

УДК 520.1; 520.16; 681.7

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

АСТРОКЛИМАТ МИНСКА

С помощью метода счета фотонов измеряется энергетическая яркость основных составляющих свечения ночного неба в направлении на галактический полюс и в зените в участках спектра 0,53 и 0,69 мкм в Минске и отдельных пунктах Минской области.

Предлагается модель яркости ночного безоблачного неба над городом, учитывающая влияние рассеянного света Луны, Млечного Пути, зодиакального света, собственного свечения атмосферы и светового загрязнения от искусственных источников света.

Введение

Повышение эффективности экспериментальных исследований в астрономии приводит к необходимости решения задач комплексной автоматизации процессов сбора, обработки данных и управления на основе ПК. Эти задачи решаются путем создания многоцелевых астрономических комплексов (АК), предназначенных для выполнения программ обнаружения, слежения и измерения астрономических объектов (АО) естественного и искусственного происхождения.

При измерениях АО рассматриваются различные аспекты астроклиматических помех, однако принципиальные и общие для всех методов измерений ограничения налагаются следующими параметрами астроклимата: наличием безоблачного (ясного) неба, прозрачностью атмосферы, яркостью фона неба и уровнем турбулентности атмосферы [1].

Априорную и текущую адаптацию АК к изменениям перечисленных параметров астроклимата можно осуществить на основе решения следующих задач:

- статистического анализа значений параметров астроклимата в различных пунктах наблюдений и определения их вероятностных характеристик;
- разработки математических моделей динамики изменения параметров астроклимата для решения задач их прогнозирования на предстоящие периоды наблюдений;
- выявления параметров астроклимата, требующих постоянного контроля при наблюдениях, для решения задач оперативного управления измерительными процессами [1].

На эффективность работы АК в первую очередь влияет яркость фона ночного неба, имеющего сложную структуру [2–7].

Повышение разрешающей способности и точности измерений АК и оптимизация метеоусловий их работы заставляет возвращаться к уже исследованным вопросам [7, 8] и искать их решение на качественно новом уровне. В связи с этим в данной работе исследовалась яркость ночного безоблачного неба в участках спектра 0,53 и 0,69 мкм в условиях Минска. Выбор этих участков для измерений был обусловлен их информативностью.

1. Экспериментальные данные

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

Свечение ночного неба возникает в атмосфере Земли (собственное ночное свечение атмосферы, полярные сияния), в межпланетном пространстве (зодиакальный свет, противосияние), порождается фоном неразрешаемых и разрешаемых звезд, рассеянием на межзвездной пыли в нашей Галактике, приходит из глубин Вселенной.

Различные составляющие свечения ночного неба связаны с разными системами координат, при этом две компоненты: собственное свечение атмосферы и полярные сияния – сильно меняются со временем. Полярные сияния можно исключить, если не проводить измерения в высоких широтах.

Основной вклад в свечение ночного безоблачного неба при отсутствии Луны вносят собственное свечение атмосферы (около 33 %), зодиакальный свет (около 44 %), звезды и другие источники нашей Галактики (около 22 %), внегалактические источники (около 1 %) [2–4]. Хотя излучение этих основных компонент перекрывается, их можно разделить, поскольку каждая из них концентрируется в определенной части небосвода: собственное свечение атмосферы – у горизонта, зодиакальный свет – в области эклиптики, звездная составляющая – в плоскости галактического диска. При этом следует отметить, что минимальные энергетические яркости зодиакального света, звездной составляющей и собственного свечения атмосферы находятся в полюсе эклиптики, галактическом полюсе и зените соответственно. Таким образом, за исключением высоких широт в течение астрономической ночи, т. е. при погружении Солнца под горизонт $\geq 18^\circ$, спектральная энергетическая яркость (СЭЯ) ночного безоблачного неба $L_{e,\lambda}$ определяется суммой следующих составляющих:

$$L_{e,\lambda} = L_{e,\lambda,l} + L_{e,\lambda,зв} + L_{e,\lambda,зо} + L_{e,\lambda,a} + L_{e,\lambda,г} + L_{e,\lambda,сз} + L_{e,\lambda,\Sigma} , \quad (1)$$

