирование из космоса ночной атмосферы Земли в области светящегося слоя.

Следует также подчеркнуть преимущество использования наблюдений этого явления для целей автономной навигации и ориентации космических кораблей на околоземных орбитах, поскольку космонавт достаточно четко видит край светящегося слоя в условиях значительной контрастности ночного неба и отсутствия помех, вызванных рассеянием света как в земной атмосфере, так и в самом слое.

Поступило
20 IV 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ C. Gray, AIAA Paper, № 869 (1969). ² К. Я. Кондратьев, А. П. Гальцев, О. И. Смоктий, Е. В. Хрунов, ДАН, 191, № 4 (1970). ³ К. Я. Кондратьев, Б. В. Волюнов, А. П. Гальцев, О. И. Смоктий, Е. В. Хрунов, Изв. АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана, 6, № 4 (1970). ⁴ J. H. Glenn, J. A. O'Keefe, Science, 136, № 3522 (1962). ⁵ Manned Space Flight Experiments Symposium, Gemini Missions III and IV NASA, Washington, Oct. 18–19, 1965. ⁶ К. П. Феофанов, Г. В. Розенберг и др., Сборн. Исследование космического пространства, «Наука», 1965. ⁷ К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, В. И. Севастьянов, О. И. Смоктий, ДАН, 197, № 3 (1971). ⁸ С. Н. Блажко, Курс сферической астрономии, 1954. ⁹ Г. В. Розенберг, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 13, № 5 (1949). ¹⁰ К. У. Аллен, Астрофизические величины, ИЛ, 1960. ¹¹ Ф. Линк, Лунные затмения, ИЛ, 1962. ¹² A. W. Harrison, Canad. J. Phys., 48, № 19, 2231 (1970). ¹³ D. J. Baker, R. O. Waddoujs, J. Geophys. Res., 72, № 19, 4881 (1967). ¹⁴ D. M. Packer, Ann. Geophys., 17, № 1, 67 (1961).