

Оценка прозрачности атмосферы в темное время суток по данным камер всего неба с узким спектральным диапазоном

© А.Б. Белецкий, М.А. Тащилин, И.П. Яковлева, Е.В. Девятова, С.В. Подлесный, Р.В. Васильев, А.В. Татарников, В.П. Лебедев

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
664033 Иркутск, Россия
e-mail: miketash@iszf.irk.ru

Поступило в Редакцию 13 октября 2025 г.

В окончательной редакции 5 ноября 2025 г.

Принято к публикации 10 ноября 2025 г.

Представлена методика оценки прозрачности атмосферы Земли в темное время суток с помощью камер всего неба с узким спектральным диапазоном, предназначенных для регистрации пространственного распределения интенсивности эмиссий верхней атмосферы Земли. Камеры работают в мониторинговом режиме в Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики (п. Торы, Бурятия, $51^{\circ}48' с.ш.$, $103^{\circ}04' в.д.$). Предлагаемая методика реализована в три этапа. На первом этапе проведена процедура идентификации звезд на кадрах. Произведен поиск групп пикселов, интерпретируемых как звезды. Далее, по рассчитанным ранее зависимостям, для каждой найденной группы определены азимут и угол места. Затем произведено сопоставление времени, азимута и угла места центра группы пикселов на кадре и звезды из каталога PyEphem. На следующем этапе рассчитана интенсивность звезды в отсчетах АЦП ПЗС-камеры. На третьем этапе проведена оценка полной атмосферной оптической толщины. С помощью разработанной методики в настоящее время решается ряд задач, таких, как оценка прозрачности атмосферы в темное время суток; относительная калибровка камер всего неба по „эталонным“ ясным ночам; получение дополнительной информации для интерпретации данных о пространственном распределении интенсивности атмосферных эмиссий; оценка критерии для идентификации перемещающихся волновых возмущений.

Ключевые слова: атмосферные эмиссии, атмосферная экстинкция, камера всего неба, Аэронет, прозрачность атмосферы.

DOI: 10.61011/JTF.2026.03.62548.288-25

Введение

Существование аэрозольных частиц на различных высотах атмосферы оказывает влияние на спектральное распределение сумеречного и ночного свечения атмосферы. При проведении исследований собственного излучения верхней атмосферы Земли и при астрономических наблюдениях в темное время суток необходимо учитывать прозрачность атмосферы, а также другие параметры астроклимата и оптической погоды, так как интенсивности свечения верхних слоев, полученные при различных прозрачностях атмосферы, могут сильно отличаться друг от друга [1]. В работе [2] с использованием ранее полученных спектральных характеристик аэрозольной оптической толщи (AOT) и влагосодержания атмосферы проведен анализ влияния атмосферного аэрозоля на результаты наземных наблюдений собственного излучения верхней атмосферы в эмиссионных линиях атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630.0 nm. Отмечается зависимость коэффициентов корреляции между интенсивностями эмиссий 557.7, 630.0 nm и AOT, выявлен ее нелинейный характер. В работах [1,2] данные прозрачности атмосферы были получены с помощью солнечного фотометра и, в общем случае, могут не отражать динамики аэрозоля в темное время суток.

В ряде работ с помощью ПЗС-камер со сверхширокоугольными объективами проведена оценка некоторых параметров ночного неба, таких как прозрачность атмосферы, яркость ночного неба, наличие облачности, ее процентное отношение и т.д. Например, в работе [3] были использованы данные наблюдений за период 2010–2015 гг. в Геофизической обсерватории (ГФО) Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН, расположенной в п. Торы, Бурятия ($51^{\circ}48' с.ш.$, $103^{\circ}04' в.д.$). Получена оценка средней светимости ночного неба в спектральных диапазонах RGB каналов цветной ПЗС-камеры для региона Восточной Сибири. В работе [4] предложена система для быстрого измерения яркости ночного неба с использованием мозаики изображений ПЗС-камер, полученных с помощью недорогой автоматизированной системы. Авторы работы [5] описывают использование камер всего неба в сети астрономических обсерваторий Лас-Кумбрес для автоматической оценки прозрачности атмосферы. Полученные карты облаков позволяют улучшить точность определения условий для наблюдений. В работах [6,7] представлены системы измерения яркости ночного неба с помощью камер всего неба. Результаты показывают, что для точных астрометрических измерений яркости необходимо учитывать спектральные характеристики источников излу-

чения. В работе [8] проведен анализ влияния различных типов аэрозолей как естественного, так и антропогенного происхождения, на яркость свечения ночного неба на юге Польши. Результаты показывают, что аэрозольные частицы оказывают значительное влияние, особенно в условиях низкого светового загрязнения. В [9] предложена процедура построения карт зональной и меридиональной скорости перемещения, средней высоты и размера частиц серебристых облаков на основе фотометрии идентичными RGB-камерами всего неба, разнесенными на 115 km в близкомеридиональном направлении. Обнаружено существенное различие в параметрах серебристых облаков в вечерние и утренние сумерки. В работе [10] предложена методика определения АОТ на основе данных RGB-камер всего неба. Результаты показывают, что значения АОТ, полученные с помощью данной методики, в целом коррелируют с данными лунных фотометров, достигая коэффициента корреляции выше 0.9.

Представленные выше исследования основаны на использовании камер всего неба с широким спектральным диапазоном. Не менее перспективным в решении подобных задач мы считаем использование камер всего неба со светофильтрами с узким спектральным диапазоном. Это позволяет регистрировать практически монохроматический поток излучения, что облегчает расчет атмосферной экстинкции и повышает его точность [11].

