«Оптика атмосферы и океана», **35**, № 12 (2022)
DOI: 10.15372/AOO20221203

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510.522:551521.3

Многолетние наблюдения ореольной индикатрисы рассеяния в приземном слое пригорода Томска (2010–2021 гг.)

Вас.В. Полькин, В.В. Полькин✉, М.В. Панченко*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 5.07.2022 г.;
после доработки 18.07.2022 г.;
принята к печати 26.10.2022 г.

Анализируются данные долговременных измерений ореольной индикатрисы рассеяния для углов $\varphi = 1{,}2°$ и $\varphi = 20°$ ($I_{1,2}$ и I_{20}), которые были получены с помощью ореольного фотометра закрытого типа на аэрозольной станции ИАО СО РАН в 2010–2021 гг. Анализ временной изменчивости параметров проведен для межгодовых, годовых данных и суточного хода часовых измерений. Среднесуточные значения параметров $I_{1,2}$, I_{20} рассчитывались из часовых данных, среднемесячные – из среднесуточных, среднегодовые – из среднемесячных. Слабый, но значимый (по уровню $p = 0{,}05$) временной тренд обнаружен только для межгодовых значений $I_{1,2}$ – 1,14% в год. В годовом ходе $I_{1,2}$ отчетливо наблюдается монотонный рост значений от зимних месяцев к летним, а в годовом ходе I_{20} – наоборот уменьшение. Дымы удаленных лесных пожаров в 2012, 2016 гг. и частично 2018, 2019 гг. нарушают эту картину повышенными значениями I_{20} с июля по сентябрь. Годовые вариации суточного хода среднемесячных значений $I_{1,2}$, I_{20} и отношения $I_{20}/I_{1,2}$ характерны для континентального приземного аэрозоля. Дымы удаленных лесных пожаров приводят к высоким значениям I_{20} в ночное, утреннее и вечернее время, а уменьшение I_{20} в дневное время не достоверно с вероятностью 0,95 из-за высоких СКО.

Ключевые слова: ореольная индикатриса рассеяния, временная изменчивость, субмикронный и крупнодисперсный атмосферный аэрозоль; small-angel scattering phase function, submicron and coarse atmospheric aerosol, temporal variability.

Введение

Информация о свойствах атмосферного аэрозоля необходима для многих научных и прикладных задач, таких как расчеты радиационного форсинга в климатических моделях [1–7], оценка эффективности работы оптико-электронных приборов различного назначения и коррекция результатов зондирования земной и водной поверхностей со спутников [8–15]. Большой объем сведений о характеристиках атмосферного аэрозоля и основных процессах его образования и трансформации был получен еще к концу прошлого века [16–26], однако и в настоящее время недостаток знаний остро ощущается при проведении расчетов для различных географических пунктов. Поэтому организация постоянных наблюдений и интерпретация получаемых данных по-прежнему актуальны [16, 27]. Интерес представляет изучение одной из важных, но менее изученных фракций аэрозоля – крупнодисперсной (грубодисперсной), которая дает существенный вклад в объемную концентрацию аэрозоля и во многом определяет его оптические свойства [28, 29]. Вклад крупных частиц является определяющим для углов рассеяния, близких к направлению распространения света в атмосфере, и поэтому один из наиболее эффективных методов их исследования – изучение ореольной индикатрисы [30–33].

В настоящей работе представлены результаты круглосуточных измерений коэффициента направленного рассеяния $I(\varphi)$ (индикатрисы рассеяния) в диапазоне углов $\varphi = 1{,}2 \div 20°$ в приземном слое атмосферы пригорода Томска в 2010–2021 гг. на аэрозольной станции ИОА СО РАН. В мониторинговом режиме проведено около 80 тыс. сеансов измерений $I(\varphi)$ с периодом в 1 ч. В наших предыдущих публикациях исследовались средние значения $I(\varphi)$ для каждого года, сезона и месяца [34–36]. Поскольку $I(\varphi)$ монотонно убывает с увеличением угла рассеяния φ и $I(\varphi = 1{,}2°)$ главным образом обусловлена содержанием грубодисперсных частиц

* Василий Викторович Полькин (pv@iao.ru); Виктор Викторович Полькин (victor@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru).

© Полькин Вас.В., Полькин В.В., Панченко М.В., 2022

радиусами $r > 1$ мкм, а $I(\varphi = 20°)$ субмикронных частиц $r < 1$ мкм [32, 33, 37], в данной работе мы ограничились анализом значений только $I(1{,}2°)$ и $I(20°)$ и их отношения $I(20°)/I(1{,}2°)$.

