

## 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 пикселей, 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 пикселей 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 толщи. 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 критериев 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 (АОТ) 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 АОТ, 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 близком меридиональном 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 CE-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

№	ASIO		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

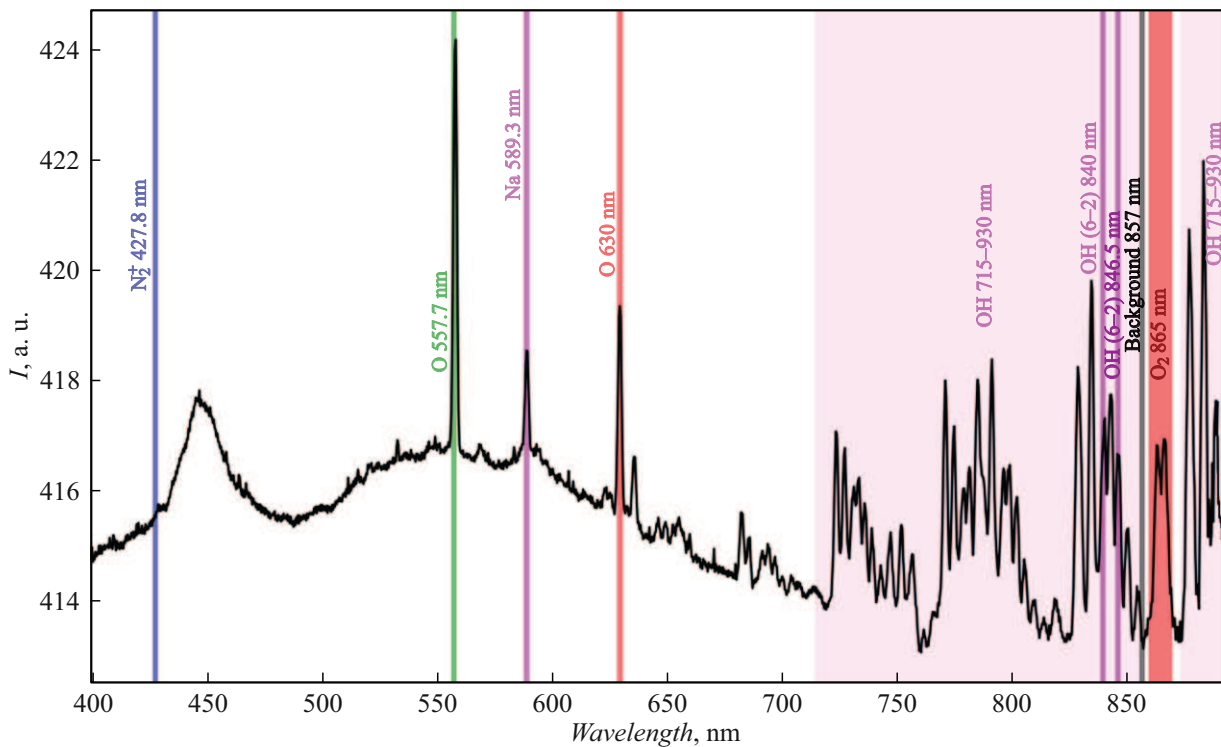
## 1. Инструменты, данные и методика

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 распределения основных эмиссий верхней атмосферы Земли. Поле зрения камер 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 гидроксид 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 пикселей, 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 пикселей на кадре и звезды из каталога RyEphem [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 пикселей в группе, интерпретируемой как звезда;  $I_{np}$  — отсчеты АЦП одного пикселя в группе;  $I_{bckgr}$  — среднее значение пикселей 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]