В 2021 г. были запущены в опытную эксплуатацию оптические инструменты Национального Гелиогеофизического Комплекса (НГК) РАН [12], расположенные в ГФО ИСЗФ СО РАН, позволяющие проводить мониторинговые измерения свечения ночного неба в спектральном диапазоне 400–1650 nm. В настоящей работе мы показываем еще одну, помимо измерений собственного свечения атмосферы, возможность использования этих инструментов. А именно предлагается методика оценки прозрачности атмосферы в темное время суток по данным камер всего неба с узким спектральным диапазоном, входящих в состав оптических инструментов НГК РАН. Кроме этого, представляются результаты сравнения полученных значений прозрачности атмосферы с данными солнечного фотометра СЕ-318, входящего в состав мировой наземной сети станций „Аэронет“ [13], который был установлен в ГФО ИСЗФ СО РАН в 2004–2021 гг. Измерения собственного свечения атмосферы с помощью узкоспектральных камер имеют в настоящее время достаточно широкое распространение. Такие измерения проводятся, например, в рамках проекта „Меридиан“ (Meridian Space Weather Monitoring Project) по мониторингу космической погоды, поддерживаемого правительством КНР [14]. Подобными оптическими инструментами оборудован и ряд других исследовательских центров. Поэтому предлагаемая методика оценки прозрачности атмосферы может представлять интерес для многих научных организаций.

Характеристики фильтров камер всего неба

| № | ASI0 | | ASI1 | |
|---|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | Центр полосы пропускания, nm | Полуширина, nm | Центр полосы пропускания, nm | Полуширина, nm |
| 1 | 557.7 | 2 | 557.7 | 2 |
| 2 | 630.0 | 2 | 630.0 | 2 |
| 3 | 840.0 | 1.8 | 427.8 | 2 |
| 4 | 846.5 | 1.8 | 589.3 | 2 |
| 5 | 857.0 | 1.8 | 865.0 | 10 |

1. Инструменты, данные и методика

В настоящей работе используются данные камер всего неба (All Sky Imager) KEO Sentry 4 (далее ASI0 и ASI1) из состава объекта „Оптические инструменты“ НГК РАН, предназначенные для регистрации пространственного распределение основных эмиссий верхней атмосферы Земли. Поле зрения камеры 180°, направление визирования — зенит. Выбор спектрального диапазона обеспечивается автоматически сменяемыми интерференционными фильтрами. Камеры имеют разный набор интерференционных светофильтров, характеристики которых приведены в таблице.

Кроме узкополосных фильтров, на обеих камерах установлены широкополосные фильтры 715–930 nm с блокированием спектрального интервала с центром 865 nm и полушириной 18 nm. На рис. 1 показаны спектральные каналы камер всего неба на фоне усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 400–900 nm за 23 января 2023 г., полученного с помощью спектрометра видимого диапазона KEO Spectrograph: VISIBLE, также входящего в комплекс оптических инструментов НГК РАН. Время экспозиции для каналов с узким спектральным диапазоном — 55 s. Для широкополосного канала гидроксила OH (715–930 nm) — 7 s.

Предлагаемая нами методика реализуется в три этапа. На первом этапе проводится процедура идентификации звезд на кадрах. Для камер ASI0 и ASI1 мы адаптировали методику выделения и идентификации звезд, разработанную для широкоугольной оптической системы KEO Sentinel [15,16]. Производится поиск групп пикселов, интерпретируемых как звезды. Далее по рассчитанным ранее зависимостям для каждой найденной группы определяется азимут и угол места. Затем производится сопоставление времени, азимута и угла места центра группы пикселов на кадре и звезды из каталога PyEphem [17]. На следующем этапе рассчитывается интенсивность звезды в отсчетах АЦП ПЗС-камеры по формуле