Аппаратура и методика измерений

Методические и аппаратурные аспекты работы ореольного фотометра подробно описаны в [38, 39], здесь отметим только основные моменты. Устройство забора воздуха из атмосферы располагалось на высоте около 10 м над подстилающей поверхностью. Аэрозоль прокачивался через 6-метровую светонепроницаемую камеру, что позволяло проводить эксперименты круглосуточно. Источником излучения служил лазерный модуль KLM-650-40 (длина волны 650 нм). Приемником рассеянного излучения была цифровая матричная видеокамера SDU 285, которая обеспечивала одновременное измерение индикатрисы рассеяния в диапазоне $\varphi = 1{,}2 \div 20°$. Детальная калибровка фотометра в абсолютных единицах ($км^{-1} \cdot ср^{-1}$) проводилась с использованием фторопластового экрана с известным коэффициентом пропускания [31, 38, 39]. Оперативный контроль калибровки осуществлялся перед каждым часовым измерением. Угловая зависимость $I(\varphi)$ пересчитывалась на фиксированную сетку из 13 углов с помощью сплайновой интерполяции. Блок управления принимал команды с компьютера для включения лазерного модуля и прокачки воздуха через камеру, а также управления калибровочным экраном. Запуск, считывание информации и ее дальнейшая обработка осуществлялись компьютером под управлением сервисной программы в автоматическом режиме.

Межгодовая изменчивость

Для анализа мы выбрали значения индикатрисы рассеяния для двух углов, крайних в диапазоне измерения: $I(1{,}2°)$ и $I(20°)$ за период 2010–2021 гг. Обозначим их как $I_{1,2}$ и I_{20}. Проанализируем временную изменчивость как самих параметров, так и их отношения $I_{20}/I_{1,2}$, которое характеризует пропорцию концентраций субмикронных и крупнодисперсных частиц [22, 29, 40].

На рис. 1 приведен межгодовой ход среднегодовых значений параметров $I_{1,2}$, I_{20} и $I_{20}/I_{1,2}$. Среднесуточные значения рассчитывались из часовых, среднемесячные – из среднесуточных, среднегодовые – из среднемесячных данных.

Из рис. 1 видно, что повышенными значениями параметра I_{20} выделяются 2012, 2016, 2018, 2019 гг. В Западной Сибири именно в 2012 и 2016 гг. отмечались мощные и продолжительные лесные пожары, а в 2018 и 2019 гг. более слабо. Понятно, что вклад дымового аэрозоля в эти периоды проявился во всех рассматриваемых массивах данных (межгодовых, среднемесячных и суточном ходе), и в первую очередь отразился на средних, максимальных значениях параметров и СКО. Сильнее

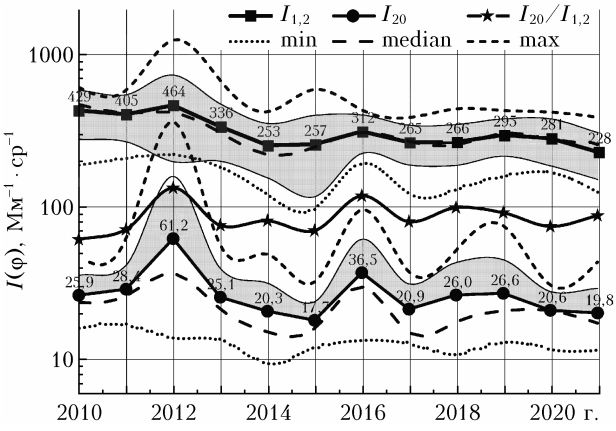


Рис. 1. Среднегодовые значения $I_{1,2}$, I_{20} и $I_{20}/I_{1,2}$. Заштрихованные области показывают среднеквадратические отклонения (СКО) от среднего

всего это сказалось на временном ходе параметра I_{20}, характеризующего рассеивающие свойства субмикронного атмосферного аэрозоля. На минимальные значения пожары повлияли в значительно меньшей степени, что позволяет с некоторым допущением принимать минимальные значения за фоновые. Как видим, за весь анализируемый период летние пожары 2012 г. внесли максимальный вклад как в средние годовые коэффициенты направленного рассеяния ($\overline{I}_{1,2} = 464$ $Мм^{-1} \cdot ср^{-1}$, $\overline{I}_{20} = 61{,}2$ $Мм^{-1} \cdot ср^{-1}$, $I_{20}/I_{1,2} = 0{,}132$), так и экстремальные ($I_{1,2}^{\max} = 1246$ $Мм^{-1} \cdot ср^{-1}$, $I_{20}^{\max} = 361$ $Мм^{-1} \cdot ср^{-1}$, $(I_{20}/I_{1,2})^{\max} = 0{,}29$). Самые низкие величины были зарегистрированы в 2015 г.: $I_{1,2}^{\min} = 97$ $Мм^{-1} \cdot ср^{-1}$, $I_{20}^{\min} = 27$ $Мм^{-1} \cdot ср^{-1}$, $(I_{20}/I_{1,2})^{\min} = 0{,}069$.