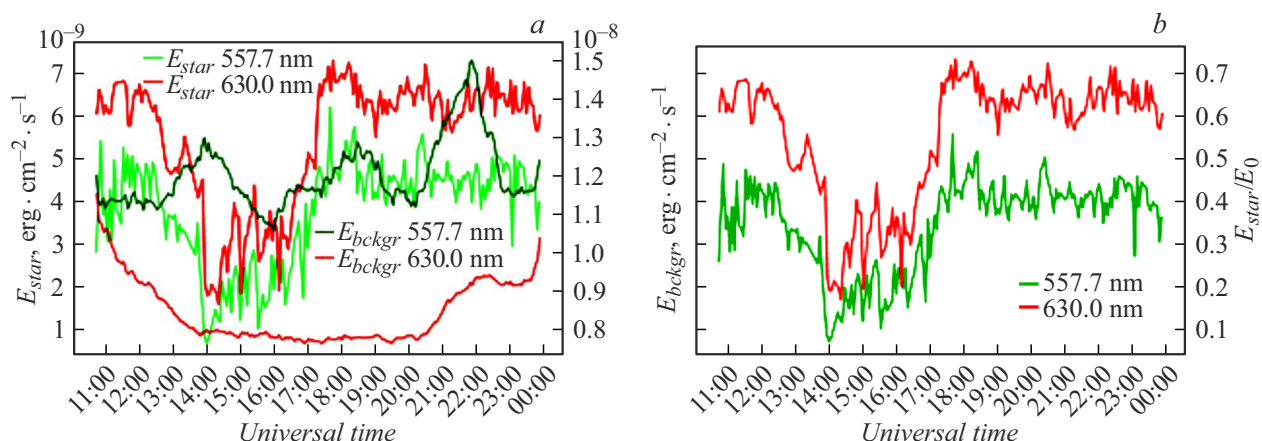
$$\tau(\lambda)_{total} = \frac{-\ln \frac{E}{E_0}}{M}, \quad (2)$$

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 временным 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  $5.78 \cdot 10^{-2} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  и  $5.02 \cdot 10^{-2} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  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 CE-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 ASI0 (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].

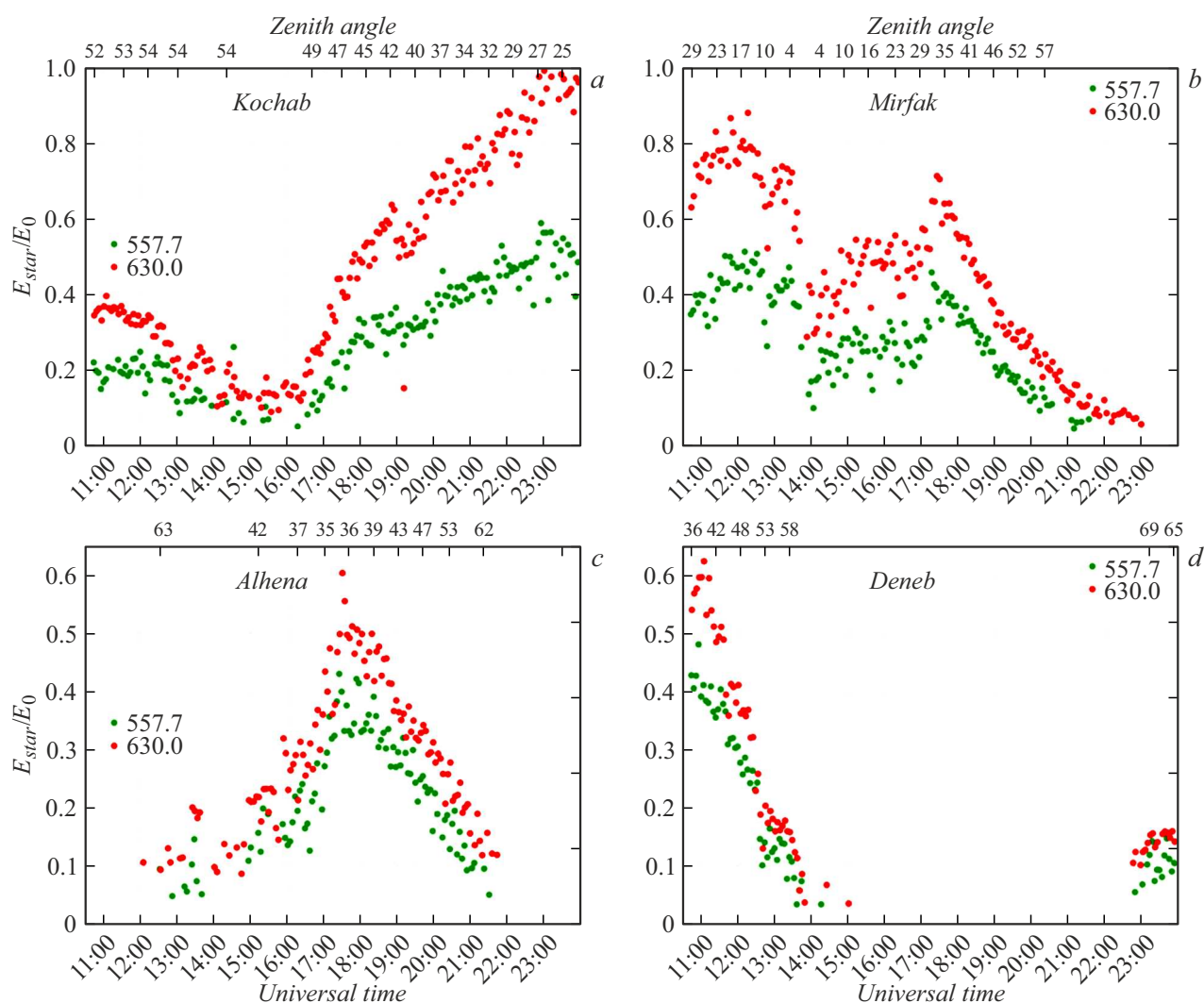
полученные с помощью солнечного фотометра в дневное время суток, и данные с камер всего неба, полученные в ночное время суток, могут иметь различия во внутрисуточной динамике, но они должны иметь общие черты в отражении процессов на больших временных масштабах.