$$I = \sum_0^N I_{np} - N \cdot I_{bckgr}, \quad (1)$$

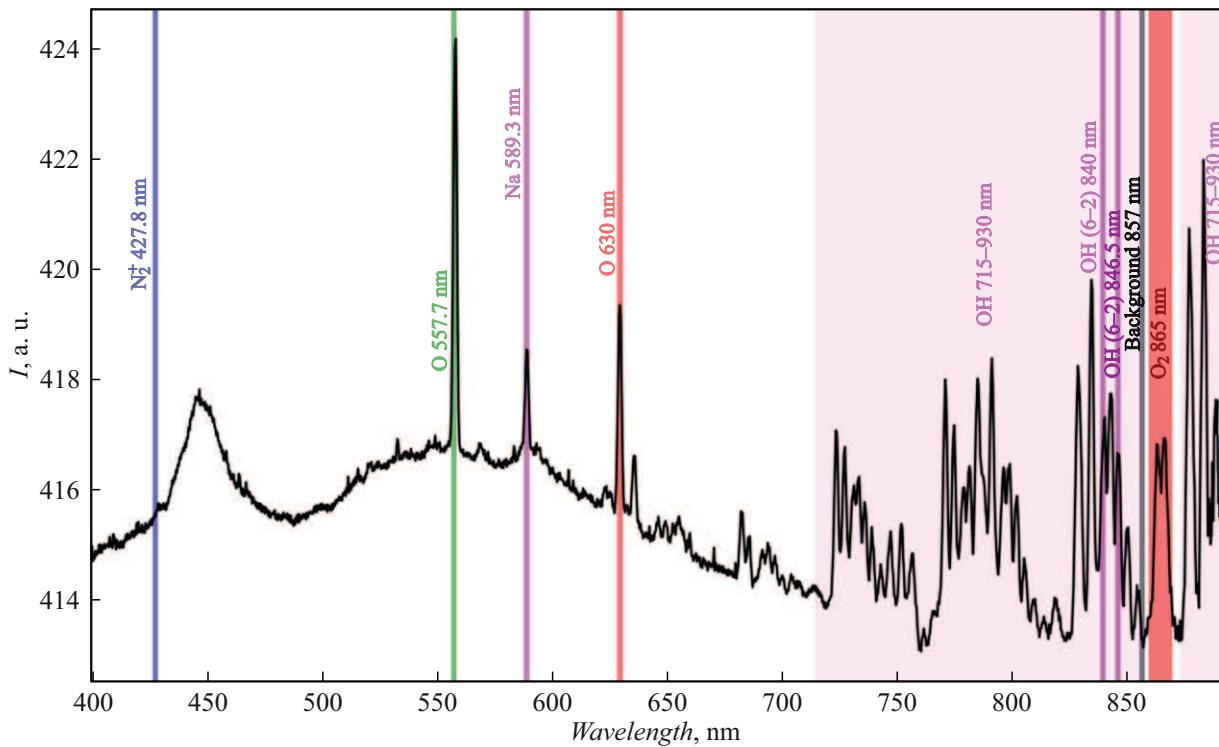


Рис. 1. Спектр свечения ночного неба в диапазоне 400–900 nm (усредненный спектр за 23.01.2023 г.), полученный с помощью спектрометра KEO Spectrograph:VISIBLE. Цветом показаны спектральные каналы камер всего неба ASI0 и ASI1.

где N — количество пикселов в группе, интерпретируемой как звезда; I_{np} — отсчеты АЦП одного пикселя в группе; I_{bkgr} — среднее значение пикселов в окрестности звезды в отсчетах АЦП.

Для каналов с узким спектральным диапазоном камер всего неба НГК РАН производителем были проведены работы по абсолютной калибровке. В дальнейшем для спектральных каналов 557.7 и 630 nm приводятся данные в энергетических единицах. На третьем этапе проводится оценка полной атмосферной оптической толщины $\tau(\lambda)_{total}$. Расчет производится для каждого кадра камеры и для каждой идентифицированной звезды, внеатмосферные яркости которых приведены в каталоге [18]. Среднее количество звезд на кадре, используемых для расчета, — 9. Полная атмосферная оптическая толщина $\tau(\lambda)_{total}$ для каждой звезды рассчитывается по формуле [19]

$$\tau(\lambda)_{total} = \frac{-\ln \frac{E}{E_0}}{M}, \quad (2)$$

где E — зарегистрированная яркость идентифицированной звезды, E_0 — внеатмосферная яркость звезды для выбранного спектрального канала [18], M — оптическая воздушная масса, равная секансу зенитного угла звезды.

Спектральные характеристики звезд E_0 взяты из каталога [18], в котором приведено распределение энергии в спектрах 602 звезд, создаваемых звездами на границе земной атмосферы. Для дальнейшего анализа были

выбраны спектральные каналы камер 557.7 и 630 nm, которые регистрируются камерами всего неба НГК РАН с высоким времененным разрешением и попадают в спектральный диапазон, приведенный в каталоге [18]. Например, значения внеатмосферной яркости Полярной звезды для длин волн 577.7 и 630 nm, согласно каталогу, составляют $5.78 \cdot 10^{-2} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ и $5.02 \cdot 10^{-2} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ соответственно. С учетом полуширины пропускания 2 nm интерференционных фильтров 557.7 и 630 nm освещенности для каналов камер 557.7 и 630 nm составят $5.78 \cdot 10^{-9} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ и $5.02 \cdot 10^{-9} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ соответственно.

Для сравнения с результатами обработки данных камер ASI0 и ASI1, полученными по описанной выше методике, в настоящей работе мы используем данные о полной атмосферной оптической толщине, полученные с помощью автоматизированного солнечного фотометра СЕ-318, расположенного в ГФО ИСЗФ СО РАН и входящего в состав мировой наземной сети станций „Аэронет“ [13]. Фотометр регистрирует прямое солнечное излучение в 8 спектральных каналах: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 и 1020 nm [19]. Для сравнения были использованы средние дневные значения полной атмосферной оптической толщины на длине волны 500 и 675 nm за период март–ноябрь 2021 г. (уровень обработки данных 2.0, включающий фильтрацию облачности [13]). Конечно, данные о прозрачности атмосферы,