Отметим, что хорошее совпадение среднегодовых значений $I_{1,2}$ с медианными может свидетельствовать о близком к нормальному закону распределения этого параметра. В свою очередь, в межгодовом ходе I_{20} медианные значения были заметно меньше средних, что, по-видимому, указывает на близость распределения значений I_{20} к логнормальному закону.

В 2012 г. наибольшая изменчивость значений наблюдалась у I_{20}, для которого коэффициент вариации V [41] составил 157%, а для $I_{1,2}$ – всего 58%. Это свидетельствует о том, что в 2012 г., наиболее существенные вариации были обусловлены субмикронными частицами от пожаров. Минимальные коэффициенты вариации для I_{20} наблюдались в 2015 г. ($V_{20}^{\min} = 32\%$), а для $I_{1,2}$ в 2019 г. ($V_{1,2}^{\min} = 28\%$).

Для среднегодовых значений $I_{1,2}$, I_{20} и $I_{20}/I_{1,2}$ был проведен спектральный анализ по методу быстрого преобразования Фурье, который выявил отсутствие значимых временных ритмов с вероятностью 0,95. Оценка долговременных трендов среднегодовых значений $I_{1,2}$, I_{20} и $I_{20}/I_{1,2}$ за 2010–2021 гг. показала следующее. Небольшое, но значимое (по уровню $p = 0{,}05$) уменьшение коэффициента направленного аэрозольного рассеяния (1,14% в год) проявилось только для $I_{1,2}$. У параметров I_{20} и $I_{20}/I_{1,2}$ значимого тренда не обнаружено.

Годовой ход

Рассмотрим внутригодовую изменчивость среднемесячных значений $I_{1,2}$, I_{20} и $I_{20}/I_{1,2}$, осредненных за 2010–2021 гг. (рис. 2). Видим, что годовой ход этих параметров ярко выражен. Обратим внимание на монотонный рост значений $I_{1,2}$ от зимних месяцев к летним и тенденцию к снижению I_{20} от зимы к лету. Очевидно, что рост значений $I_{1,2}$ от холодных месяцев к теплым вызван увеличением количества частиц, поступающих с подстилающей поверхности при сходе снежного покрова. Большие значения I_{20} зимой обусловлены накоплением субмикронного аэрозоля под инверсионным слоем, а их уменьшение в теплый период определяется усиливающимся выносом субмикронных частиц в верхние слои при прогреве подстилающей поверхности.

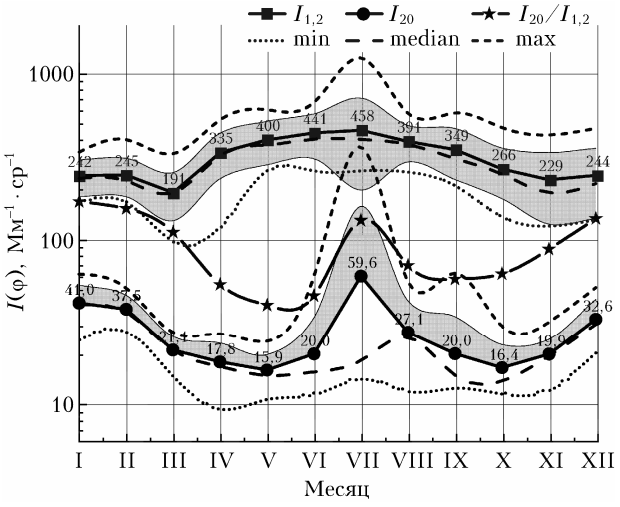


Рис. 2. Годовой ход среднемесячных значений $I_{1,2}$, I_{20} и $I_{20}/I_{1,2}$ в 2010–2021 гг. Обозначения те же, что и на рис. 1

Как видно из рис. 2, в самый теплый период года (май – сентябрь) наблюдается хорошо выраженный максимум I_{20}, что обусловлено сильным влиянием в эти месяцы дымов природных пожаров. Они являются источником аэрозоля (в первую очередь субмикронного), который вносит существенный вклад даже в среднегодовые значения I_{20} (см. рис. 1).

