

МОДЕЛЬ ЯРКОСТИ НОЧНОГО БЕЗОБЛАЧНОГО НЕБА

О.П.Кузнечик, В.Н.Горенков, О.О.Кузнечик

Обсерватория БГУ, 4 пр. Ф. Скорины, 220050 Минск, Беларусь

SUMMARY: The night sky model is proposed. It includes different components of light pollution, such as moon scattered light, Zodiacal light, Milky Way, air glow and artificial light pollution. The model is designed for calculating of the efficiency of astronomical installations.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая яркость ночного безоблачного неба в видимой области спектра обусловлена рассеянным светом Луны, свечением ночного неба и световым загрязнением от близлежащих населенных пунктов.

Свечение ночного неба возникает в атмосфере Земли (собственное ночное свечение атмосферы, полярные сияния), в межпланетном пространстве (зодиакальный свет, противосияние), порождается фоном неразрешаемых и разрешимых звезд, рассеянием на межзвездной пыли в нашей Галактике, приходит из глубин Вселенной. Исследование отдельных составляющих свечения ночного неба дает много сведений о верхней атмосфере Земли, о строении Галактики, об эволюции Вселенной.

Каждая, из перечисленных выше составляющих, вносит свой вклад в интегральную яркость ночного безоблачного неба. Для расчетов интегральной яркости нами предлагается следующая модель /1, 2/.

1. МОДЕЛЬ

1.1. Модель рассеянного света Луны

В видимой области спектра излучение Луны является отраженным светом Солнца. Спектральная яркость L_{λ} участка ночного безоблачного неба, обусловленного рассеянным лунным светом, зависит от фазы Луны α , зенитного угла Луны Z_{Δ} , зенитного угла участка неба Z , угла между Луной и участком неба φ , спектральной оптической толщи атмосферы $\tau_{1,\lambda}$, спектрального альbedo подстилающей поверхности q_{λ} . Распределение этой яркости, по аналогии с Солнцем /3, 4/, описывается следующими соотношениями: при $Z_{\Delta} \neq Z$

$$L_{\lambda} = E_{\Delta, n, \lambda} f(\alpha) \mu_n(\gamma) \tau_{1,\lambda}^{-1} \{ \exp(-\tau_{1,\lambda} \sec Z) - \exp(-\tau_{1,\lambda} \sec Z_{\Delta}) \} (\sec Z_{\Delta} - \sec Z)^{-1} \sec Z, \quad (1)$$

$$\text{при } Z_{\Delta} = Z \quad L_{\lambda} = E_{\Delta, n, \lambda} f(\alpha) \mu_n(\gamma) \exp(-\tau_{1,\lambda} \sec Z_{\Delta}) \sec Z_{\Delta}, \quad (2)$$

$$\mu_n(\gamma) = f_1(\gamma) + f_2(\gamma) + f_4(\gamma), \quad (3)$$

где $E_{\Delta, n, \lambda}$ - спектральная освещенность от Луны на верхней границе земной атмосферы, $f(\alpha)$ - закон фаз, γ - угол рассеяния, $\mu_n(\gamma)$ - индикатриса яркости, $f_1(\gamma)$ - индикатриса рассеяния, $f_2(\gamma)$ и $f_4(\gamma)$ - члены обусловленные соответственно многократным рассеянием и отражением света от подстилающей поверхности.

Как показали наши измерения и расчеты [1], при спектральной прозрачности атмосферы $p_{\lambda} \geq 0.7$, приведенной к атмосферной массе $m = 2$ ($Z = 60^{\circ}$), распределение относительной спектральной яркости безоблачного неба, обусловленной рассеянным светом Луны, описывается достаточно точно соотношением:

$$L_{\lambda, \lambda'}^{-1} = [1 - \exp(-0.32 \sec Z)] [0.91 + 10 \exp(-3\phi) + 0.45 \cos^2 \phi] \{ 0.274 [0.91 + 10 \exp(3 Z_{\Delta}) + 0.45 \cos^2 Z_{\Delta}] \}^{-1}, \quad (4)$$

где $L_{\lambda, \lambda'}$ - спектральная яркость неба в зените.