где $L_{e,\lambda,l}$ – СЭЯ, обусловленная рассеянным светом Луны; $L_{e,\lambda,зв}$ – СЭЯ звездной составляющей, определяемая суммарным свечением нерегистрируемых отдельно звезд; $L_{e,\lambda,зо}$ – СЭЯ зодиакального света, обусловленная рассеянием солнечного излучения на частицах космической пыли; $L_{e,\lambda,a}$ – СЭЯ собственного свечения атмосферы, обусловленная физико-химическими процессами; $L_{e,\lambda,г}$ – СЭЯ диффузного галактического свечения, обусловленного рассеянием света звезд межгалактической пылью, которой практически можно пренебречь; $L_{e,\lambda,сз}$ – СЭЯ неба, обусловленная световым загрязнением от искусственных источников; $L_{e,\lambda,\Sigma}$ – СЭЯ неба, обусловленная рассеянием в атмосфере всех источников излучения.

Измерения спектральной энергетической яркости ночного безоблачного неба проводились с помощью АК в Минске (географическая широта $53^\circ 54'$, географическая долгота $27^\circ 35'$, высота над уровнем моря 220 м) и Минской области (географическая широта $54^\circ 15'$, географическая долгота $27^\circ 21'$, высота над уровнем моря 257 м) в 1996–1998 гг.

Основу АК образуют два одинаковых зеркальных объектива с фокусным расстоянием 2025,2 мм + 1,5 %, относительным отверстием 1:10, пределом разрешения в центре поля зрения не более 2 угл. с.

В качестве приемников излучения применялись для участка спектра 0,53 мкм фотоумножители с охлажденными катодами в режиме счета фотонов типа ФЭУ-130 и ФЭУ-136, для 0,69 мкм – ФЭУ-136.

Для калибровки АК в участках спектра 0,53 и 0,69 мкм применялись эталонный источник типа А (светоизмерительная лампа накаливания типа СИ с вольфрамовой нитью или лентой с цветовой температурой тела накала 2854 К), спектральная яркость которого определяется в видимой области спектра в лучшем случае с относительной ошибкой $\delta = 1\text{--}2\%$, а как правило 4 % [3, 4], и звезды, используемые в качестве спектрофотометрических стандартов, спектральная яркость которых за пределами атмосферы в видимой области спектра определена с $\delta = 4\%$ [3, 4]. Прозрачность атмосферы, которая определяется с $\delta = 1\text{--}2\%$ [3, 7], естественно увеличивает δ яркости звезд-стандартов у поверхности Земли до 5–6 %.

Ввиду относительной узости полуширин пропускания светофильтров для участков спектра (лазерные длины волн) 0,53 и 0,69 мкм поправки на различия в спектральном составе источников при градуировке и измерениях не брались.

Чувствительность АК по энергетической яркости в участке спектра 0,53 мкм была $2,5 \cdot 10^{-9}$ Вт · ср⁻¹ · м⁻² · мкм⁻¹, а в 0,69 мкм – $1,4 \cdot 10^{-8}$ Вт · ср⁻¹ · м⁻² · мкм⁻¹.