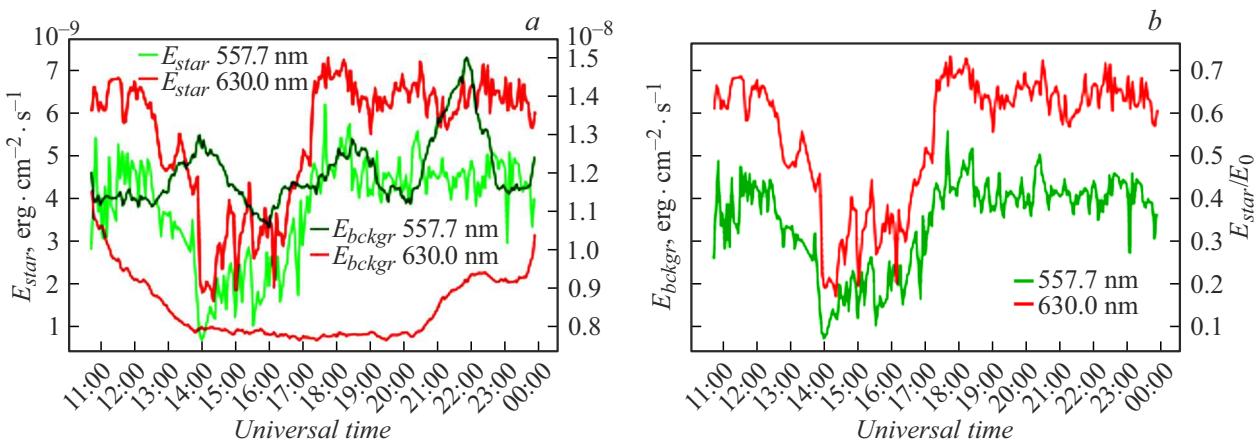


Рис. 2. Временной ход интенсивности Полярной звезды 01.01.2022 г., рассчитанный по данным камеры ASIO (панель *a*), в спектральных каналах 557.7 nm (зеленая кривая) и 630 nm (красная кривая). Темно-зеленая и темно-красная кривые — временной ход интенсивности, рассчитанный в окрестности Полярной звезды ($\pm 5^\circ$), в спектральных каналах 557.7 и 630 nm соответственно. На панели *b* показан временной ход захронометрированной интенсивности Полярной звезды, нормированной на значение ее внеатмосферной яркости в соответствующих спектральных диапазонах [18].

полученные с помощью солнечного фотометра в дневное время суток, и данные с камер всего неба, полученные в ночное время суток, могут иметь различия во внутрисистемной динамике, но они должны иметь общие черты в отражении процессов на больших временных масштабах.

2. Результаты и обсуждение

Нами была проведена апробация вышеизложенной методики на данных камер всего неба НГК РАН. На рис. 2, *a* приведен временной ход интенсивности Полярной звезды 1 января 2022 г. в спектральных диапазонах 557.7 и 630 nm, рассчитанный по вышеизложенной методике. Кроме того, приведен временной ход интенсивности, усредненной в окрестности Полярной звезды в соответствующих спектральных каналах. На рис. 2, *b* показан временной ход отношения интенсивности Полярной звезды, зарегистрированной в каналах 557.7 и 630 nm камеры ASIO (E_{star}) к освещенности, создаваемой Полярной звездой на границе земной атмосферы (E_0) [18]. Результаты, представленные на рис. 2, демонстрируют применимость методики для интерпретации наблюдений собственного свечения верхней атмосферы. Локальные максимумы в 14:00, 18:30 и 21:40 UT отражают вариации атмосферной эмиссии 557.7 nm. Уменьшение рассчитанной интенсивности Полярной звезды на временном промежутке 13–17:30 UT совпадает с минимумом средней интенсивности эмиссии 557.7 nm в 16 UT. Это уменьшение ниже, чем остальные минимумы за рассматриваемый период, что может быть связано с прохождением слабой облачности или дымки. Уменьшение интенсивности Полярной звезды более чем в три раза может быть связано с недостатками алгоритма выделения звезды на кадре камеры вследствие размытия ее изображения под действием облачности.

На рис. 3 показан временной ход интенсивности нескольких звезд (E_{star}), нормированной на их внеатмосферные яркости (E_0). Экспериментальные данные получены с помощью камеры ASIO 01 января 2022 г. Можно отметить некоторые значения относительной интенсивности звезд, превышающие или равные единице (рис. 3, *a*). Это может быть связано как с неточностями в звездном каталоге [18], так и с ошибками алгоритма определения звездных интенсивностей. Камеры с узкими светофильтрами имеют свои преимущества и недостатки для задач оценки атмосферного поглощения в темное время суток. С одной стороны, регистрируется практически монохроматический поток излучения, что облегчает расчет атмосферной экстинкции и повышает его точность [11]. С другой стороны, спектральные каналы таких камер настроены на линии высвечивания атмосферных эмиссий, интенсивности которых даже в геомагнитно спокойные ночи сравнимы, в узком спектральном диапазоне, с интенсивностями звезд (рис. 1). Это ухудшает отношение сигнал/шум при процедуре выделения звезды по сравнению с системами с широким спектральным диапазоном или диапазоном вне эмиссионных линий и полос верхней атмосферы. Кроме того, каналы камер работают в спектральных диапазонах с выраженным поглощением, в отличие от солнечного фотометра, спектральные каналы которого подобраны с учетом окон прозрачности атмосферы [20].

В 2021 г. камеры всего неба (темное время суток) и солнечный фотометр AERONET (светлое время суток) работали совместно, что позволило провести некоторое сравнение. На рис. 4 и 5 показаны вариации полной атмосферной оптической толщины по данным фотометра сети AERONET и вариации по данным камеры всего неба ASIO в период совместной работы этих приборов. Были подобраны наиболее близкие спектральные ди-

