

ЯРКОСТЬ ФОНА НЕБА КАВКАЗСКОЙ ГОРНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ МГУ В ПОЛОСАХ BVR_cI_c

© 2024 г. И. А. Комарова^{1,2}, А. М. Татарников^{1,3*}, А. В. Шаронова², А. А. Белинский³,
Н. А. Масленникова³, Н. П. Иконникова³, М. А. Бурлак³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет космических исследований, Москва, Россия

³Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 21.10.2024 г.

После доработки 12.11.2024 г.; принята к публикации 12.11.2024 г.

Проанализированы результаты измерений яркости фона неба КГО ГАИШ МГУ в видимом и ближнем ИК-диапазоне, выполненных в 2019–2024 гг. В 2023–2024 гг. медианная яркость 1 квадратной угловой секунды безлунного ночного неба в зените составила 21.31^m в полосе B , 20.63^m в полосе V , 20.15^m в полосе R_c и 19.11^m в полосе I_c . За 5 лет яркость фона выросла на 0.7^m в полосах B и V , на 0.45^m в полосе R_c и $\sim 0.1^m$ в полосе I_c . Показано, что основной вклад ($\sim 85\%$) в увеличение фона связан с антропогенной засветкой от близлежащих городов, остальная часть вызвана ростом солнечной активности после минимума 2019 г. Исследована зависимость яркости фона неба от воздушной массы, положения Солнца и Луны на небе. Проведен качественный анализ влияния светового загрязнения на форму спектра, которую в последнее время определяет в основном излучение светодиодных ламп. Подобные изменения фона, которые, вероятнее всего, будут только усиливаться, делают все более актуальным переход к наблюдениям, менее чувствительным к уровню светового загрязнения — фотометрии и спектроскопии в ИК-диапазоне и спектроскопии высокого разрешения в оптическом.

Ключевые слова: фотометрия, фон неба, астроклимат.

DOI: 10.31857/S0320010824100069, **EDN:** NBN1YQ

ВВЕДЕНИЕ

Кавказская горная обсерватория Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (КГО ГАИШ МГУ) расположена на Северном Кавказе на горе Шаджатмаз в 20 км к югу от Кисловодска. Обсерватория относится к высокогорным (высота >2000 м). В настоящее время на обсерватории активно работают два телескопа (Шатский и др., 2020) с зеркалами 0.6-м и 2.5-м, на которых проводятся фотометрические и спектральные наблюдения в оптическом и инфракрасном диапазонах по заявкам ученых МГУ, ИНАСАН, САО, УрФУ и др.

Астроклимат и метеорологические условия КГО хорошо исследованы, соответствующие измерения в оптическом диапазоне проводятся с 2007 г. по настоящее время. Результаты, полученные до 2015 г., опубликованы в работах Корнилов и др. (2014, 2016a,b). Они показывают, что обсерватория по таким параметрам, как количество осажденной воды (PWV) в месяцы с наибольшим количеством ясной ночной погоды и качество изображения, является одной из лучших на территории России. Несмотря на близость города, достаточно хороший показатель у КГО был и по яркости

фона неба. Так, согласно Корнилову и др. (2016a), поверхностная яркость неба в полосе B в безлунные ночи 2007–2011 гг. составляла $22.1^m/\text{угл. сек}^2$ (медианное значение) или $22.3^m/\text{угл. сек}^2$ (первый квартиль распределения). Это характерно для обсерваторий на высотах менее 3 км, тогда как для удаленных от городской засветки обсерваторий на высотах более 3 км характерно более темное небо с $B = 22.8^m/\text{угл. сек}^2$ (Педани, 2009).

В последнее время увеличение яркости ночного неба в связи с ускоряющимся урбанизационным процессом и развитием искусственного освещения в регионах становится все более актуальной проблемой многих обсерваторий, в том числе, расположенных в горных районах планеты (Ангелони и др., 2024). Между тем, именно этот параметр астроклимата во многом определяет предельный блеск объектов, доступных для наблюдений. Можно записать известное выражение для отношения сигнал/шум при апертурной фотометрии (пренебрегая шумом темнового тока):

$$SNR = \frac{F_0 \cdot t}{\sqrt{F_0 \cdot t + n \cdot s \cdot F_{bg} \cdot t + n \cdot RN^2}}, \quad (1)$$

где t — время накопления, n — число пикселей в

*Электронный адрес: andrew@sai.msu.ru

изображении звезды, s — площадь участка неба, соответствующего 1 пикселу, в квадратных угловых секундах, RN — шум считывания, а F_0 и F_{bg} — поток квантов от объекта и от 1 квадратной угловой секунды неба соответственно. Указанная выше характерная яркость фона неба в КГО для 2.5-м телескопа соответствует достаточно большой величине F_{bg} — примерно 60 квантов-кв. сек⁻¹с⁻¹. Таким образом, для слабых звезд выполняется соотношение $F_0 \ll F_{bg}$. Так как при наблюдениях слабых объектов используются большие времена накопления, то можно пренебречь шумом считывания, который не зависит от времени. В этом случае формула 1 преобразуется в простое соотношение $SNR = \sqrt{t} \cdot F_0 / \sqrt{n \cdot s \cdot F_{bg}}$, из которого видно, что увеличение яркости неба на 0.75^m (т.е. в 2 раза) требует увеличения времени накопления также вдвое для получения того же отношения сигнал/шум.

Излучение фона неба складывается из нескольких составляемых: 1) заатмосферный фон, состоящий из зодиакального света и излучения слабых неразрешимых объектов, 2) собственное свечение атмосферы (свечение верхних слоев атмосферы Земли вследствие рекомбинации ионов, люминесценции и хемилюминесценции), 3) инструментальный фон и 4) световое загрязнение от объектов инфраструктуры. Если первые две составляющие относительно постоянны (на величину собственного свечения атмосферы может оказывать влияние солнечная активность), а инструментальным фоном в оптическом диапазоне длин волн можно пренебречь, то влияние антропогенного фактора является, во-первых, сезонным, а во-вторых, нарастающим со временем. В случае КГО соседом, формирующим световое загрязнение, является активно развивающийся в настоящее время курорт Кавказские Минеральные Воды, расположенный в северном направлении от обсерватории. Кроме того, начиная с 2020 г., появилось яркое ночное освещение на трассе Кисловодск — “Долина нарзанов”, проходящей в непосредственной близости к обсерватории.

В работе Татарников и др. (2024) мы исследовали яркость фона неба КГО в ближнем инфракрасном диапазоне, где показали, что она до сих пор находится на уровне лучших обсерваторий мира и не показывает систематического роста на протяжении 2016–2023 гг. Целью данной работы является измерение текущей яркости фона неба КГО в оптическом диапазоне (фотометрические полосы B , V , R_c и I_c) и исследование зависимости ее от основных метеопараметров и положения Солнца и Луны на небе, а также определение антропогенного вклада в общий фон с использованием данных, полученных с 2019 по 2024 г. на 60-см телескопе RC600.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения, результаты которых были использованы в нашей работе для измерения яркости фона неба, проводились в полосах B , V , R_c и I_c с 2019 по 2024 г. на установленном в 2019 г. в КГО ГАИШ МГУ телескопе RC600 (Бердников и др., 2020). Приемником излучения служила камера Andor iKon-L DZ936N-BV форматом 2048×2048 элементов, с размером пиксела 13.5 мкм, охлаждаемая до температуры -70°C и имеющая низкий темновой ток и малый шум считывания. Масштаб изображения в фокальной плоскости RC600 составляет $49.1''/\text{мм}$ или $0.66''/\text{пиксел}$. Основная часть наблюдений проводилась в малооблачную или безоблачную погоду при влажности меньше 95 % и скорости ветра ниже 10 м/с. Целью всех наблюдений было исследование астрономических объектов разных типов — от экзопланет до активных ядер галактик. Однако на каждом кадре, помимо звезд и целевых объектов наблюдений, занимающих малую часть общей площади, регистрировалось и излучение фона. За указанный промежуток времени в каждой фотометрической полосе было получено более 10 000 кадров.