Для измерения яркости ночного безоблачного неба в спектральных участках 0,53 и 0,69 мкм применялась методика, включающая: при наличии Луны – сканирование по углу возвышения ε при различных азимутах φ_0 относительно Луны с шагом по азимуту $\Delta\varphi$, сканирование по φ при различных ε с шагом по углу возвышения $\Delta\varepsilon$, сканирование по альму-

контарату и вертикалу Луны, фотографирование всего небосвода с помощью объектива «рыбий глаз» и ореола Луны с помощью объектива с углом зрения $45\text{--}83^\circ$; при отсутствии Луны – сканирование по углу возвышения ε при различных азимутах φ относительно нулевого небесного меридиана с шагом по азимуту $\Delta\varphi$, сканирование по φ при различных ε с шагом по углу возвышения $\Delta\varepsilon$, сканирование по φ при $\varepsilon = 45^\circ$ (рекомендации Международного астрономического союза (МАС)), сканирование с различным шагом по эклиптическим и галактическим координатам, фотографирование всего небосвода с помощью объектива «рыбий глаз».

Калибровка АК проводилась до, в процессе и после измерений; при этом прозрачность атмосферы определялась по экстинкционным звездам по методам А.П. Сарычева и низко-высокой звезды [3, 7].

Данная методика отличается от ей подобных сканированием как по ε , так и по φ , фотометрированием как по источнику типа А, так и по звездам-стандартам и фотографированием небосвода в процессе измерений. Она позволяет в дальнейшем разработать методику стандартизации реальных ситуаций.

В табл. 1 и 2 приведены средние значения спектральной энергетической яркости $\bar{L}_{e,\lambda}$ составляющих свечения ночного безоблачного неба при отсутствии Луны в направлении на галактический полюс – самом удобном направлении для выделения внегалактического свечения. Они находятся в хорошем соответствии с данными работ [2, 4]. Отличия от работы [5], по-видимому, объясняются измерением последних в своеобразных горных условиях Кавказа.

Важно оценить вклад каждой из перечисленных в табл. 1 и 2 составляющих в общую яркость ночного безоблачного неба. Такая оценка, произведенная по методике [2], приведена для зенита в табл. 3 и 4, в которых не указана доля, вносимая рассеянием света звезд и зодиакального света в тропосфере. Она составляет около 2,5 % общей яркости ночного неба [2, 4].

Оценки, приведенные в табл. 3, 4, показывают, что излучение верхней атмосферы в видимой области спектра вносит существенный вклад в интегральное свечение ночного неба.

В табл. 5 для различных состояний неба при отсутствии Луны приведены средние значения спектральной энергетической яркости $\bar{L}_{e,\lambda,\varepsilon}$ (со стандартными отклонениями σ_L) ночного неба при угле возвышения 45° и азимуте 150° .

Таблица 1

Свечение ночного неба в участке спектра 0,53 мкм

Составляющая	Область концентрации	$\bar{L}_{e,\lambda}$, 10^{-7} Вт · ср ⁻¹ · м ⁻² · мкм ⁻¹
Собственное свечение атмосферы	Горизонт	65,5
Зодиакальный свет	Эклиптика, Солнце	153,3
Интегральная звездная составляющая:	Галактический диск	
m^* от 5 до ∞ ;		36,7
m^* от 15 до ∞ ;		3,4
m^* от 20 до ∞		0,2
Диффузионное галактическое свечение	–	11,8
Внегалактическое свечение	–	1,18
Разрешаемые звезды	Звезды нашей Галактики	39,3–131

Примечание: m^* – видимая звездная величина.

Для анализа были выбраны следующие состояния неба:

1) покрытое облаками, большей частью слоистыми или слоисто-дождевыми с высотой нижней границы $\geq 1,4$ км, звезд не видно;

- 2) покрытое облаками различных типов с быстрым изменением их количества и толщины;
 3) тонкая пелена, покрывающая все небо, большей частью перисто-слоистые облака, дымка или слабый туман, видны яркие звезды;
 4) безоблачно.
 Состояния 1, 3, 4 идентифицируются визуально и фотографически очень хорошо, состояние 2 имеет некоторую неопределенность.