## 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 ASI0 ( $E_{star}$ ) 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 ASI0 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 толщи по данным фотометра сети AERONET и вариации по данным камеры всего неба ASI0 в период совместной работы этих приборов. Были подобраны наиболее близкие спектральные диа-



**Рис. 3.** Временной ход относительной интенсивности звезд Кохаб (а), Мирфак (b), Альхена (с) 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).

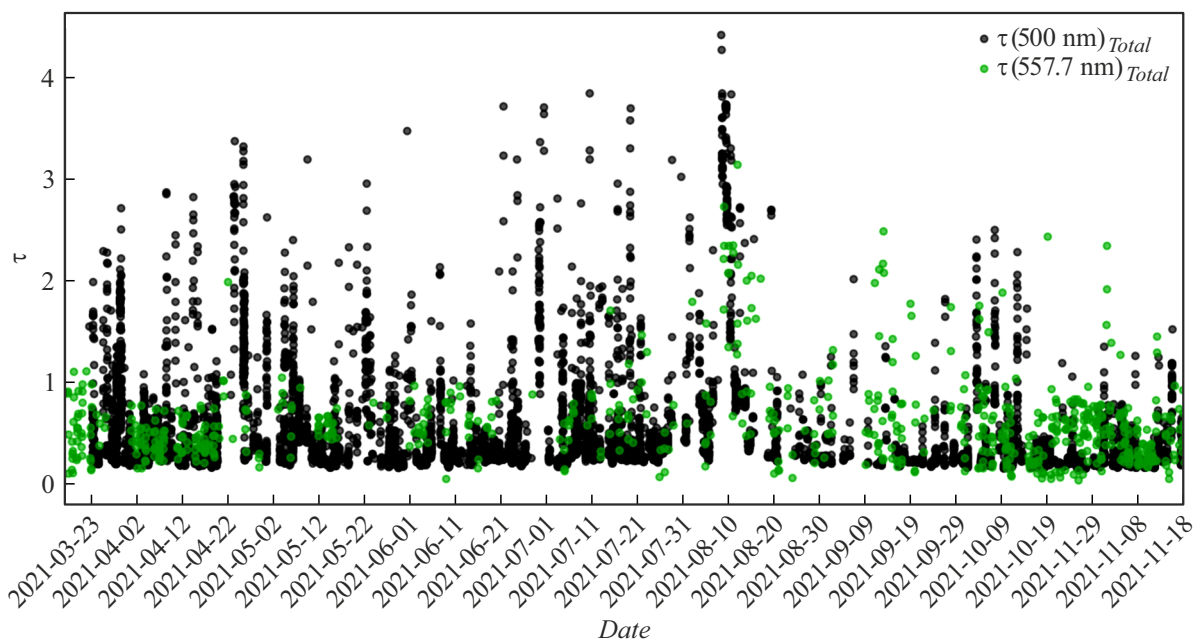
пазоны приборов: рис. 4 — 557.7 nm (ASI0) и 500 nm (AERONET), рис. 5 — 630.0 nm (ASI0) и 675 nm (AERONET).