Отметим, что в июле 2012 г. в период влияния дымов удаленных пожаров были зарегистрированы максимальные для всего массива многолетних данных среднемесячные индикатрисы направленного рассеяния: $I_{1,2}^{\max} = 458$ Мм$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$, $I_{20}^{\max} = 59{,}6$ Мм$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$, $(I_{20}/I_{1,2})^{\max} = 0{,}117$ (см. рис. 2). Минимальные значения $I_{1,2}^{\min} = 191$ Мм$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$ отмечены в марте, $I_{20}^{\min} = 15{,}9$ Мм$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$) в мае, $(I_{20}/I_{1,2})^{\min} = 0{,}040$ в мае.

Влияние мощных дымов удаленных лесных пожаров сказалось не только на максимальных среднемесячных значениях, но и на максимальных коэффициентах вариации $V_{\max}$. Так, в июле $I_{1,2}^{\max} = 57\%$, $I_{20}^{\max} = 165\%$, а в марте $I_{1,2}^{\min} = 25\%$, $I_{20}^{\min} = 21\%$.

В распределении среднегодовых и среднемесячных величин $I_{1,2}$ наблюдается близость средних и медианных значений, характерных для нормального закона распределения. Но закон распределения значений I_{20} нарушается за счет вклада высокого содержания субмикронных частиц и приближается к логнормальному.

Суточный ход

На рис. 3 представлен суточный ход абсолютных значений $I_{1,2}$, I_{20} и отношения $I_{20}/I_{1,2}$, полученных при осреднении часовых значений для каждого месяца во всем массиве данных за 2010–2021 гг.

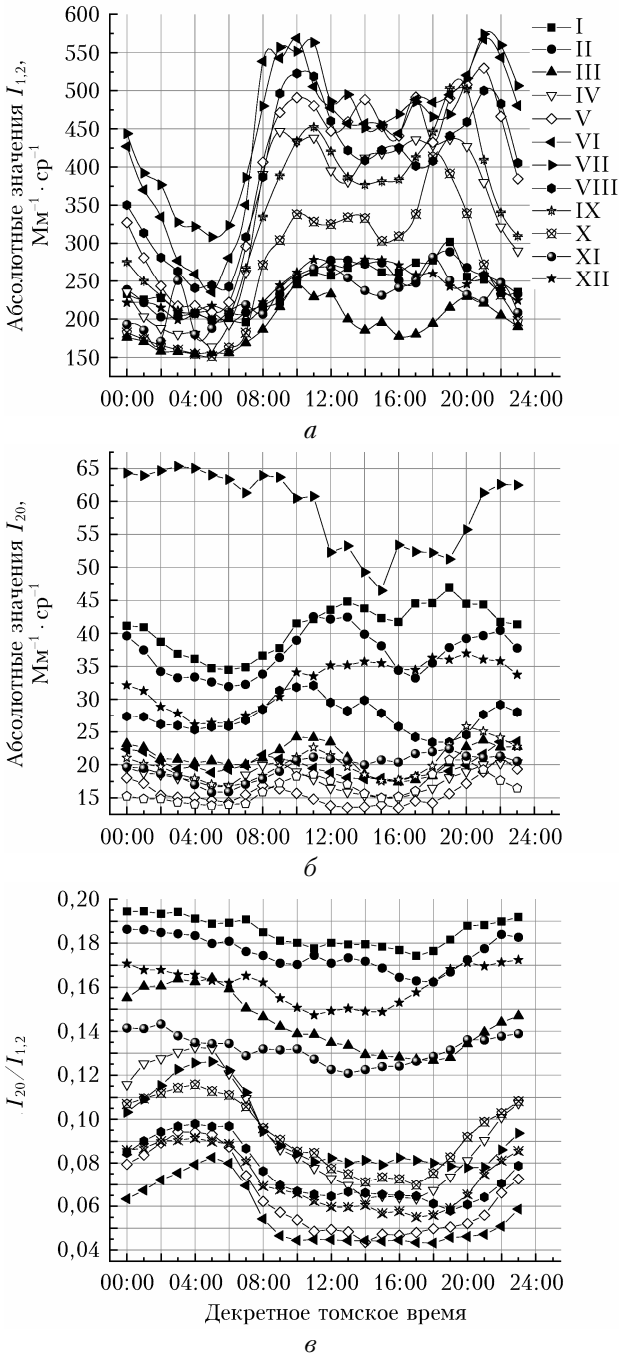


Рис. 3. Суточный ход абсолютных значений $I_{1,2}$ (*а*); I_{20} (*б*); отношения $I_{20}/I_{1,2}$ (*в*)