Спектры, используемые в работе, были получены на приборе TDS (Потанин и др. 2020) 2.5-м телескопа КГО в фотометрические ночи. Экспозиция каждого кадра составляла 10 мин, регистрация спектров производилась одновременно в двух каналах, красном и синем, с границей примерно на $5700 \text{ \AA}$.

КАЛИБРОВКА

Фоновый сигнал, измеряемый на полученных с экспозицией t_{exp} кадрах, состоит из кадра подложки (*bias*), темнового тока ($\text{dark} \cdot t_{\text{exp}}$) и фона неба ($\text{sky} \cdot t_{\text{exp}}$). На этот сигнал накладывается шум составляющих сигнала и шум считывания (RN), не зависящий от времени накопления. Влияние указанных шумов на величину яркости фона можно снизить благодаря усреднению сигнала с большого числа пикселей.

Нестабильность уровня *bias* и величины темнового тока может напрямую влиять на измеряемую величину фона. Темновой ток камеры Andor iKon-L DZ936N-BV, работающей при температуре -70°C по нашим измерениям составляет $\sim 0.001 \text{ e}^-/\text{с}$. Это на порядки меньше ожидаемой яркости фона, поэтому его изменениями можно пренебречь. Изменения уровня *bias* касаются каждого конкретного кадра. При этом узнать реальное значение, которое было добавлено к каждому конкретному кадру, невозможно. На рис. 1 показано изменение среднего уровня *bias* за весь период наблюдений. Видно, что среднее значение *bias* за все время наблюдений составило 300.5 отсчетов (или аналого-цифровых единиц, ADU). При этом наблюдаются отклонения от этой величины, редко превышающие $\pm 1 \text{ ADU}$.

Для измерения фона были отобраны кадры с вре-

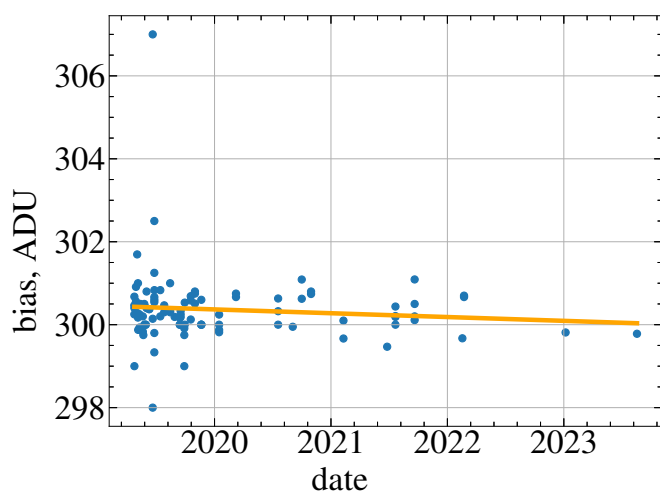


Рис. 1. Уровень *bias* камеры RC600 в 2019–2023 гг.

менем накопления в полосах B и V не менее 30 с, а в полосах R_c и I_c , в которых яркость фона в ADU выше, не менее 10 с. Так как величина *bias* не зависит от экспозиции, то такое ограничение позволяет снизить влияние нестабильности *bias* на итоговый результат. Из отобранных кадров были вычтены *bias* и темновой ток. В качестве значения фона для каждого кадра было взято медианное значение отсчетов. Это позволило эффективно убрать вклад звезд в величину измеренного сигнала.

Результатом этого этапа обработки является таблица соответствия даты, условий наблюдений, фотометрической полосы и уровня фона в единицах ADU/(угл. сек² с).

Для перевода из этих единиц в звездные величины использовался фотометрический стандарт с координатами R.A. = 19:03:47, DEC = +16:26:28 регулярно наблюдаемой на RC600 переменной звезды V1413 Aql, которому был приписан блеск $B = 13.94^m$, $V = 13.13^m$, $R_c = 12.64^m$ и $I_c = 12.15^m$. Эта звезда удобна тем, что наблюдается в КГО в относительно узком диапазоне воздушных масс. На рис. 2 показаны кривые изменения количества регистрируемых отсчетов от стандарта внутри широкой фотометрической апертуры (радиус апертуры $R_{ap} = 20$ пикселей, или почти $13''$). Хорошо видна тенденция к уменьшению потока, связанная с деградацией отражательной способности зеркала вследствие его загрязнения. Схожие результаты уменьшения отражательной способности зеркал описаны в Боккас (2004). Помимо общего тренда, на кривых наблюдаются выпадающие вниз измерения. Они связаны с наблюдениями при плохой прозрачности атмосферы, поэтому для построения калибровочной кривой мы использовали верхнюю огибающую точек.

Далее в работе везде рассматриваются исправленные за изменение пропускания прибора данные.

ЯРКОСТЬ ФОНА НЕБА НА РАЗНЫХ ВОЗДУШНЫХ МАССАХ

На рис. 3 приведена зависимость поверхностной яркости неба Σ в полосах B , V , R_c и I_c от воздушной массы, построенная по данным за весь период наблюдений для ночного (погружение Солнца $>18^\circ$) безлунного неба. Графики показывают высокую дисперсию точек, связанную, прежде всего, с наличием общего тренда к поярчанию неба (см. ниже). Обращает на себя внимание скопление точек на $Mz \approx 2.3$ в полосах B , R_c и I_c . Эти точки относятся к наблюдениям одного объекта с большим отрицательным склонением, которые в КГО возможны только вблизи его верхней кульминации на высоте $\sim 25^\circ$ (в полосе V объект наблюдался с короткими экспозициями и не был отобран по заданным в начале работы критериям). Кроме этого, в полосах V и R_c хорошо заметны цепочки точек — это результат мониторинговых наблюдений, которые могут длиться часами и во время которых получается большое число отдельных изображений с короткими экспозициями.

Несмотря на значительный разброс значений, видно, что средние значения поверхностной яркости хорошо ложатся на прямые. Этот вывод подтверждают и мониторинговые наблюдения одной и той же области неба, во время которых точки на зависимости $\Sigma(Mz)$ выстраиваются в среднем вдоль прямых, демонстрируя, что яркость (в звездных величинах) равномерно растет к горизонту.

ИЗМЕНЕНИЕ ФОНА С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ

Яркость сумеречного и ночного фона неба сильно зависит от глубины погружения Солнца под горизонт. Считается, что Солнце перестает оказывать заметное влияние на яркость неба после погружения под горизонт более, чем на 18° (конец астрономических сумерек, начало ночи). На рис. 4 показана зависимость яркости фона на малых воздушных массах от высоты Солнца в отсутствие Луны. Как и ожидалось, яркость неба в разных фильтрах выходит на плато при разной глубине Солнца под горизонтом — в ИК полосе I_c при погружении больше, чем на 13° , в R_c на глубине 14° , в V на глубине 15° и в полосе B при погружении на 16° .