1.2. Модель звездной составляющей

Яркость звезд, пространственно концентрирующихся у Млечного Пути, удобнее всего вычислять в галактических координатах (l - галактическая долгота, b - галактическая широта).

В Млечном Пути распределение яркости иррегулярно: в нем присутствуют, как крупномасштабные образования с характерными размерами по галактической долготе $\sim 100^{\circ}$ и по галактической широте $\sim 10^{\circ}$, так и мелкомасштабные - с характерными размерами $\sim 5^{\circ}$, в которых яркость может отличаться для отдельных фрагментов в 2 раза по сравнению с окружающими. В основном, эти вариации обусловлены, темными туманностями в окрестности Солнца и "дырами" межзвездной поглощающей материи. Для полного учета всех мелко масштабных вариаций необходимо использовать детальные карты распределения яркости в Млечном Пути с несколькими сотнями фрагментов. Поскольку мелко масштабные вариации занимают $\approx 5-7\%$, то ими можно пренебречь и в модели использовать только крупномасштабное распределение яркости в Млечном Пути, представляемое 9-ю фрагментами. В пределах каждого из фрагментов яркость предполагается постоянной. Максимальные отклонения от аппроксимации наблюдаются в экваториальной плоскости Млечного Пути и обусловлены его кластерной структурой. На участках, не превышающих размеры $5 \times 5^{\circ}$, относительная ошибка предлагаемой аппроксимации составляет 12 и 18% в системах В и V соответственно.

Вне Млечного Пути ($b < -25^{\circ}$, $b > 17^{\circ}$) яркость звездной компоненты хорошо описывается простыми аналитическими соотношениями:

$$L_{0, \text{с. зв. В}} = 14.7 \operatorname{cosec} |b| - 2.3 \quad (5)$$

$$L_{0, \text{с. зв. V}} = 30.6 \operatorname{cosec} |b| - 6.1.$$

Податмосферная яркость определяется соотношением:

$$L_{\text{с. зв. В}} = L_{0, \text{с. зв. В}} p^{\sec Z}, \quad (6)$$

где p - коэффициент прозрачности атмосферы.

1.3. Зодиакальный свет

Зодиакальный свет обусловлен рассеянием солнечного света на межпланетной пыли. Его яркость зависит от эклиптических координат и углового расстояния от

Солнца. Яркость зодиакальной составляющей распределена по небу в виде конуса, ширина и яркость которого увеличиваются от зенита к западному горизонту перед вечерними сумерками и к восточному горизонту - перед утренними.

На основе распределений яркости зодиакального света получено аналитическое соотношение (7), аппроксимирующее распределение яркости зодиакального света. Максимальное отличие аппроксимации от наблюдений не превышает 2 %, а среднее квадратическое отклонение ~ 0.8 % .

$$L_{0, \epsilon, \text{зод}} = 9443 \xi^{-2.261} (g_1 e^{-|\beta|} + g_2) + g_3 (-95^{-1} |\xi - 180| - 0.663^{-1} |\beta|), \quad (7)$$

где $L_{0, \epsilon, \text{зод}}$ - яркость зодиакального света на верхней границе земной атмосферы; $\xi = 180 \pi^{-1} \arccos [\cos \beta \cos (\lambda - \lambda_{\odot})]$; λ_{\odot} , λ - эклиптическая долгота соответственно Солнца и наблюдаемой точки; β - эклиптическая широта; g_i - коэффициенты.

Податмосферная яркость определяется соотношением:

$$L_{\epsilon, \text{зод}} = L_{0, \epsilon, \text{зод}} p^{\sec Z} \quad (8)$$

1.4. Собственное свечение атмосферы

Собственное свечение атмосферы обусловлено фотохимическими процессами, протекающими, в основном, на высотах 80 - 100 км и 250 - 300 км.

Полярные сияния, которые носят нерегулярный характер, в модели не рассматриваются.