Во все месяцы в суточном ходе $I_{1,2}$ и I_{20} наблюдаются ночной минимум, утренний максимум, послеобеденный минимум и вечерне-ночной максимум, что является характерным для поведения континентального приземного аэрозоля [42, 43]. Как хорошо известно [42, 43], временное положение максимумов и минимумов суточного хода в общем случае зависит от продолжительности светлого и темного периода суток. По нашим данным, зимой (ноябрь – март) различие между утренним и вечерним максимумами составляет минимальную величину 6 ч между 12:00 и 18:00. А максимальна разница (11 ч) летом (июнь – август) между 10:00 и 21:00.

Самые высокие значения и размах величин ($I_{1,2}^{max}/I_{1,2}^{min}$) в суточном ходе коэффициента направленного рассеяния $I_{1,2}$ (см. рис. 3, *а*) в летние месяцы. Отношение максимума к минимуму среднемесячного значения ($I_{1,2}^{max}/I_{1,2}^{min}$) летом, когда вынос крупнодисперсных частиц с подстилающей поверхности максимален, достигает 2,4 (июнь, 05:00 и 10:00). Минимальное значение отношения $I_{1,2}^{max}/I_{1,2}^{min}$ характерно для зимы, когда подстилающая поверхность покрыта снежным покровом (в среднем 1,4 раза, 05:00 и 11:00).

Наиболее высокие значения I_{20} наблюдаются в ночное, утреннее и вечернее время, а днем по мере нагрева подстилающей поверхности идет уменьшение концентрации субмикронных частиц за счет выноса аэрозоля из приземного слоя. Обратим внимание, что даже в июльском массиве данных, явно отягощенных влиянием дымового аэрозоля, в дневное время (14:00–15:00) наблюдается отчетливый минимум I_{20}.

Как видим (рис. 3, *б*), абсолютные значения коэффициента рассеяния I_{20} заметно выше зимой, чем летом, что объясняется наличием зимнего инверсионного слоя, который способствует накоплению субмикронных частиц в нижних слоях атмосферы и выносом субмикронных частиц в верхние слои в теплый период.

Анализ суточного хода отношения $I_{20}/I_{1,2}$ (см. рис. 3, *в*), которое в значительной степени зависит от соотношения вклада субмикронных и грубодисперсных частиц в наблюдаемый состав аэрозоля, показал: в зимние месяцы суточный ход $I_{20}/I_{1,2}$, по сравнению с летними, менее выражен. Наблюдается лишь незначительный плавный минимум в дневные часы, обусловленный слабым превалированием выноса субмикронного аэрозоля над крупнодисперсным в вышележащие слои, а в ночное время – рост за счет накопления субмикронного аэрозоля в приземном слое. В теплое время года, по мере открытия и нагрева подстилающей поверхности, поступление крупнодисперсного аэрозоля в приземный слой атмосферы усиливается, достигая своего максимума летом в дневное время и минимума в ночное за счет гравитационного оседания и осаждения на препятствиях.

Заключение

На основе данных многолетних измерений в приземном слое атмосферы коэффициентов направленного рассеяния в области ореола за 2010–2021 гг. проведен анализ межгодового, сезонного и суточного хода параметров $I_{1,2}$, I_{20} и их отношения $I_{20}/I_{1,2}$. Выбор параметров продиктован следующими соображениями: величина $I_{1,2}$ главным образом обусловлена содержанием грубодисперсных частиц радиусами $r > 1$ мкм, I_{20} – субмикронных с $r < 1$ мкм, а $I_{20}/I_{1,2}$ позволяет оценить изменчивость соотношения вкладов субмикронных и грубодисперсных частиц в формирование оптических характеристик атмосферного аэрозоля.

Показано, что в массиве среднегодовых значений $I_{1,2}$, I_{20} и $I_{20}/I_{1,2}$ на временном отрезке 2010–2021 гг. с вероятностью 0,95 значимых частот не содержится. Выявлен слабый, но значимый (по уровню $p = 0{,}05$) отрицательный тренд параметра $I_{1,2}$ (1,14% в год).