Помимо Солнца, большое влияние на яркость неба оказывает Луна (особенно вблизи полнолуния). Мы отобрали снимки, полученные в ночное время высоко над горизонтом при фазе Луны ≥ 0.97 . На рис. 5 представлены зависимости яркости фона неба от расстояния до Луны при указанных условиях. Видно, что во всех полосах яркость относительно медленно спадает по мере удаления от Луны и даже на расстоянии в несколько десятков градусов остается на уровне $18^m - 19^m$ /угл. сек², что соответствует яркости неба во время навигационных сумерек (рис. 4).

Для исследования долговременной переменности

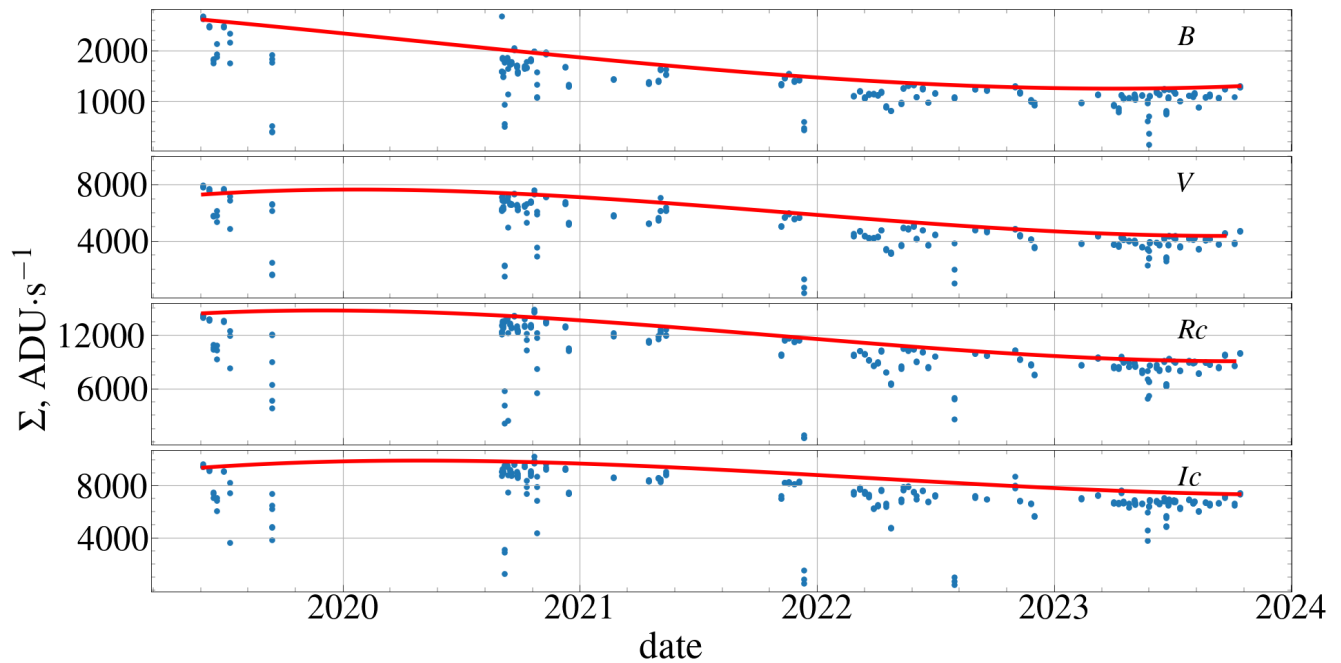


Рис. 2. Изменение количества регистрируемых отсчетов (в ADU) стандартной звезды в фотометрических полосах B , V , R_c , I_c . Красной линией показана верхняя огибающая, соответствующая наблюдениям в ясные ночи.

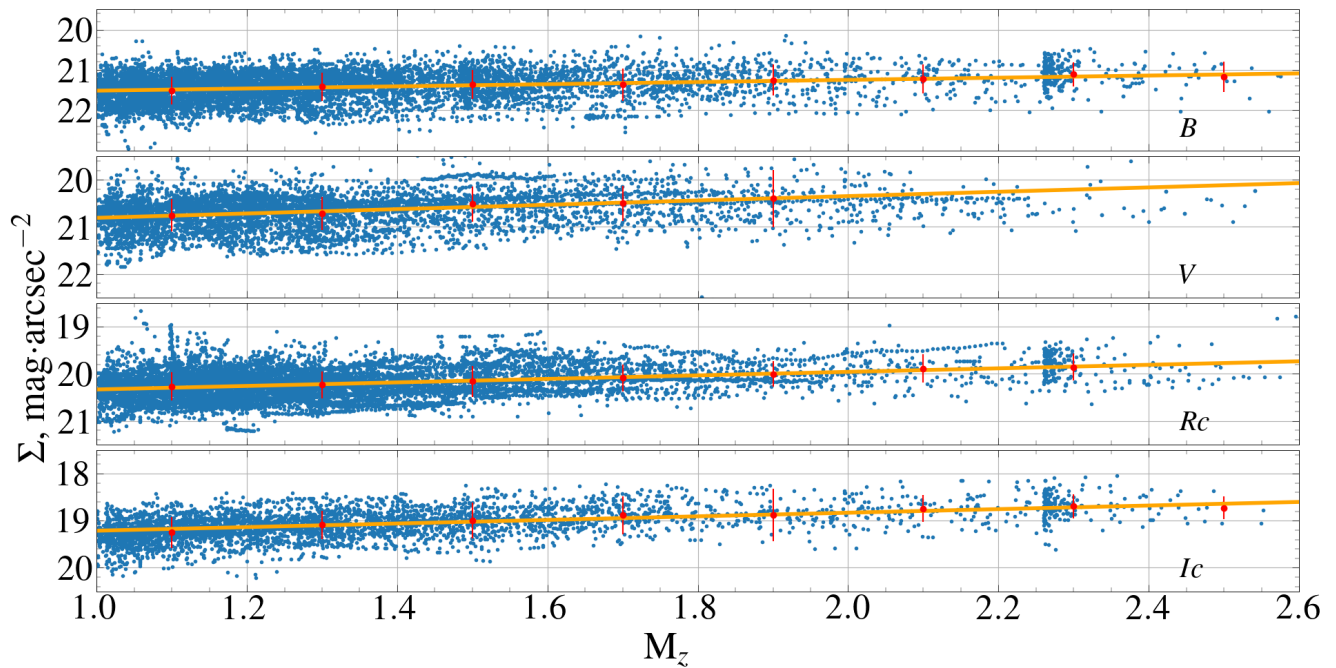


Рис. 3. Зависимость поверхностной яркости фона Σ от воздушной массы в фотометрических полосах B , V , R_c и I_c для ночного времени и Луной под горизонтом при фазе < 0.5 . Красные точки — усредненные в диапазоне $\Delta M_z = 0.2$ значения яркости фона, оранжевая линия — прямая, проведенная через красные точки.