Значения полной атмосферной толщи, 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.

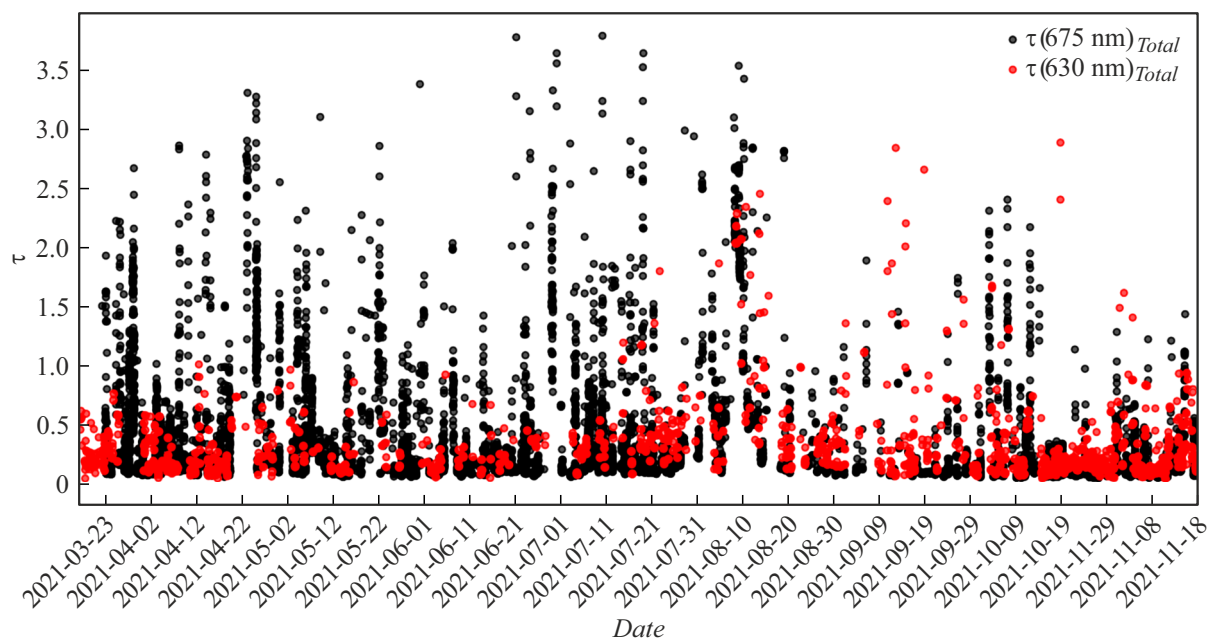
На рис. 6 показаны результаты расчета полной атмосферной толщи по данным камер всего неба НГК в спектральных линиях 557.7 и 630 nm за период с апреля 2021 г. по декабрь 2023 г. Приведены значения суточного (тонкие линии) и месячного (толстые линии) усреднения. Заметен тренд медленного понижения значений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

На рис. 7 приведен сезонный ход полной атмосферной толщи за 2021–2023 гг., измеренный камерами всего неба НГК. Как видно из рисунка, для спектральных диапазонов 557.7 и 630 nm максимум полной атмосферной толщи наблюдается в августе месяце для 2021 и 2023 гг. В 2022 г. характерного максимума не прослеживается. Минимальные значения полной атмосферной толщи 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 толщи 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).