Отмечено, что в межгодовом ходе наиболее высокие значения $I_{1,2}$, I_{20} и $I_{20}/I_{1,2}$ наблюдались 2012, 2016 и 2018, 2019 гг., когда пункт измерений находился под сильным влиянием дымов летних природных пожаров Западной Сибири, что проявилось даже на средних годовых характеристиках.

Выявлено, что годовой (сезонный) ход параметров $I_{1,2}$ и I_{20} носит ярко выраженный разнонаправленный характер. Отчетливо наблюдаемый рост значений $I_{1,2}$ от холодных месяцев к теплым вполне объясним освобождением подстилающей поверхности от снежного покрова. В свою очередь, снижение величины I_{20} от зимнего сезона к летнему определяется усиливающимся выносом субмикронных частиц в верхние слои тропосферы при прогреве поверхности. Следовательно, при этом изменяется и соотношение вкладов субмикронных и грубодисперсных частиц в оптические характеристики аэрозоля.

В суточном ходе $I_{1,2}$, I_{20} во все месяцы наблюдаются ночной минимум, утренний максимум, послеобеденный минимум и вечерне-ночной максимум, что характерно для континентального приземного аэрозоля. Временное положение максимумов и минимумов суточного хода в общем случае определяется продолжительностью светлого и темного времени суток. По нашим данным, зимой (ноябрь – март) различие между утренним и вечерним максимумами составляет 6 ч, между 12:00 и 18:00. Эта разница максимальна (11 ч) летом (июнь – август) между 10:00 и 21:00.

Суточный ход параметра $I_{20}/I_{1,2}$, который в общих чертах позволяет оценить динамику соотношения вклада субмикронных и грубодисперсных частиц в наблюдаемый состав аэрозоля, зимой выражен заметно слабее, чем летом. Показано, что в светлое время суток теплого периода идет вынос субмикронных частиц в верхние слои тропосферы, их концентрация в приземном слое заметно падает, а грубодисперсных – растет и соответственно заметно снижается величина параметра $I_{20}/I_{1,2}$.

Финансирование. Проведение измерений с 2010 г. выполнялось в рамках государственного задания, анализ данных и подготовка настоящей публикации осуществлена при финансовой поддержке РНФ (соглашение № 19-77-20092).