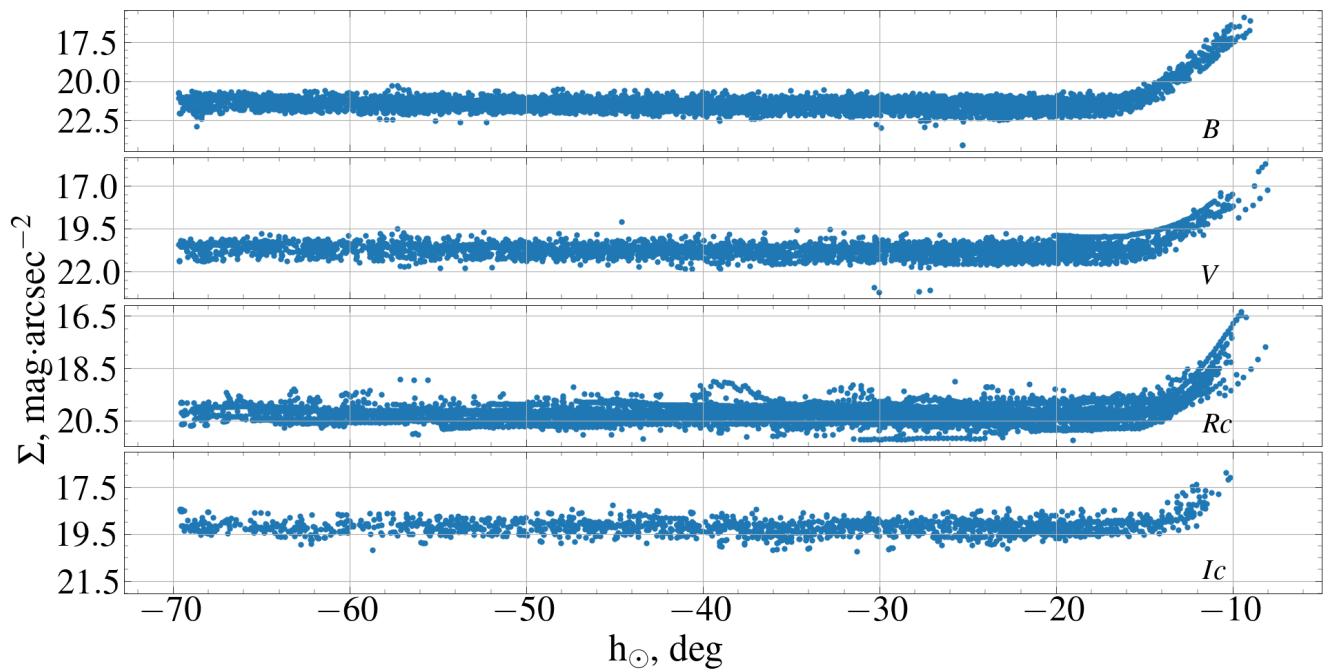


Рис. 4. Зависимость поверхностной яркости неба Σ от высоты Солнца для воздушных масс $M_z < 1.5$ в полосах B , V , R_c и I_c . Высота Луны меньше 0° при фазе < 0.5 .

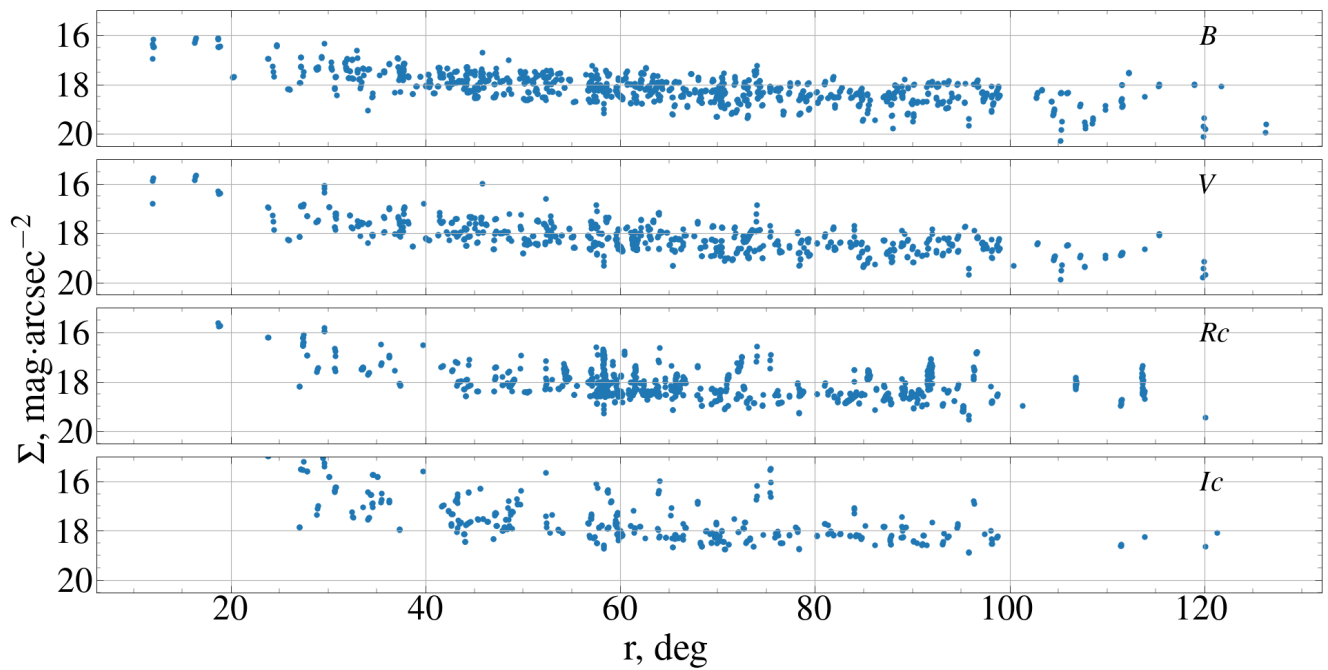


Рис. 5. Зависимость яркости фона от углового расстояния до Луны для ночного времени, $M_z < 1.5$ и фазы Луны ≥ 0.97 .

уровня фона мы использовали измерения, полученные в ночное время, при высоте Луны $<0^\circ$ и при фазе <0.5 . Отбор не только по высоте Луны, но и по фазе проводился для исключения влияния эффекта лунной зари — повышения яркости неба перед восходом, который может быть замечен при больших фазах Луны.

На рис. 6 представлены графики изменения поверхностной яркости безлунного ночного неба за период с 2019 по 2024 г. Хорошо видны многочисленные короткие пробелы в данных, связанные с лунными ночами, а длинные пробелы в 2020 г. и в середине 2021 г. связаны с программным сбоем системы хранения. Кроме того, на графиках видны сезонные колебания яркости фона и общий тренд увеличения яркости со временем.

Сезонные вариации, вероятно, связаны с периодическим выпадением снега в окрестностях обсерватории и в местах расположения наиболее интенсивных источников антропогенной засветки. Снежный покров значительно увеличивает яркость фона из-за повышения доли отраженного от поверхности света (Эчау, Хелькер, 2019). Так как речь идет о южных широтах нашей страны, то в этих местах может не быть постоянного снежного покрова, и в самой обсерватории постоянного снежного покрова может не быть из-за сильных ветров. Это увеличивает дисперсию точек на кривых блеска в зимний период. Кроме того, можно ожидать, что некоторое влияние на яркость фона могут оказывать такие метеопараметры, как давление и содержание воды в атмосфере, меняющие рассеивающие свойства единицы объема воздуха. Однако расчеты показывают, что содержание воды в оптическом диапазоне не оказывает заметного влияния на яркость фона, а наблюдающееся изменение давления между сезонами в 25 гПа может приводить к вариациям $\sim 0.05^m$, которые также будут не заметны на рис. 6.