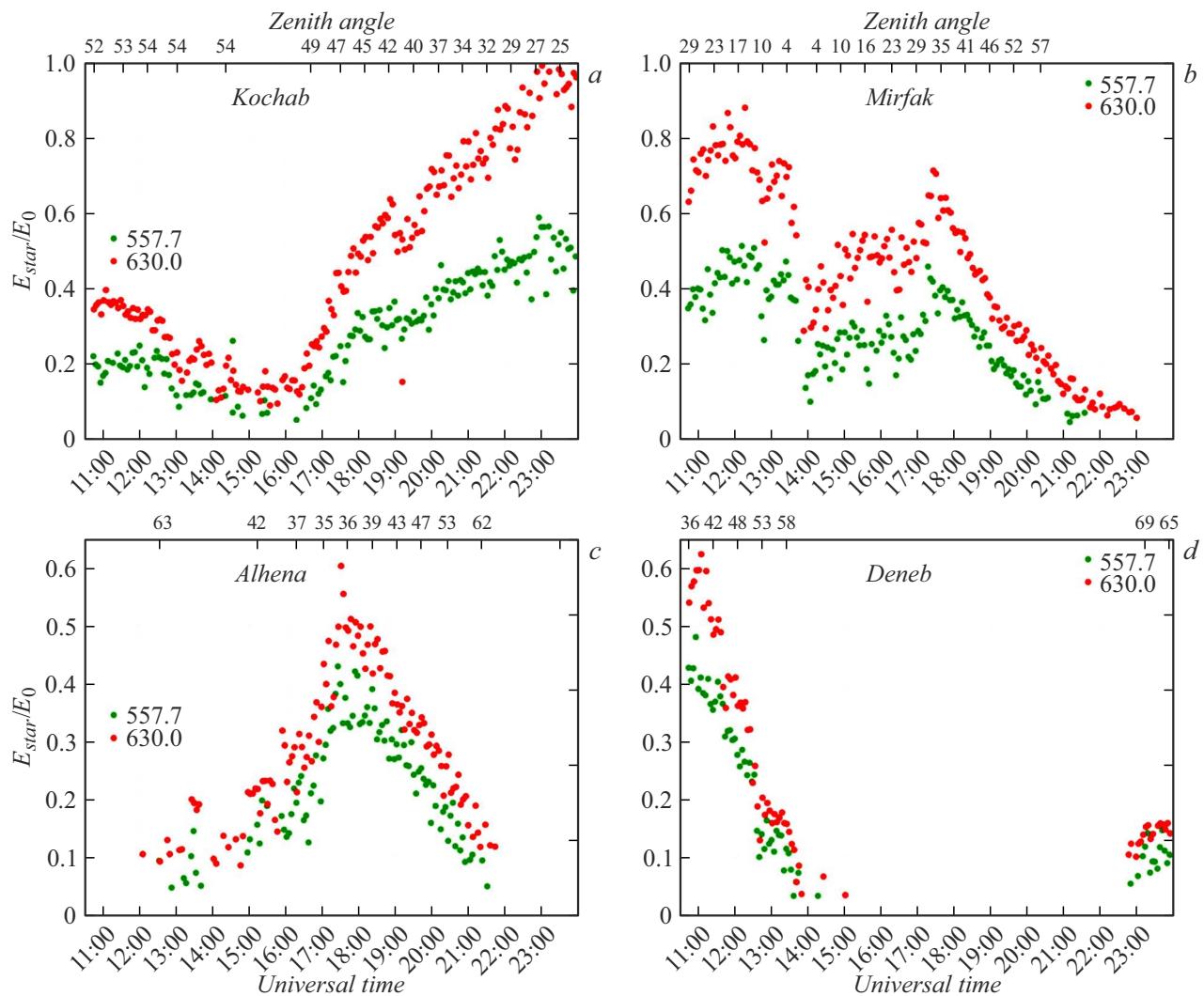


Рис. 3. Временной ход относительной интенсивности звезд Кохаб (a), Мирфак (b), Альхена (c) и Денеб (d) 01.01.2022 г., рассчитанный по данным камеры ASI0 в спектральных каналах 557.7 nm (зеленый цвет) и 630 nm (красный цвет).

пазоны приборов: рис. 4 — 557.7 nm (ASI0) и 500 nm (AERONET), рис. 5 — 630.0 nm (ASI0) и 675 nm (AERONET).

Значения полной атмосферной толщины, полученные различными методами с помощью фотометра CIMEL в светлое время суток и с помощью камеры всего неба в темное время суток, довольно хорошо согласуются между собой (рис. 4, 5). Выделяется максимум в августе 2021 г., связанный с большим количеством лесных пожаров, действовавших в этот период.

На рис. 6 показаны результаты расчета полной атмосферной толщины по данным камер всего неба НГК в спектральных линиях 557.7 и 630 nm за период с апреля 2021 г. по декабрь 2023 г. Приведены значения суточного (тонкие линии) и месячного (толстые линии) усреднения. Замечен тренд медленного понижения значений полной атмосферной оптической толщины и резкое уменьшение разности поглощения в спектральных линиях 557.7 и 630 nm.

На рис. 7 приведен сезонный ход полной атмосферной толщины за 2021–2023 гг., измеренный камерами всего неба НГК. Как видно из рисунка, для спектральных диапазонов 557.7 и 630 nm максимум полной атмосферной толщины наблюдается в августе месяце для 2021 и 2023 гг. В 2022 г. характерного максимума не прослеживается. Минимальные значения полной атмосферной толщины наблюдаются в весенние и осенние месяцы. В работах [21,22] приведен средний годовой ход среднемесячных значений АОТ, отражающий сезонные вариации АОТ для длин волн 380, 500 и 870 nm по данным фотометра CIMEL CE-318, установленном в ГФО ИСЗФ СО РАН. Было получено, что максимальные значения АОТ для длин волн 380 и 500 nm наблюдаются в июне, тогда как в длинноволновой области спектра 870 nm максимальные значения АОТ приходятся на август месяц. В общем случае, вариации общей атмосферной толщины атмосферы могут отличаться от вариаций АОТ, так как, помимо аэрозольного ослабления, на общую