Таблица 2

Свечение ночного неба в участке спектра 0,69 мкм

Составляющая	Область концентрации	$\bar{L}_{e,\lambda}$, 10^{-7} Вт · ср ⁻¹ · м ⁻² · мкм ⁻¹
Собственное свечение атмосферы	Горизонт	54,6
Зодиакальный свет	Эклиптика, Солнце	127,8
Интегральная звездная составляющая:	Галактический диск	
m^* от 5 до ∞ ;		30,6
m^* от 15 до ∞ ;		2,8
m^* от 20 до ∞		0,17
Диффузионное галактическое свечение	—	9,8
Внегалактическое свечение	—	0,98
Разрешаемые звезды	Звезды нашей Галактики	32,8–109

Таблица 3

Свечение ночного неба в зените в участке спектра 0,53 мкм

Составляющая	Область концентрации	$\bar{L}_{e,\lambda,z}$, %
Собственное свечение атмосферы	Горизонт	33
Зодиакальный свет	Эклиптика, Солнце	44
Интегральная звездная составляющая:	Галактический диск	
m^* от 5 до ∞ ;		22
m^* от 15 до ∞ ;		
m^* от 20 до ∞		
Диффузионное галактическое свечение	Звезды нашей Галактики	1,0
Внегалактическое свечение	—	
Разрешаемые звезды	—	

Как видно из табл. 5, во всех спектральных участках $\bar{L}_{e,\lambda,\varepsilon}$ уменьшается при переходах от состояния неба 4 к состоянию 1, хотя состояние неба 2 имеет некоторую неопределенность.

Для безоблачного неба во всех спектральных участках наблюдается хорошая корреляция $\bar{L}_{e,\lambda,\varepsilon}$ с данными работы [4], для выделенных состояний неба в участке спектра 0,6943 мкм – с данными [6].

Для измерений $L_{e,\lambda,\varepsilon}$ ночного неба угол возвышения 45^0 был выбран в соответствии с рекомендациями МАС [3].

Таблица 4

Свечение ночного неба в зените в участке спектра 0,69 мкм

Составляющая	Область концентрации	$\bar{L}_{e,\lambda,z}$, %
Собственное свечение атмосферы	Горизонт	44
Зодиакальный свет	Эклиптика, Солнце	36,7
Интегральная звездная составляющая: m^* от 5 до ∞ ; m^* от 15 до ∞ ; m^* от 20 до ∞	Галактический диск	18,5
Диффузионное галактическое свечение	—	
Внегалактическое свечение	—	0,8
Разрешаемые звезды	Звезды нашей Галактики	

Таблица 5

Вариации $L_{e,\lambda,\epsilon}$

Состояние неба	Количество измерений	$(\bar{L}_{e,\lambda,\epsilon} \pm \sigma_L) \cdot 10^{-6}$, Вт · м ⁻² · ср ⁻¹ · мкм ⁻¹			
		0,409 мкм	0,530 мкм	0,690 мкм	0,790 мкм
1	37	1,6 ± 1,1	2,8 ± 11,3	3,7 ± 1,6	6,4 ± 2,5
2	31	1,9 ± 0,9	3,1 ± 1,4	4,0 ± 1,7	7,6 ± 2,1
3	33	2,9 ± 1,5	4,4 ± 1,3	4,9 ± 1,0	9,5 ± 2,2
4	30	3,0 ± 1,1	4,7 ± 1,0	5,3 ± 1,2	10,8 ± 2,1

Значения $\bar{L}_{e,\lambda}$, $\bar{L}_{e,\lambda,z}$, $\bar{L}_{e,\lambda,\epsilon}$ и σ_L , приведенные в табл. 1–5, рассчитаны по измерениям в Минской области в течение осени 1996–1998 гг.

Такие же измерения в Минске показали, что во всех спектральных участках $\bar{L}_{e,\lambda}$, $\bar{L}_{e,\lambda,z}$, $\bar{L}_{e,\lambda,\epsilon}$ и σ_L ночного неба на 20–30 % больше, чем в Минской области. Световое загрязнение от города существенно уменьшается при переходе от обычного режима освещения к энергосберегающему. При последнем режиме в течение нескольких дней после антициклона условия наблюдения в Минске удовлетворяют требованиям МАС [3].