Общий тренд повышения яркости фона может быть вызван суммарным действием возрастающей с 2020 г. солнечной активности и антропогенными факторами.

Известно, что в периоды солнечных максимумов яркость фона увеличивается, в то время как в периоды минимумов — уменьшается. Так, согласно Бенн и Эллисон (1998), в обсерватории на La Palma небо изменяло свою яркость на 0.4 ± 0.1 звездной величины с квадратной секунды в течение цикла солнечной активности.

На яркость фона неба влияют как электромагнитное излучение от Солнца, так и солнечный ветер. Первое из них определяет яркость собственного свечения атмосферы (то, что называют *airglow*), а второе — аврорального свечения в верхних слоях атмосферы (Барентин, 2022).

Мы провели сравнение усредненных за сутки данных о яркости фона безлунного ночного неба с величиной радиопотока на длине волны 10.7 см и индексом геомагнитной активности Кр (данные взяты

из WDCB¹). Обнаружена высокая степень корреляции яркости фона и радиопотока ($r = 0.76$), а корреляция между яркостью фона и индексом Кр не обнаружена ($r \approx 0.1$). Последний результат достаточно ожидаемый, так как на широте КГО вклад аврорального свечения в общую яркость фона неба должен быть мал.

С помощью сервиса Sky Model Calculator² мы вычислили яркость фона неба в зените для обсерватории на La Silla (высота 2400 м) в модели The Cerro Paranal Advanced Sky Model (Нолл и др., 2012; Джонс и др., 2013) для зимнего ночного безлунного неба. Были использованы следующие параметры: количество осаждаемой воды (PWV) 3.5 мм, средний месячный радиопоток от Солнца 70 sfu для минимума и 140 sfu для максимума солнечной активности. В результате расчетов модельная яркость фона неба в La Silla для минимума солнечной активности составила $21.97^m/\text{угл. сек}^2$ и $21.69^m/\text{угл. сек}^2$ для максимума солнечной активности в полосе V. Таким образом, вклад солнечной активности в результирующую величину фона составляет $\sim 0.3^m/\text{угл. сек}^2$.

Напрямую переносить этот результат на небо КГО нельзя из-за разности в общей яркости фона, к которой действие солнечной активности является аддитивной добавкой. Пересчет полученных значений вклада солнечной активности к условиям КГО (с яркостью фона неба $\sim 20.7^m/\text{угл. сек}^2$ в полосе V) в период солнечного максимума показывает, что добавка составляет $\sim 0.1^m/\text{угл. сек}^2$. Так как в начале 2020 г. медианная яркость фона неба в КГО составляла $21.24^m/\text{угл. сек}^2$, а в конце 2023 г. $\sim 20.5^m/\text{угл. сек}^2$ в полосе V, то вклад солнечной активности в изменение яркости фона неба в КГО в указанном промежутке времени составляет $\sim 15\%$. Остальные 85%, вероятно, это действие антропогенного фактора.

СПЕКТР ФОНА НЕБА

В 2020 г. на 2.5-м телескопе КГО начал работать двухлучевой спектрограф TDS (Потанин и др., 2020). Длинная щель спектрографа ($\sim 3'$) позволяет одновременно со спектром исследуемого объекта благодаря высокой эффективности инструмента регистрировать и спектр неба с высоким отношением сигнал/шум. На рис. 7 показаны спектры ночного безлунного неба, полученные 11 и 12 апреля 2024 г., и спектр, полученный при схожих условиях 18 августа 2020 г.

Для сравнения спектров между собой необходимо иметь в виду, что на севере от КГО за горой (т.е. вне прямой видимости) на расстоянии примерно 20 км находится Кисловодск, а на северо-востоке на вдвое большем расстоянии видны другие города курорта Кавказские Минеральные Воды (Ессентуки, Пяти-

¹<http://www.wdcb.ru/stp/data.html>

²<https://www.eso.org/observing/etc/bin/gen/form?INS.MODE=swspectr+INS.NAME=SKYCALC>

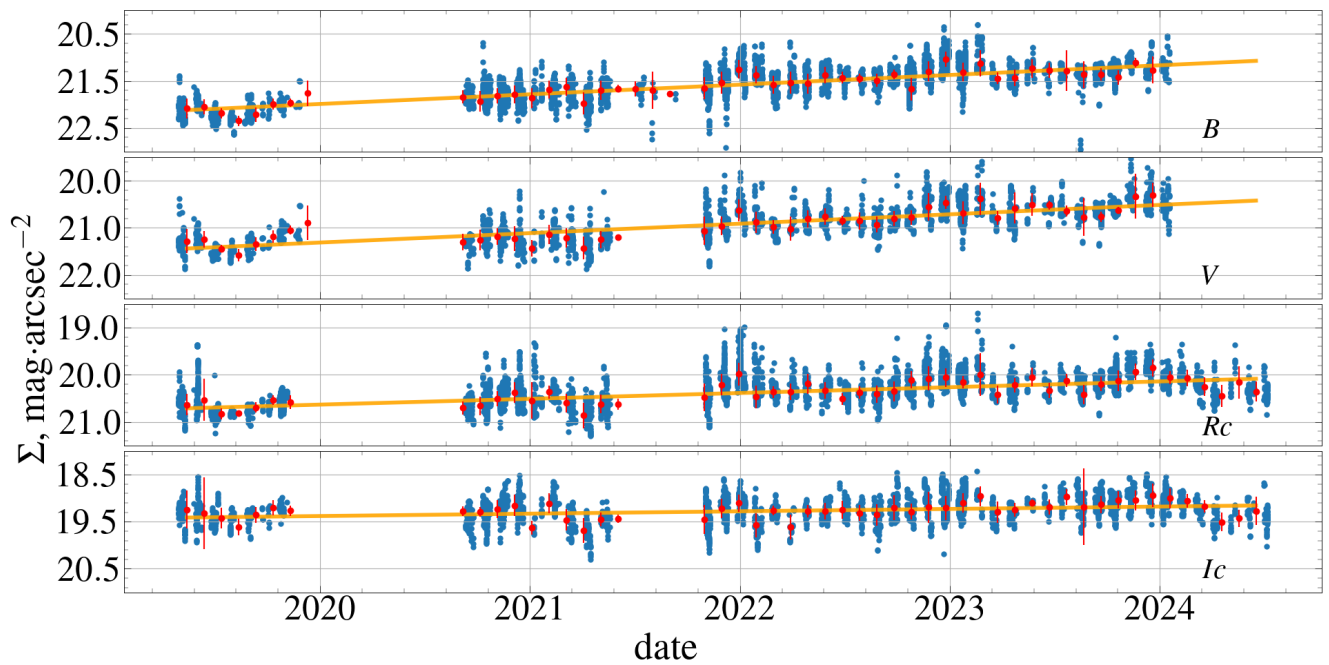


Рис. 6. Зависимость поверхностной яркости неба Σ от времени в полосах B , V , R_c и I_c для ночного времени и Луны под горизонтом при фазе < 0.5 .