Список литературы

1. *Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Satheesh S.K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X.Y.* Clouds and Aerosols // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014. P. 571–657.
2. *IPCC*, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
3. *Кондратьев К.Я.* Глобальный климат. СПб.: Наука, 1992. 356 с.
4. *Kondratyev K.Ya.* Climatic Effects of Aerosols and Clouds. Chichester: Springer, 1999. 264 p.
5. *Кондратьев К.Я.* Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 3. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 7. С. 565–575.
6. *Кондратьев К.Я.* От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля. 7. Аэрозольное радиационное возмущение и климат // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 7. С. 535–556.
7. *Derimia Y., Dubovi O., Huang X., Lapyonok T., Litvinov P., Kostinski A.B., Dubuisson P., Ducos F.* Comprehensive tool for calculation of radiative fluxes: Illustration of shortwave aerosol radiative effect sensitivities to the details in aerosol and underlying surface characteristics // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 5763–5780. DOI: 10.5194/acp-16-5763-2016.
8. *Bouvet M., Thom K., Berthelot B., Bialek A., Czapla-Myers J., Fox N.P., Goryl P., Henry P., Ma L., Marc S., Meygre A., Wenny B.N., Woolliams E.R.* RadCalNet: A Radiometric Calibration Network for Earth observing imagers operating in the visible to shortwave infrared Spectral Range // Remote Sens. 2019. V. 11, N 20. P. 2401. DOI: 10.3390/rs11202401.
9. *Doxani G., Vermote E., Roger J.-C., Gascon F., Adriaensen S., Frantz D., Hagolle O., Hollstein A., Kirches G., Li F., Louis J., Mangin A., Pahlevan N., Pflug B., Vanhellemont Q.* Atmospheric Correction Inter-Comparison Exercise // Remote Sens. 2018. V. 10, N 2. P. 352. DOI: 10.3390/rs10020352.
10. *Li L., Dubovik O., Derimian Y., Schuster G.L., Lapyonok T., Litvinov P., Ducos F., Fuertes D., Chen C., Li Z., Lopatin A., Torres B., Che H.* Retrieval of aerosol components directly from satellite and ground-based measurements // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19, N 21. P. 13409–13443. DOI: 10.5194/acp-19-13409-2019.
11. *Satellite* aerosol remote sensing over land / A.A. Kokhanovsky, G. de Leeuw (eds.). Chichester: Springer, Praxis, 2009. 398 p. DOI: 10.1007/978-3-540-69397-0.
12. *Von Hoyningen-Huene W., Yoon J., Vountas M., Istomina L.G., Rohen G., Dinter T., Kokhanovsky A.A., Burrows J.P.* Retrieval of spectral aerosol optical thickness over land using ocean color sensors MERIS and SeaWiFS // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4, N 2. P. 151–171.
13. *Белов В.В., Тарасенков М.В., Энгель М.В., Гриднев Ю.В., Зимовая А.В., Познахарев Е.С., Абрамочкин В.Н., Федосов А.В., Кудрявцев А.Н.* Атмосферная коррекция спутниковых изображений земной поверхности в оптическом диапазоне длин волн. Оптическая связь на рассеянном излучении // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 753–757; *Belov V.V., Tarasenkov M.V., Engel M.V., Gridnev Yu.V., Zimovaya A.V., Abramochkin V.N., Poznakharev E.S., Fedosov A.V., Kudryavtsev A.N.* Atmospheric correction of satellite images of the Earth's surface in the optical wavelength range. Optical communication based on scattered radiation // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 1. P. 80–84.
14. *Тарасенков М.В., Зимовая А.В., Белов В.В., Энгель М.В.* Восстановление коэффициентов отражения земной поверхности по спутниковым измерениям MODIS с учетом поляризации излучения // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 8. С. 641–649; *Tarasenkov M.V., Zimovaya A.V., Belov V.V., Engel M.V.* Retrieval of reflection coefficients of the earth's surface from modis satellite measurements considering radiation polarization // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 2. P. 179–187.
15. *Lurton T., Renard J.-B., Vignelles D., Jeannot M., Akiki R., Mineau J.-L., Tonnelier T.* Light scattering at small angles by atmospheric irregular particles: Modelling and laboratory measurements // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7. P. 931–939. DOI: 10.5194/amt-7-931-2014.
16. *WMO* Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016–2023. Geneva: WMO, 2017. N 228. 84 p.
17. *Розенберг Г.В.* Рассеяние света в земной атмосфере // Успехи физ. наук. 1960. Т. 71, вып. 2. С. 173–213.
18. *Юнге Х.* Химический состав и радиактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. 424 с.
19. *Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б.* Оптическая стратификация атмосферного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1971. Т. 7, № 7. С. 737–749.
20. *Bullrich K.* Scattering radiation in the atmosphere and the natural aerosol // Adv. Geophys. 1964. V. 10. P. 99–260.
21. *Зуев В.Е.* Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Сов. радио, 1966. 317 с.
22. *Розенберг Г.В.* Оптические исследования атмосферного аэрозоля // Успехи физ. наук. 1968. Т. 95, вып. 1. С. 159–208.
23. *Розенберг Г.В.* Свойства атмосферного аэрозоля по данным оптического исследования // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1967. Т. 3, № 9. С. 936–949.
24. *Атмосферный* аэрозоль и его влияние на перенос излучения / под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 119 с.
25. *Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А.* Глобальные климатические катастрофы. М.: Гидрометеоиздат, 1986. 160 с.
26. *Розенберг Г.В.* Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля – кинетически обусловленные параметры // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1983. Т. 19, № 1. С. 21–35.
27. *Boucher O., Bellassen V., Benveniste H., Ciais P., Criqui P., Guivarch C., Le Treut H., Mathy S., Seferian R.* In the wake of Paris Agreement, scientists must embrace new directions for climate change research // PNAS. 2016. V. 113, N 27. P. 7287–7290. DOI: 10.1073/pnas.1607739113.
28. *Ташенов Б.Т.* Околосолнечный ореол и атмосферный аэрозоль / Рассеяние и поглощение света в атмосфере. Алма-Ата: Наука Казахской СССР, 1971. С. 29–37.