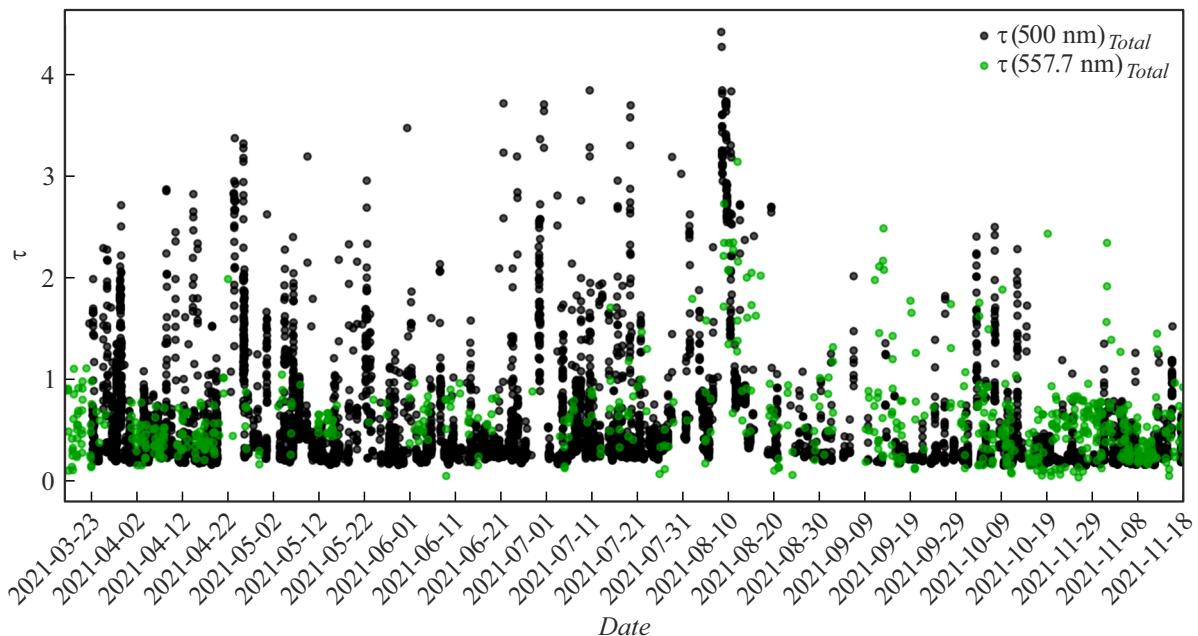


Рис. 4. Полная атмосферная оптическая толщина для длины волны 500 nm по данным фотометра CIMEL (черный цвет) и по данным спектрального канала 557.7 nm камеры всего неба (зеленый цвет).

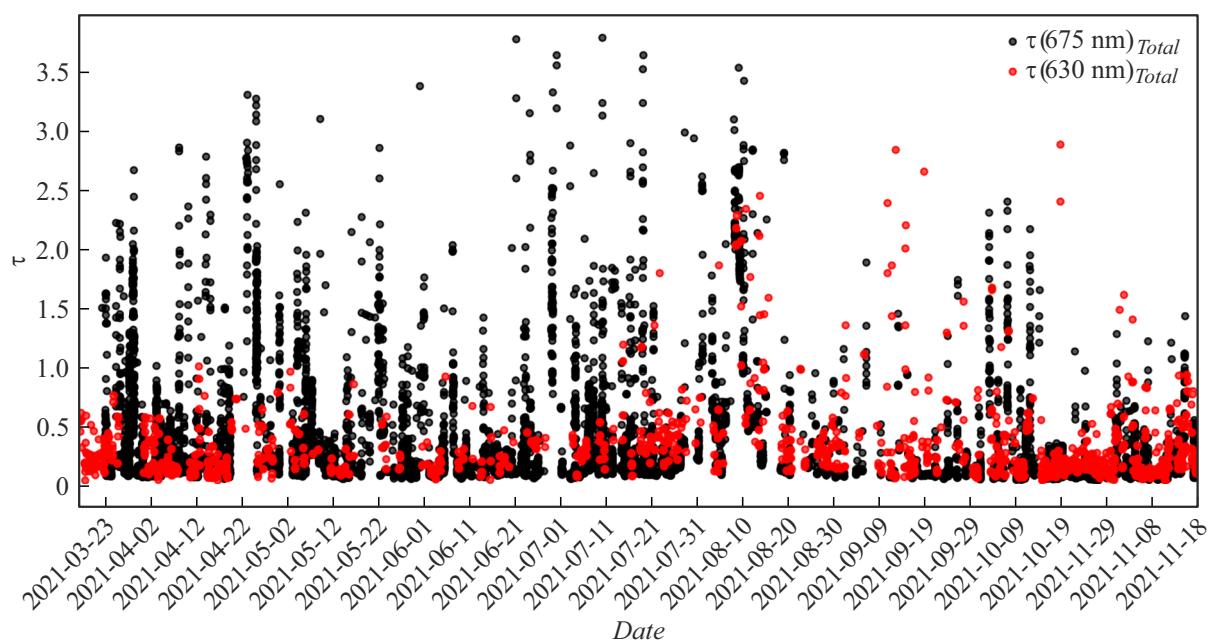


Рис. 5. Полная атмосферная оптическая толщина для длины волны 675 nm по данным фотометра CIMEL (черный цвет) и по данным спектрального канала 630 nm камеры всего неба (красный цвет).