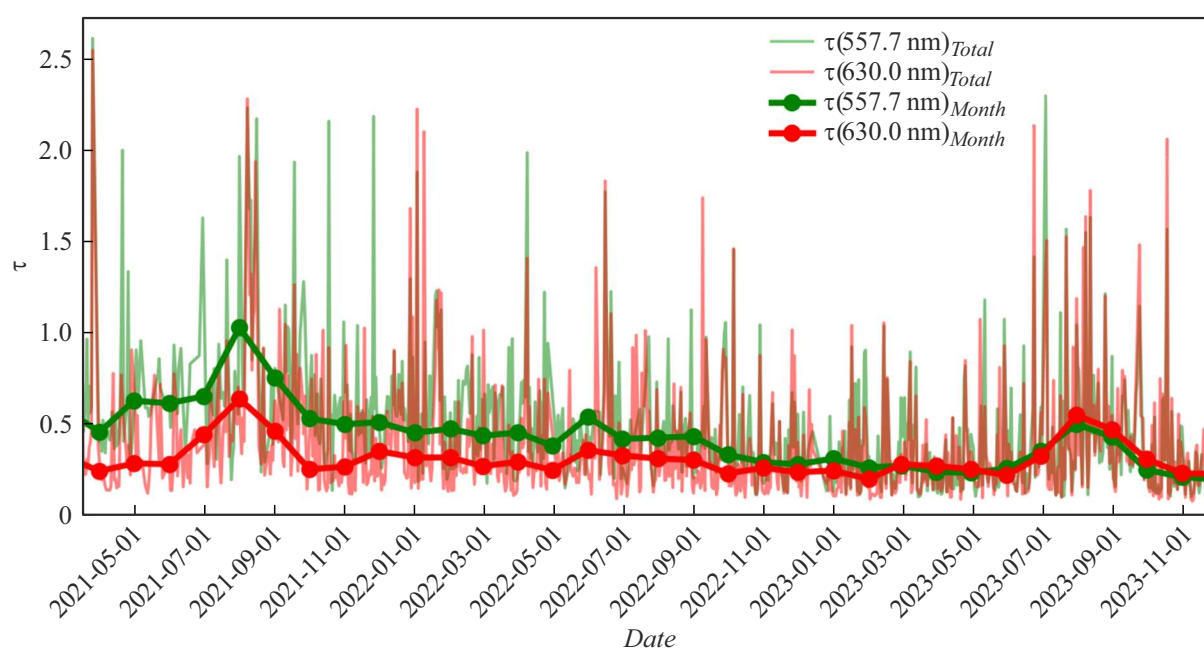
**Рис. 5.** Полная атмосферная оптическая толщина для длины волны 675 nm по данным фотометра CIMEL (черный цвет) и по данным спектрального канала 630 nm камеры всего неба (красный цвет).

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

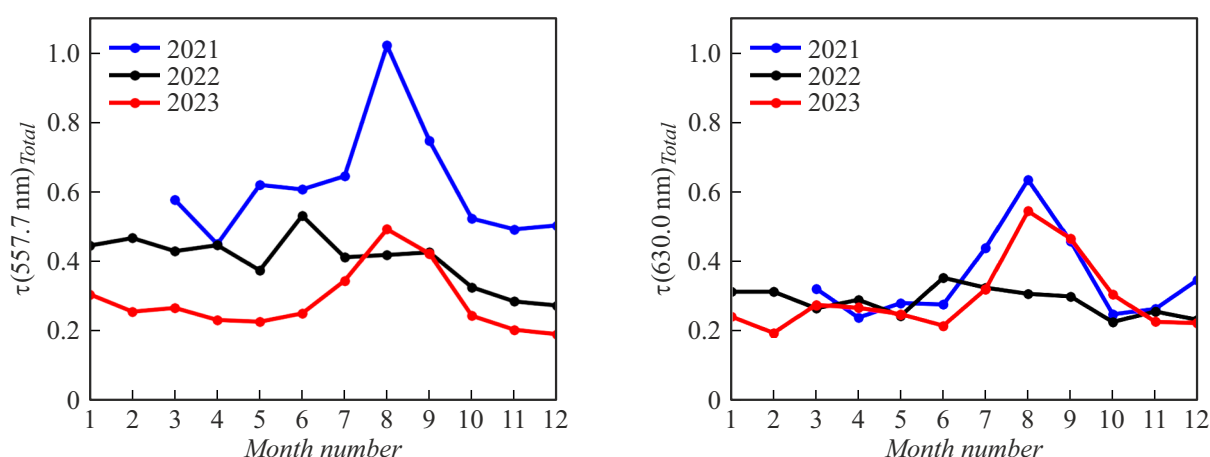
## Заключение

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.** Временной 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-ГЗ/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 130980E, 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 [Т.Е. 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).