2. Модель яркости ночного безоблачного неба

2.1. Рассеянный свет Луны

В видимой области спектра излучение Луны является отраженным светом Солнца. Поэтому Луна не дает эффекта «сумерек», т. е. ее влияние на яркость неба проявляется лишь тогда, когда она находится над горизонтом и ее свет рассеивается в атмосфере Земли.

Ориентировочно верхний предел яркости ночного безоблачного неба можно получить, предполагая, что весь свет Луны равномерно рассеивается по направлению к Земле. В этом случае небо будет иметь одинаковую яркость, приблизительно равную $6,42 \cdot 10^{-5}$ от яркости Луны. При этих условиях максимальная яркость неба наблюдается при 0,5 мкм и составляет при полной Луне и среднем расстоянии между Луной и Землей $\approx 5,25 \cdot 10^{-4}$ Вт · м⁻² · ср⁻¹ · мкм⁻¹. В действительности эта величина завышена. Типичная яркость неба от рассеянного света составляет одну десятую от указанной выше величины, поскольку не весь свет Луны рассеивается по направлению к Земле. С другой стороны, коэффициент излучения равен единице лишь вблизи центров сильных полос поглощения. При других длинах волн коэффициент излучения

меньше, что также уменьшает величину собственной яркости неба, приближительная оценка верхнего предела которой дана выше.

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 альбеда подстилающей поверхности q_λ . Распределение этой яркости, по аналогии с Солнцем [7, 9], описывается следующими соотношениями:

$$\text{при } Z_\Delta \neq Z \quad L_\lambda = E_{\Delta,\pi,\lambda} f(\alpha) \mu_H(\gamma) \tau_{1,\lambda}^{-1} [\exp(-\tau_{1,\lambda} \sec Z) - \exp(-\tau_{1,\lambda} \sec Z_\Delta)] (\sec Z_\Delta - \sec Z)^{-1} \sec Z; \quad (2)$$

$$\text{при } Z_\Delta = Z \quad L_\lambda = E_{\Delta,\pi,\lambda} f(\alpha) \mu_H(\gamma) \exp(-\tau_{1,\lambda} \sec Z_\Delta) \sec Z_\Delta, \quad (3)$$

$$\mu_H(\gamma) = f_1(\gamma) + f_2(\gamma) + f_q(\gamma), \quad (4)$$

где $E_{\Delta,\pi,\lambda}$ – спектральная освещенность от Луны на верхней границе земной атмосферы; $f(\alpha)$ – закон фаз; γ – угол рассеяния; $\mu_H(\gamma)$ – индикатриса яркости, не освобожденная от влияния кратного рассеяния; $f_1(\gamma)$ – индикатриса рассеяния; $f_2(\gamma)$ и $f_q(\gamma)$ – члены, обусловленные соответственно многократным рассеянием и отражением света от подстилающей поверхности.

В соотношениях (2), (3) $f(\alpha)$ определяется по данным табл. 6.

Таблица 6

Интегральная фазовая яркость Луны

α°	L	α°	L	α°	L
0	1,000	65	0,147	130	0,013
5	0,818	70	0,125	135	0,010
10	0,715	75	0,108	140	0,007
15	0,626	80	0,092	145	0,006
20	0,550	85	0,080	150	0,004
25	0,482	90	0,070	155	0,003
30	0,422	95	0,057	160	0,002
35	0,364	100	0,047	165	0,0015
40	0,316	105	0,039	170	0,0010
45	0,274	110	0,032	175	0,0005
50	0,232	115	0,027	180	0,0000
55	0,200	120	0,022		
60	0,170	125	0,017		

В табл. 6 приведены значения относительной интегральной яркости L для фаз, соответствующих значениям фазового угла α в угловых градусах.