29. *Горчаков Г.И., Исаков А.А.* Ореольные индикатрисы дымки // Изв. АН СССР. Сер. физ. атмосф. и океана. 1974. Т. 10, № 5. С. 504–511.
30. *Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И.* Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
31. *Pritchard B.S., Eliott W.G.* Two instruments for atmospheric optics measurements // J. Opt. Soc. Atmos. 1960. V. 50, N 3. P. 191–199.
32. *Горчаков Г.И., Исаков А.А., Свириденков М.А.* Статистические связи между коэффициентом рассеяния и коэффициентом направленного светорассеяния в области углов 0,5–165° // Изв. АН СССР. Сер. физ. атмосф. и океана. 1976. Т. 12, № 12. С. 1261–1267.
33. *Любовцева Ю.С., Розенберг Г.В.* Ореольная часть индикатрисы рассеяния в приземном воздухе // Изв. АН СССР. Сер. физ. атмосф. и океана. 1966. Т. 2, № 3. С. 248–262.
34. *Pol'kin V.V., Pol'kin Vas.V.* Inter-annual and seasonal variability of the diurnal behavior of aureole scattering phase function at the aerosol monitoring station of LOA IAO SB RAS in 2010–2014 // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. DOI: 10.1117/12.2205780.
35. *Polkin Vas.V.* Seasonal variation of the diurnal behavior of aureole scattering phase function at the aerosol monitoring station of LOA IAO SB RAS // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. DOI: 10.1117/12.2503052.
36. *Polkin Vas.V., Panchenko M.V.* Annual variation of the of aureole scattering phase function at the surface layer of the Tomsk suburb // Proc. SPIE. 2019. V. 11208 DOI: 10.1117/12.2540709.
37. *Свириденков М.А.* Аппроксимация ван де Хюлста и микроструктура пылевого аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1993. Т. 29, № 2. С. 218–221.
38. *Шмаргунов В.П., Полькин Вик.В., Тумаков А.Г., Панченко М.В., Полькин Вас.В.* Ореольный фотометр закрытого объема // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 6. С. 155–157.
39. *Ореольный* фотометр закрытого типа: Патент на полезную модель № 142875. Россия, МПК, G01J 1/04. Полькин Вас.В., Полькин В.В., Шмаргунов В.П., Тумаков А.Г., Панченко М.В.; ФГБУН Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2013136713/28; Заявл. 06.08.2013; Опубл. 10.07.2014. Бюл. № 19.
40. *Панченко М.В., Полькин В.В., Полькин Вас.В., Козлов В.С., Яушева Е.П., Шмаргунов В.П.* Распределение по размерам «сухой основы» частиц в приземном слое атмосферы пригородного района г. Томска в рамках эмпирической классификации типов «аэрозольной погоды» // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 7. С. 539–547; *Panchenko M.V., Pol'kin V.V., Pol'kin Vas.V., Kozlov V.S., Yausheva E.P., Shmargunov V.P.* The size distribution of the "dry matter" of particles in the surface air layer in suburbs of Tomsk within the empirical classification of "aerosol weather" types // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 6. P. 655–662. DOI: 10.1134/S1024856019060113.
41. *Крамер Г.* Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
42. *Ковалев А.Ф.* Некоторые характеристики поверхности земли как источника аэрозоля // Тр. ИЭМ. 1990. № 51. С. 83–87.
43. *Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П.* Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 561–569; *Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P.* Diurnal variations of the submicron aerosol and black carbon in the near-ground layer // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 1. P. 30–38.

Vas.V. Pol'kin, V.V. Pol'kin, M.V. Panchenko. **Long-term observations of the aureole scattering phase function in the surface air layer of the suburbs of Tomsk (2010–2021).**

The long-term measurements of the aureole scattering phase function are analyzed for angles $\varphi = 1.2°$ and 20° ($I_{1.2}$ and I_{20}), which were obtained using a closed-type halo photometer at the aerosol station of the LAO of the IAO SB RAS in 2010–2021. The analysis of the temporal variability of the parameters was carried out for interannual and annual data and the diurnal behavior of hourly measurements. The daily averages were calculated from the hourly averages, the monthly averages, from daily averages and the annual averages, from the monthly averages. A weak but significant ($p = 0.05$ level) time trend was found only for the interannual values of $I_{1.2}$, which amounted to 1.14% per year. In the annual course of $I_{1.2}$, a monotonous increase in the values from winter to summer months is clearly observed. In the annual course of I_{20}, we see a decrease in values from winter to summer. Smokes from distant wildfires in 2012 and 2016 and partially in 2018 and 2019 disrupt this pattern with increased I_{20} values in July and insignificantly in June, August, and September. The diurnal behavior of the aureole scattering phase function values $I_{1.2}$ and I_{20} and the ratios $I_{20}/I_{1.2}$ constructed for the annual variation of monthly average daily values are typical of the behavior of surface aerosol under continental conditions. Smokes from remote wildfires lead to high values of I_{20} at night, morning, and evening, and the decrease in I_{20} during the daytime is insignificant with a probability of 0.95 due to the high standard deviation.