атмосферную толщу влияют молекулярное (рэлеевское) рассеяние и молекулярное поглощение (водяной пар, озон и другие газы).

Заключение

Полученные в работе результаты демонстрируют возможность оценки атмосферного поглощения с помощью

данных камер всего неба с узким спектральным диапазоном, предназначенных для регистрации пространственного распределения интенсивности атмосферных эмиссий верхней атмосферы Земли. Камеры всего неба НГК работают в мониторинговом режиме и могут использоваться не только в исследованиях верхней атмосферы, но и для экологического мониторинга, а также для дополнения информации о вариациях параметров нижней атмо-

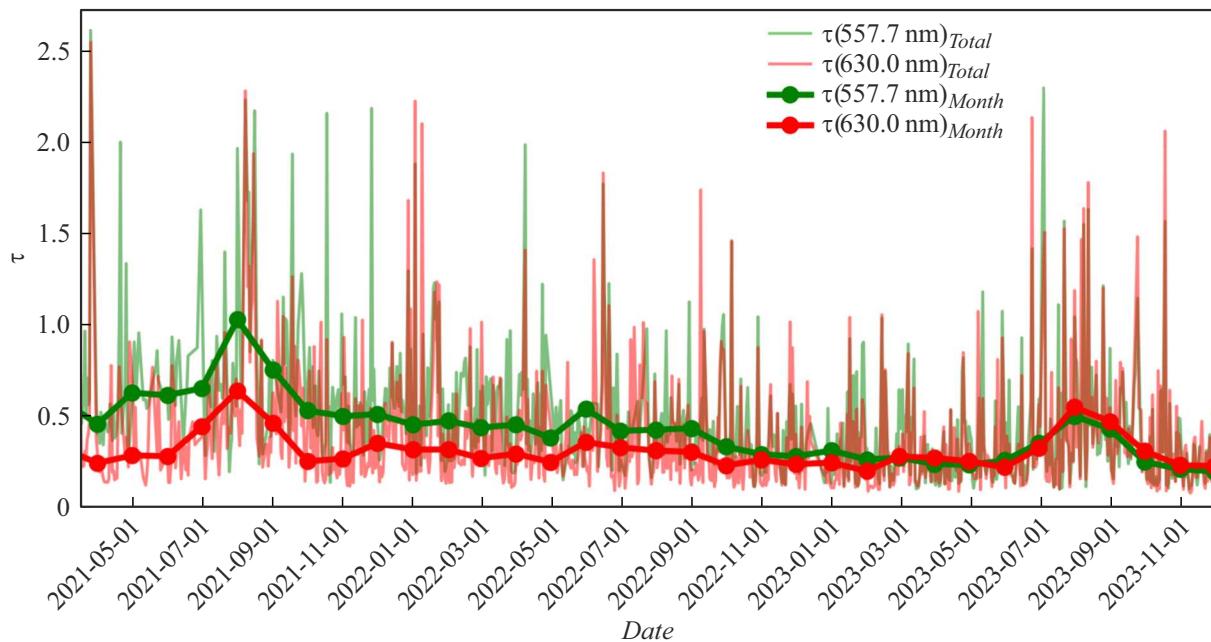


Рис. 6. Временний ряд среднесуточных (тонкие линии) и среднемесячных значений полной атмосферной толщи по данным камер всего неба НГК в спектральных линиях 557.7 nm (зеленые) и 630 nm (красные).

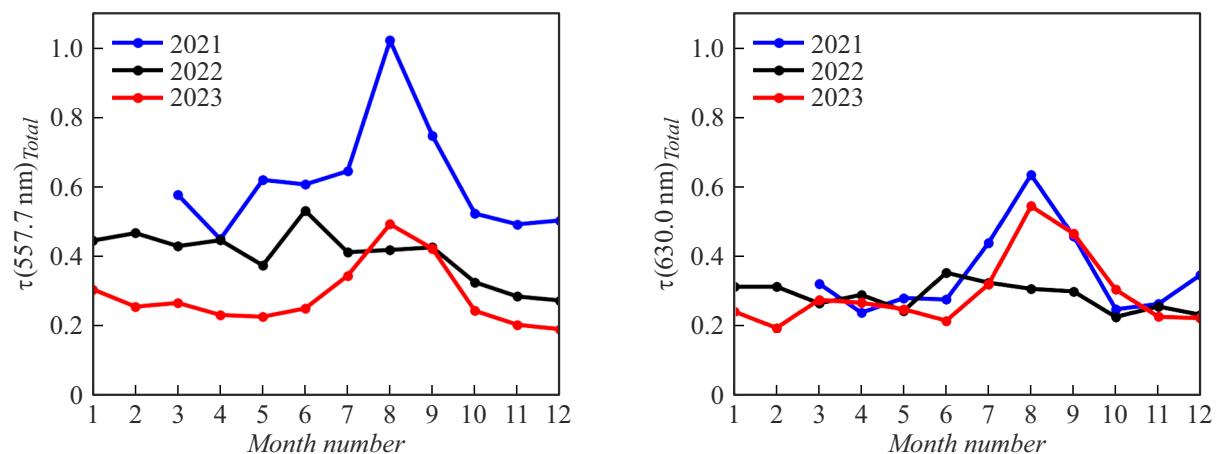


Рис. 7. Сезонный ход полной атмосферной толщи атмосферы в 2021–2023 гг. для спектральных диапазонов 557.7 (слева) и 630 nm (справа) по данным камеры всего неба НГК.