Найденные из наблюдений по соотношению (3) индикатрисы яркости $\mu_H(\gamma)$ могут быть использованы для определения спектральной прозрачности атмосферы p_λ «короткими» методами. В одном из них используется соотношение [9]

$$\tau_{H,\lambda} = 4\pi\mu_H(57^\circ), \quad (5)$$

которое выражает связь индикатрисы яркости неба $\mu_H(57^\circ)$ при угле рассеяния $\gamma = 57^\circ$ и спектральной оптической толщи атмосферы $\tau_{H,\lambda}$, не освобожденной от влияния многократного рассеяния. Для определения действительной спектральной оптической толщи атмосферы $\tau_{1,\lambda}$

используют эмпирически установленную зависимость между $\tau_{1,\lambda}$ и $\tau_{H,\lambda}$ [9]. Другим способом спектральная оптическая толщина атмосферы $\tau_{H,\lambda}$ вычисляется по соотношению

$$\xi = 180\pi^{-1} \arccos[\cos \beta \cos(\lambda - \lambda_0)], \tau_{H,\lambda} = 2\pi \int_0^\pi \mu_H(\gamma) \sin \gamma d\gamma. \quad (6)$$

Величина $\tau_{1,\lambda}$ определяется аналогично на основании эмпирической связи между $\tau_{H,\lambda}$ и $\tau_{1,\lambda}$. Эти методы [13] пригодны лишь в летних условиях при малом альбедо местности.

Зная $\tau_{1,\lambda}$, легко определить p_λ по соотношению

$$\ln p_\lambda = -\tau_{1,\lambda}. \quad (7)$$

Как показали проделанные авторами измерения и расчеты, 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 [10–12]:

$$L_\lambda L_{\lambda,z}^{-1} = [1 - \exp(-0,32 \sec Z)][0,91 + 10 \exp(-3\varphi) + 0,45 \cos^2 \varphi] \{0,274[0,91 + 10 \exp(3Z_\Delta) + 0,45 \cos^2 Z_\Delta]\}^{-1}, \quad (8)$$

где $L_{\lambda,z}$ – спектральная яркость неба в зените.

Таким образом, определив спектральную прозрачность атмосферы p_λ , спектральную яркость неба на альмукуантарате Луны и спектральную освещенность перпендикулярной площадки прямым светом Луны после его прохождения через атмосферу Земли в месте наблюдения или рассчитав их по методике [7], можно, учитывая данные табл. 6, найти по соотношениям (2)–(4) все характеристики поля рассеянного света Луны при безоблачном небе.

2.2. Звездная составляющая

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 два раза по сравнению с окружающими. В основном эти вариации обусловлены темными туманностями в окрестности Солнца и «дырами» межзвездной поглощающей материи. Для полного учета всех мелкомасштабных вариаций необходимо использовать детальные карты распределения яркости в Млечном Пути [2, 4] с несколькими сотнями фрагментов. Поскольку мелкомасштабные вариации занимают $\approx 5 - 7\%$, то ими можно пренебречь и в модели использовать только крупномасштабное распределение яркости в Млечном Пути, представляемое девятью 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 B и V соответственно.

Вне Млечного Пути ($b < -25^\circ$, $b > 17^\circ, 7$) яркость звездной компоненты хорошо описывается простыми аналитическими соотношениями:

$$\begin{aligned} L_{0,e,zv,B} &= 14,7 \cos ec |b| - 2,3; \\ L_{0,e,zv,V} &= 30,6 \cos ec |b| - 6,1. \end{aligned} \quad (9)$$

Податмосферная яркость определяется соотношением

$$L_{e,36} = L_{0,e,36} p^{\sec Z}, \quad (10)$$

где p – коэффициент прозрачности атмосферы.