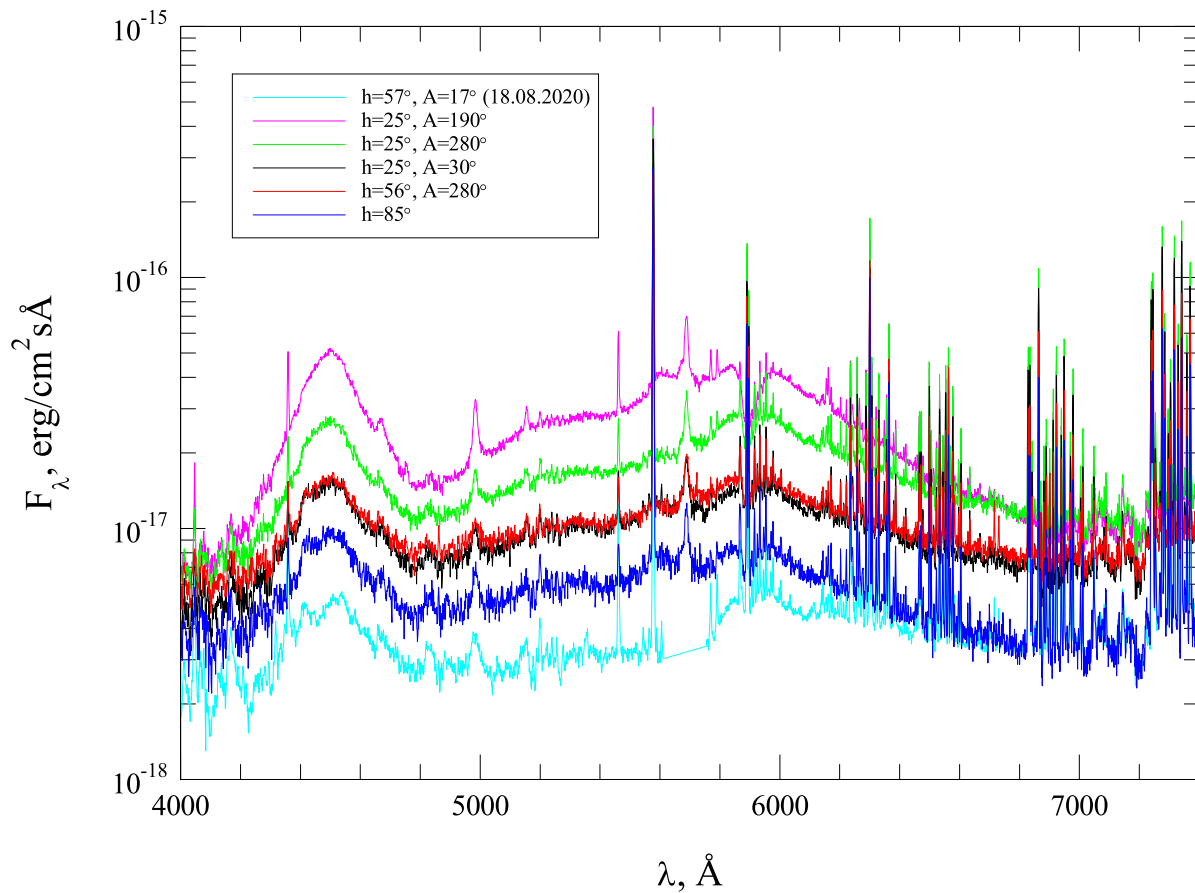


Рис. 7. Спектры ночного безлунного неба, полученные в КГО на разных высотах и азимутах в апреле 2024 г., и спектр, полученный 18.08.2020.

горск и др.). К востоку от обсерватории на расстоянии нескольких сотен метров, но в ущелье ниже обсерватории примерно на 100 м, проходит освещенное шоссе. Поэтому спектры регистрировались на одной высоте над горизонтом ($h = 25^\circ$) в направлении Кисловодска (азимут $A = 190^\circ$), шоссе ($A = 280^\circ$) и темного (пока) Эльбруса ($A = 30^\circ$). Для сравнения были получены спектры вблизи зенита и над шоссе на высоте 56° .

В спектрах фона виден стандартный для современного неба набор эмиссионных линий (Тапия Аюга и др., 2015): “лес” линий молекулы OH^- в красной части, линии $[\text{O I}]$ ($\lambda 5577, 6300$ и $6363 \text{ \AA}$), линии Hg I ($\lambda 4047, 4358, 5461, 5770$ и $5791 \text{ \AA}$), широкие линии Na I ($\lambda 4984, 5689, 5890$ и $5896 \text{ \AA}$). Линии ртути и натрия имеют антропогенную природу и образуются в люминесцентных лампах и натриевых лампах высокого давления (НЛВД), линии кислорода и гидроксидов образуются на высотах $>100 \text{ км}$ и имеют природное происхождение. Кроме того, выделяются две широкие эмиссионные особенности — в синей части спектра с $\lambda = 4500 \text{ \AA}$ и в “красной” части с $\lambda = 5000\text{--}6500 \text{ \AA}$. За появление синей полосы и наиболее широкой части “красной” ответственны светодиодные лампы (СвЛ, Тапия Аюга, Заморано, 2018; Брехм, 2017), на спектр которых накладывается спектр НЛВД (пример таких спектров приведен в работе Тапия Аюга и др., 2015). Последний хорошо виден в области длин волн $\sim 5900 \text{ \AA}$ в спектре 2020 г. (когда относительный вклад СвЛ уличного освещения был меньше). В этом спектре присутствует относительно слабая синяя полоса СвЛ и практиче-

ски до $\lambda = 5700 \text{ \AA}$ не наблюдается характерного для этих современных ламп роста потока излучения, зато хорошо видны линии ртути 5770 и $5791 \text{ \AA}$, контраст которых снижен на спектрах 2024 г. из-за наличия излучения СвЛ.

ОБСУЖДЕНИЕ

При отсутствии антропогенной засветки наблюдаемую зависимость яркости фона от воздушной массы Mz в некоем спектральном интервале можно представить в виде простого выражения

$$F_{\text{obs}}(Mz) = (F_s + F_a Mz) \exp(-\tau_0 Mz), \quad (2)$$

в котором F_s — это галактический (заатмосферный) фон, F_a — яркость атмосферного фона в зените, а τ_0 — оптическая толщина атмосферы в зените. В этом выражении мы считаем, что излучение образуется в атмосфере в самых верхних ее слоях, а поглощение наблюдается в более нижних слоях. Введение антропогенной засветки значительно усложняет записанное выше выражение (см., например, Гарстанг, 1989). Такое рассмотрение выходит за рамки нашего исследования.

Выражение для $F_{\text{obs}}(Mz)$ показывает, что даже в простом случае зависимость отличается от линейной. На верхней панели рис. 8 показан пример зависимости яркости фона неба в единицах $\text{ADU}/(\text{угл. сек}^2 \cdot \text{с})$ от Mz во время мониторинга в полосе V , проведенного в ясную безлунную ночь 20.09.2023, и ее подгонка, из которой можно определить параметры $F_s = 2.3 \pm 0.7$, $F_a = 6.5 \pm 1$ и $\tau_0 = 0.24 \pm 0.05$ для этой даты.