Спектральная яркость собственного свечения атмосферы $L_{\epsilon, \lambda, a}$ возрастает от зенита к горизонту, поскольку излучение, в основном, рождается в слое, ограниченном концентрическими сферами с центром в центре Земли, и излучающий объем на луче зрения растёт с увеличением зенитного угла

$$L_{\epsilon, \lambda, a} = L_{\epsilon, \lambda, a, Z} \sec Z, \quad (9)$$

где $L_{\epsilon, \lambda, a, Z}$ - спектральная яркость ночного неба в зените.

При отсутствии полярных сияний распределение яркости всегда пропорционально $\sec Z$. Величина $L_{\epsilon, \lambda, a, Z}$ меняется при изменении солнечной активности, геофизических факторов и с широтой.

1.5. Световое загрязнение

Обобщая результаты ряда работ, для оценки светового загрязнения $L_{\epsilon, g}$ ночного неба городом с энергетической светимостью $M_{\epsilon, g}$ на расстоянии r от наблюдателя до города, нами получено следующее соотношение:

$$L_{\epsilon, g} = M_{\epsilon, g} 2^{-1} \pi^{-1} \iint_{\Delta} h d h d \varphi \int_0^{\infty} (r^{-2} + A) F(r, l) (k_1 + k_2) dl, \quad (10)$$

$$k_i = f_i(\theta, \beta, 4^{-1} \pi^{-1}) N_i(z) N_i^{-1}(0); i = 1, 2,$$

учитывающее однократно рассеянный свет, идущий от города к наблюдателю. Функция $F = (r, l)$ учитывает ослабление света в результате его рассеяния моле-

кулами воздуха и аэрозолями. В k_i заключена информация об индикатрисах рассеяния, коэффициентах рассеяния и концентрации частиц для воздуха и аэрозолей в точке первичного рассеяния. Интегрирование проводится по площади города и по лучу зрения наблюдателя l . Для оценки были взяты приблизительные значения площади города, что мало влияет на величину энергетической яркости, рассчитанную по соотношению (10).

Энергетическую светимость города можно вычислить, если известны измеренные значения энергетических яркостей $L_{e,n,1}$ и $L_{e,n,2}$ ночного безоблачного неба при отсутствии Луны на одной и той же высоте при двух разных азимутах. Из соотношения (10) имеем:

$$M_{e,g} = (L_{e,n,1} - L_{e,n,2}) [(L_{e,g} M_{e,g}^{-1})_1 - (L_{e,g} M_{e,g}^{-1})_2]^{-1}, \quad (11)$$

где $(L_{e,g} M_{e,g}^{-1})_1$ и $(L_{e,g} M_{e,g}^{-1})_2$ - вычисленные по соотношению (10) значения $L_{e,g} M_{e,g}$ для тех же направлений.

На основании соотношения (10) и наших измерений [2] мы получили следующую эмпирическую зависимость подсветки неба в зените (в $\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) в участке спектра 0.53 мкм от числа жителей P и расстояния r (в км) от города:

$$L_{e,g} = 2 \cdot 10^{-10} P \cdot r^{-2} \exp(-0,015r) \quad (12)$$

1.6. Обобщение и оценка результатов исследований

Описанная выше модель яркости ночного неба позволяет проводить вычисление фона неба в точке наблюдения, исходя из средних эмпирических значений ряда параметров, зависящих от местных условий. Для точного учета влияния местных факторов, с целью повышения точности прогноза яркости ночного неба и повышения эффективности наблюдений, желательно измерение астроклиматических параметров непосредственно в месте наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. "Исследовать рассеянный свет Луны в видимой области спектра": Отчет о НИР (заключительный) /БГУ/: Руководитель О.П. Кузнецик.- ГР 1994591.- Мн., 1995.- 41 с.
2. "Исследование яркости ночного неба над г. Минском в видимой области спектра": Отчет о НИР (заключительный) /БГУ/: Руководитель О.П. Кузнецик.- ГР 19962640.- Мн., 1998.- 30 с.
3. Пясковская - Фесенкова Е.В. Рассеяние света в земной атмосфере. - М.: АН СССР, 1957. - 220 с.
4. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. - С.-Петербург.: Гидрометиздат, 1997.- 335 с.