2.3. 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 детальных карт распределений яркости зодиакального света получено аналитическое соотношение, аппроксимирующее распределение яркости зодиакального света [2, 4]:

$$L_{0,e,300} = 9443 \xi^{-2.261} (g_1 e^{-|\beta|} + g_2) + g_3 (-95^{-1} |\xi - 180| - 0,663^{-1} |\beta|), \quad (11)$$

где $L_{0,e,300}$ – яркость зодиакального света на верхней границе земной атмосферы; $\xi = 180\pi^{-1} \arccos[\cos \beta \cos(\lambda - \lambda_0)]$; λ_0 , λ – эклиптическая долгота соответственно Солнца и наблюдаемой точки; β – эклиптическая широта; g_i – коэффициенты. Максимальное отличие аппроксимации от наблюдений не превышает 2 %, а среднее квадратическое отклонение $\sim 0,8$ % .

Податмосферная яркость определяется соотношением

$$L_{e,300} = L_{0,e,300} p^{\sec Z}. \quad (12)$$

2.4. Собственное свечение атмосферы

Собственное свечение атмосферы обусловлено фотохимическими процессами, протекающими в основном на высотах 80 – 100 и 250 – 300 км. Полярные сияния, которые носят нерегулярный характер, в модели не рассматриваются.

Спектральная яркость собственного свечения атмосферы $L_{e,\lambda,a}$ 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 растет с увеличением зенитного угла:

$$L_{e,\lambda,a} = L_{e,\lambda,a,Z} \sec Z, \quad (13)$$

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

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

2.5. Световое загрязнение

Используя результаты работ [5, 13], для оценки светового загрязнения $L_{e,g}$ ночного неба городом с энергетической светимостью $M_{e,g}$ на расстоянии r от наблюдателя до города получаем следующее соотношение:

$$L_{e,g} = M_{e,g} 2^{-1} \pi^{-1} \iint_s h d h d \varphi \int_0^\infty (r^{-2} + A) F(r, l) (k_1 + k_2) dl, \quad (14)$$

$$k_i = f_i(\theta_i) (\beta_i 4^{-1} \pi^{-1}) N_i(z) N_i^{-1}(0), \quad i = 1, 2,$$

учитывающее однократно рассеянный свет, идущий от города к наблюдателю. Функция $F = (r, l)$ учитывает ослабление света в результате его рассеяния молекулами воздуха и аэрозолями. В коэффициентах 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 (14).

Энергетическую светимость города можно вычислить, если известны измеренные значения энергетических яркостей $L_{e,H,1}$ и $L_{e,H,2}$ ночного безоблачного неба при отсутствии Луны на одной и той же высоте при двух разных азимутах. Из соотношения (14) получаем

$$M_{e,g} = (L_{e,H,1} - L_{e,H,2})[(L_{e,g}M_{e,g}^{-1})_1 - (L_{e,g}M_{e,g}^{-1})_2]^{-1}, \quad (15)$$

где $(L_{e,g}M_{e,g}^{-1})_1$ и $(L_{e,g}M_{e,g}^{-1})_2$ – вычисленные по соотношению (14) значения $L_{e,g}M_{e,g}$ для тех же направлений.

На основании соотношения (14) и проведенных авторами работы измерений получаем следующую эмпирическую зависимость подсветки неба в зените (в $\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) на участке спектра 0,53 мкм от числа жителей P и расстояния r (км) от города:

$$L_{e,g} = 2 \cdot 10^{-10} P r^{-2} \exp(-0,015r). \quad (16)$$

Заключение

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. Модель предназначена для прогнозирования условий наблюдения астрономических объектов естественного и искусственного происхождения. Для точного учета влияния местных факторов, с целью повышения точности прогноза яркости ночного неба и эффективности наблюдений, желательно проводить измерение астроклиматических параметров непосредственно в месте наблюдений.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки модели яркости фона ночного безоблачного неба в видимой области спектра, учитывающей вклад Солнца в сумеречную составляющую яркости ночного неба, влияние местных и случайных факторов, а также для разработки и эксплуатации многоцелевых астрономических и лазерных комплексов.