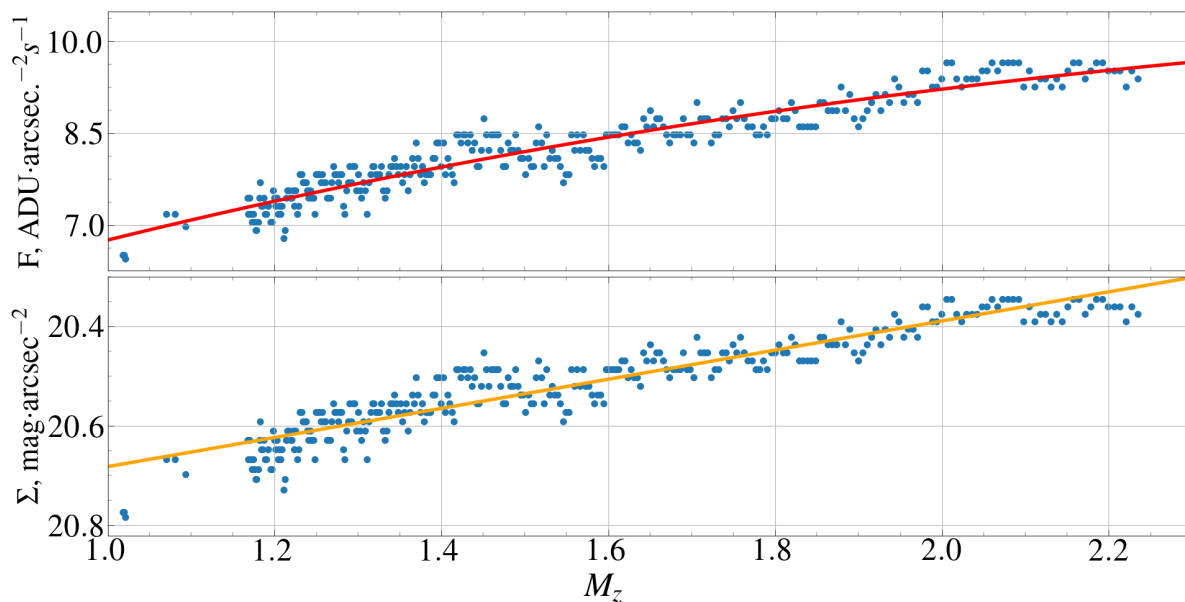


Рис. 8. Изменение поверхностной яркости неба с воздушной массой в полосе V во время наблюдений продолжительностью 3.3 ч. Красная линия показывает аппроксимацию ряда $F_{\text{obs}}(Mz)$ выражением 2, а оранжевая — ряда $\text{mag}_{\text{obs}}(Mz)$ линейной зависимостью.

Хотя зависимость логарифма F_{obs} (т.е. поверхностной яркости в звездных величинах) от M_z также отличается от прямой, в достаточно широком диапазоне значений параметров F_s , F_a и τ_0 это отличие от прямой будет невелико ($<0.05^m$ на краях диапазона рабочих воздушных масс). Это подтверждает и нижняя панель рис. 8, и вид зависимости на рис. 3. Таким образом, можно использовать прямую зависимость, полученную по большой совокупности данных, для приведения значения поверхностной яркости к зениту.

После приведения всех данных к зениту было определено медианное значение яркости фона, а также значения квартилей 0.25 и 0.75 для каждой фотометрической полосы (см. табл. 1). Из таблицы и рис. 6 видно, что с 2019 по 2024 г. яркость ночного безлунного неба в полосах B , V и R_c значительно выросла: в полосах B и V рост составил 0.7^m , в полосе R_c — 0.45^m . Лишь в полосе I_c рост оказался незначительным, порядка 0.1^m . Близкие изменения показывают и данные в квартилях. Яркость неба в лунные ночи с 2019 по 2024 г. изменилась меньше, что объяснимо большим уровнем фона из-за рассеянного излучения Луны.

С некоторой долей неопределенности, связанной с различными методиками измерения и использованными полосами, полученные результаты в B и V можно сравнить с данными из Корнилов и др. (2016а), приведенными в табл. 1 (в длинноволновых полосах такое сравнение невозможно из-за большого отличия кривых реакции полос R , I и R_c , I_c). Отметим, что данные в работе Корнилов и др. (2016а) были получены на фазе роста солнечной активности, начавшегося после минимума 2008 г. Для сравнения с нашими данными за 2019–2020 гг., полученными в минимуме активности Солнца, надо вносить поправку $\sim 0.1^m$ (см. выше). Такую же поправку надо сделать, сравнивая данные за 2019 и 2023 гг. Остальной прирост яркости фона связан с увеличением антропогенной засветки в районе обсерватории.

В апреле 2024 г. нами были получены спектры нескольких участков неба с интервалом в 15 мин (рис. 7). Сравнивая между собой потоки в одних и тех же теллурических линиях от площадок на разных высотах, можно, положив в выражении (2) $I_s = 0$, получить оценку поглощения в зените: $\tau_0(5577) \approx 0.2$, $\tau_0(7340) \approx 0.1$. Такие значения в КГО соответствуют ясному небу и указывают на отсутствие заметного влияния на спектры локальных атмосферных аномалий (облачности или аэрозольного рассеяния). Прямое сравнение этих спектров показывает, что яркость фона на малых высотах может меняться в 3–4 раза в зависимости от положения относительно городской засветки и подтверждает вывод о преобладающем влиянии антропогенных факторов на постоянный рост яркости фона неба. А наличие заметных широких эмиссионных особенностей в зените и даже в направлении темной области горизонта на юго-западе говорит о том, что этим влиянием в непрерыв-

ном спектре в КГО нельзя пренебрегать в любом направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты обработки и анализа десятков тысяч кадров, полученных с 2019 по 2024 г. в полосах B , V , R_c и I_c на 60-см телескопе RC600, установленном в КГО ГАИШ МГУ. Они показывают, что за 5 лет яркость фона в КГО в видимом диапазоне выросла на 0.7^m или почти в 2 раза (см. табл. 1). Подобный рост яркости фона в полосах B , V , в соответствии с выражением (1) требует при наблюдении слабых объектов увеличения в 2 раза времени накопления для достижения прежних значений SNR. В красной части спектра (полоса R_c) рост составил примерно 50%, а в коротковолновой части ближнего ИК-диапазона (полоса I_c) — всего 10%.

Основной вклад в увеличение яркости фона неба дает рост антропогенной засветки ($\approx 85\%$), вызванный развитием городов, расположенных к северу и северо-востоку от обсерватории на расстоянии 20 км и более, и появлением крупных тепличных комплексов в их окрестностях. Оставшиеся 15% — это влияние солнечной активности, на период роста которой пришлось анализируемые в статье наблюдения.

Надо отметить, что подобная тенденция характерна и для мировой астрономии. В последние годы влияние городской засветки стало заметно даже в таких благополучных до этого местах, как чилийские обсерватории (La Silla, Gemini (South) и др. — см., например, работу Ангелони и др., 2024, и ссылки в ней). Из-за роста антропогенной засветки в мире бьют тревогу не только астрономы, но и медики, экологи и защитники дикой природы. Оказалось, что увеличение засветки отрицательно воздействует на живые организмы: у людей изменяется период циркадных ритмов, возникают нарушения сна и различные проблемы со здоровьем; у животных изменяются особенности поведения и питания, в том числе возможна дезориентация при миграции, увеличивается смертность ночных видов животных из-за ослабления зрения и трудностей ухода от хищников.