сферы. С помощью разработанной методики решаются следующие задачи: оценка прозрачности атмосферы в темное время суток; относительная калибровка камер всего неба по „эталонным“ ясным ночам; получение дополнительной информации для интерпретации данных о пространственном распределении интенсивности атмосферных эмиссий; оценка критериев для идентификации перемещающихся волновых возмущений (отсев слабой облачности, дымки и т. п.). На данном этапе мы показываем возможность оценки прозрачности атмосферы по данным камер всего неба с узким спектральным диапазоном, не претендуя при этом на точность измерений. Для повышения точности методики необходимо улучшение алгоритма выделения и расчета интенсивности звезд

на кадре, а также использование более современных звездных каталогов и соответственно более точных данных о внеатмосферной интенсивности звезд. Кроме того, необходима поверка (абсолютная и относительная калибровка) используемых камер всего неба.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-Г3/С3569/278), экспериментальные данные получены с использованием УНУ „Оптические инструменты“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.В. Михалев, М.А. Тащилин. Оптика атмосферы и океана, **20**, 555 (2007).
- [2] А.В. Михалев, М.А. Тащилин, С.М. Сакерин. Оптика атмосферы и океана, **32** (3), 202 (2019).
- [3] А.В. Михалев, С.В. Подлесный, П.В. Стоева. Солнечно-земная физика, **2** (3), 74 (2016).
- [4] D. Duriscoe, Ch. Luginbuhl, Ch. Moore. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **119** (852), 192 (2007).
- [5] N. Volgenau, E. Manne-Nicholas, S. Foale, M. Bowman, D. Harbeck, M. Daily. *Using all-sky cameras to measure atmospheric transparency at robotic telescope sites*. In Ch.R. Benn, A. Chrysostomou, L.J. Storrie-Lombardi (editors). *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems X*, volume 13098 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* (page 13098E, July 2024)
- [6] D. Mandat, M. Pech, M. Hrabovsky, P. Schovanek, M. Palatka, P. Travnicek, M. Prouza, J. Ebr. *All Sky Camera instrument for night sky monitoring* (eprint arXiv:1402.4762, 2014)
- [7] P. Fiorentin, A. Bertolo, S. Cavazzani, S. Ortolani. Remote Sensing, **15** (17), 4196 (2023).
- [8] T. Sciezor, A. Czaplicka. J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, **254**, 107168 (2020).
- [9] O.S. Ugolnikov. J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, **259**, 106242 (2024).
- [10] R. Roman, D. González-Fernández, J.C. Antuna Sánchez, C. Herrero del Barrio, S. Herrero-Anta, Á. Barreto, V.E. Cachorro, L. Doppler, R. González, C. Ritter, D. Mateos, N. Kouremeti, G. Copes, A. Calle, M.J. Granados-Muñoz, C. Toledano, Á.M. de Frutos. Atmospheric Measurement Techniques, **18** (13), 2847 (2025).
- [11] W. Romanishin. *An Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs* (CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014)
- [12] Р.В. Васильев, М.Ф. Артамонов, А.Б. Белецкий, О.С. Зоркальцева, Е.С. Комарова, И.В. Медведева, А.В. Михалев, С.В. Подлесный, К.Г. Ратовский, Т.Е. Сыренова, М.А. Тащилин, И.Д. Ткачев. Солнечно-земная физика, **6**, 105 (2020).
- [13] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (Дата обращения: 22.09.2025)
- [14] J. Xu, Q. Li, L. Sun, X. Liu, W. Yuan, W. Wang, J. Yue, Sh. Zhang, W. Liu, G. Jiang, K. Wu, H. Gao, Ch. Lai. *The Ground-Based Airglow Imager Network in China* (American Geophysical Union (AGU), 2021), ch. 19, p. 365–394
- [15] Т.Е. Сыренова, А.Б. Белецкий, Р.В. Васильев. ЖТФ, **91**(12), 1990 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51765.172-21
[T.E. Syrenova, A.B. Beletsky, R.V. Vasilyev. Tech. Phys., **67** (15), 2416 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.15.55269.172-21]
- [16] R.V. Vasilyev, T.E. Syrenova, A.B. Beletsky, M.F. Artamonov, E.G. Merzlyakov, A.V. Podlesny, M.V. Cedric. Atmosphere, **12** (7), 841 (2021).
- [17] Электронный ресурс. Brandon Rhodes. PyEphem: Astronomical Computations in Python, 2024 (Дата обращения: 22.09.2025)
- [18] А.В. Харитонов. *Сводный спектрофотометрический каталог звезд* („Наука“ Казахской ССР, 1978)
- [19] D. Giles, A. Sinyuk, M. Sorokin, J. Schafer, A. Smirnov, I. Slutsker, Th. Eck, B. Holben, J. Lewis, J. Campbell, E. Welton, S. Korkin, A. Lyapustin. Atmospheric Measurement Techniques, **12** (1), 169 (2019).
- [20] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.cimel.fr/solutions/ce318-t/> (дата обращения: 22.09.2025)
- [21] M. Taschilin, A. Mikhalev, D. Kabanov. *Variations of atmospheric aerosol optical depth in the Tunka valley during 2004–2017*. In 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (SPIE, 2018), v. 10833, p. 108334M.
- [22] M. Taschilin, I. Yakovleva, S. Sakerin, O. Zorkaltseva, A. Tatarnikov, E. Scheglova. Atmosphere, **12**, 1706 (2021).