Список литературы

1. Исследование возможностей прогнозирования параметров астроклимата / О.Г. Овезгельдыев [и др.] // Изв. АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн. и геол. наук. – 1982. – № 6. – С. 40–52.
2. Роч, Ф. Свечение ночного неба / Ф. Роч, Дж. Гордон. – М.: Мир, 1977. – 150 с.
3. Уокер, Г. Астрономические наблюдения / Г. Уокер. – М.: Мир, 1977. – 446 с.
4. Кузнечик, О.П. Свечение ночного неба / О.П. Кузнечик. – Минск, 1985. – 48 с. – Деп. в ВИНТИ 31.07.85, № 5696 // Весці АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук. – 1986. – № 3. – С. 121.
5. Ефимов, Ю.С. Измерение яркости ночного неба в Крымской астрофизической обсерватории / Ю.С. Ефимов, В.И. Бурнашев // Изв. Крым. астрофиз. обсерв. – 1992. – Т. 85. – С. 107–121.
6. Kuznechik, O.P. Variations of night sky radiance in 0.4-0.8 μm spectral region / O.P. Kuznechik, V.N. Gorenkov, O.O. Kuznechik // Proc. of the Ninth Annual Seminar «Nonlinear Phenomena in Complex Systems», May 16–19, 2000, Minsk, Belarus. – Minsk: Institute of Physics, 2000. – P. 183–188.
7. Смеркалов, В.А. Прикладная оптика атмосферы / В.А. Смеркалов. – СПб.: Гидрометиздат, 1997. – 335 с.

8. About Methods of Recalculation of Spatial Spectra of Radiance Fields / O.P. Kuznechik [et al.] // Proc. of the 11th Conference-School «Foundations & Advances in Nonlinear Science», September 22–25, 2003, Minsk, Belarus. – Minsk: Belarusian State University, 2004. – P. 56–59.

9. Пясковская-Фесенкова, Е.В. Рассеяние света в земной атмосфере / Е.В. Пясковская-Фесенкова. – М.: АН СССР, 1957. – 220 с.

10. Кузнечик, О.Р. Рассеянный свет Луны – составляющая астроклимата. Модель рассеянного света Луны / О.Р. Кузнечик, В.Н. Горенков // Актуальные проблемы социально-гуманитарных и естественных наук: тез. науч. конф., посвящ. 75-летию БГУ. – Минск.: Изд-во БГУ, 1996. – Т. 1. – С. 165–168.

11. Кузнечик, О.П. Модель яркости ночного безоблачного неба / О.П. Кузнечик, В.Н. Горенков, О.О. Кузнечик // Publ. Astron. Obs. Belgrade. – 2000. – № 68. – P. 113–116.

12. Kuznechik, O.P. Model of the scattered moonlight / O.P. Kuznechik, V.N. Gorenkov, O.O. Kuznechik // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2001. – Vol. 4, № 2. – P. 136–139.

13. Garstang, R.H. Dust and Light Pollution / R.H. Garstang // Publ. Astron. Soc. Pacif. – 1991. – Vol. 103, № 668. – P. 1109–1116.

Поступила 14.04.07

*Белорусский государственный университет,
Минск, пр. Независимости, 4
e-mail: kuznechik@bsu.by*

O.P. Kuznechik, V.N. Gorenkov, O.O. Kuznechik

ASTROCLIMATE OF MINSK

By means of the photons account method the radiance of the basic components of an airglow is measured in the direction on galactic pole and in zenith in the spectrum regions 0.53 and 0.69 microns in Minsk and separate places of Minsk region.

The model of the brightness of the night cloudless sky above the city, considering the influence of scattering light of the Moon, the Milky Way, zodiacal light, native airglow and light pollution from artificial light sources is offered.