За время фотометрических наблюдений в КГО менялся не только уровень фона, но и его спектр (рис. 7). Если ранее в спектре преобладали теллурические линии и линии натрия и ртути от уличного освещения, то в настоящее время преобладающим источником засветки в видимой части спектра являются светодиодные лампы, дающие две широкие и яркие эмиссионные особенности, одна из которых по форме практически совпадает с кривой реакции полосы B , а вторая занимает область спектра от $\sim 5000 \text{ \AA}$ до $\sim 6200 \text{ \AA}$. На высоте над горизонтом 25° эти эмиссии в несколько раз ярче в северном направлении (т.е. в направлении близких городов), чем в южном. Заметный вклад они дают и в зените. Подобные изменения фо-

Таблица 1. Квартили распределения яркости ночного неба при Луне над горизонтом и в безлунные ночи в фотометрических полосах B , V , R_c и I_c

Полоса	Дата	Без Луны			При Луне		
		25%	50%	75%	25%	50%	75%
B	2008–2013	22.31	22.10	21.84	20.87	19.73	18.96
	2019–2020	22.07	21.90	21.76	20.24	19.12	18.53
	2021	21.78	21.61	21.43	20.00	19.19	18.50
	2022	21.54	21.37	21.17	20.12	18.99	18.39
	2023	21.44	21.31	21.16	19.95	19.00	18.40
	2024*	21.28	21.19	21.09	—	—	—
V	2008–2013	21.28	21.07	20.81	20.38	19.45	18.76
	2019–2020	21.40	21.27	21.14	19.98	19.08	18.62
	2021	21.24	21.06	20.85	19.91	19.31	18.66
	2022	20.91	20.77	20.57	20.12	19.18	18.63
	2023	20.74	20.64	20.51	19.77	18.85	18.30
	2024*	20.62	20.55	20.47	—	—	—
R_c	2019–2020	20.70	20.58	20.44	19.99	18.96	18.47
	2021	20.62	20.34	20.10	19.82	19.19	18.70
	2022	20.42	20.25	20.09	19.61	19.12	18.57
	2023	20.25	20.16	20.02	19.67	19.05	18.17
	2024	20.23	20.13	20.03	19.58	19.32	18.69
I_c	2019–2020	19.34	19.28	19.23	18.70	18.26	18.18
	2021	19.49	19.28	19.11	18.93	18.63	17.98
	2022	19.41	19.26	19.12	18.88	18.53	17.95
	2023	19.25	19.10	18.94	18.90	18.49	17.91
	2024	19.36	19.19	19.01	18.89	18.51	18.01

Примечание. Значения указаны в звездных величинах с квадратной угловой секунды и приведены к зениту. Данные о яркости фона в 2008–2013 гг. взяты из работы Корнилов и др. (2016а).

*Данные за первый месяц года.

на, которые, вероятнее всего, будут только усиливать-ся, делают все более актуальным переход к наблюдениям, менее чувствительным к уровню светового загрязнения, — фотометрии и спектроскопии в ИК диапазоне и спектроскопии высокого разрешения в оптическом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за поддержку Программу развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (научно-образовательная школа “Фундаментальные и прикладные исследования космоса”).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ангелони и др. (R. Angeloni, J.P. Uchima-Tamayo, M.J. Arancibia, R. Ruiz-Carmona, D. Fernandez Olivares, P. Sanhueza, G. Damke, R. Moyano et al.), *Astron. J.* **167** (2), 67 (2024).
2. Барентин (J.C. Barentine), *Nature Astron.* **6**, 1120 (2022).
3. Бенн, Эллисон (C.R. Benn and S.L. Ellison), *New Astron. Rev.* **42** (6–8), 503 (1998).
4. Бердников Л.Н., Белинский А.А., Шатский Н.И., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Мишин Е.О., Черясов Д.В., Жуйко С.В., *Астрон. журн.* **97** (4), 284 (2020) [L.N. Berdnikov, A.A. Belinskii, N.I. Shatskii, M.A. Burlak, N.P. Ikonnikova, E.O. Mishin, D.V. Cheryasov, S.V. Zhuiko, *Astron. Rep.* **64** (4), 310 (2020)].
5. Боккас и др. (M. Boccas, T. Vucina, C. Araya, E. Vera, and C. Ahhee), *Proceed. of SPIE – Inter. Soc. Optic. Engineer.* **5494**, 239 (2004).

6. Брехм (G. Brehm), *Nota Lepidopterologica* **40**, 87 (2017).
7. Гарстанг (R.H. Garstang), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **101**, 306 (1989).
8. Джонс и др. (A. Jones, W. Kausch, C. Szyszka, and S. Kimeswenger), *Astron. Astrophys.* **560**, A91 (2013).
9. Корнилов и др. (V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov, N. Shatsky, O. Voziakova, S. Potanin, I. Gorbunov, V. Senik, and D. Cheryasov), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126** (939), 482 (2014).
10. Корнилов и др. (V. Kornilov, M. Kornilov, O. Voziakova, N. Shatsky, B. Safonov, I. Gorbunov, S. Potanin, D. Cheryasov, and V. Senik), *MNRAS* **462**, 4464 (2016).
11. Корнилов В.Г., Корнилов М.В., Шатский Н.И., Возякова О.В., Горбунов И.А., Сафонов Б.С., Потанин С.А., Черясов Д.В. и др., *Письма в Астрон. журн.* **42** (9), 678 (2016) [V.G. Kornilov, M.V. Kornilov, N.I. Shatsky, O.V. Vozyakova, I.A. Gorbunov, B.S. Safonov, S.A. Potanin, D.V. Cheryasov, et al., *Astron. Lett.* **42** (9), 616 (2016)].
12. Нолл и др. (S. Noll, W. Kausch, M. Barden, A.M. Jones, C. Szyszka, S. Kimeswenger, and J. Vinther), *Astron. Astrophys.* **543**, A92 (2012).
13. Педани (M. Pedani), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **121** (881), 778 (2009).
14. Потанин С.А., Белинский А.А., Додин А.В., Желтоухов С.Г., Ландер В.Ю., Постнов К.А., Саввин А.Д., Татарников А.М. и др., *Письма в Астрон. журн.* **46** (12), 894 (2020) [S.A. Potanin, A.A. Belinski, A.V. Dodin, S.G. Zheltoukhov, V.Yu. Lander, K.A. Postnov, A.D. Savvin, A.M. Tatarnikov, et al., *Astron. Lett.* **46** (12), 836 (2020)].
15. Тапиа Аюга, Заморано (С.Е. Tapia Ayuga and J. Zamorano), *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **214**, 33 (2018).
16. Тапиа Аюга и др. (С.Е. Tapia Ayuga, A. Sanchez de Miguel, and J. Calvo), *LICA-UCM lamps spectral database 1.6* (2015).
17. Татарников А.М., Желтоухов С.Г., Никишев Г.Э., Тарасенков А.Н., Шаронова А.В., *Астрон. журн.* **101**, (1), 42 (2024) [A.M. Tatarnikov, S.G. Zheltoukhov, G.E. Nikishev, A.N. Tarasenkov, A.V. Sharonova, *Astron. Rep* **68** (1), 66 (2024)].
18. Шатский и др. (N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, S. Zheltoukhov, V. Kornilov, K. Postnov, S. Potanin, B. Safonov, et al.), *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*, p. 127–132 (2020).
19. Эчай, Хелькер (A. Jechow and F. Holker), *J. Imaging* **5** (8), 69 (2019).